

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

Controlador Automático de Presión para Mejora de la Eficiencia en Bombas ESP con Monitoreo IoT.

Juan Camilo Hernández Mateus

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

William Razvan Castro Jaluba, MsC

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2025

TABLA DE CONTENIDOS

Introducción	8
1. Objetivos	10
1.1 Objetivo general:.....	10
1.2 Objetivos específicos:	10
2. Marco Teórico.....	11
2.1 Sistemas de Levantamiento Artificial	11
2.2 Controladores Automáticos	12
2.3 Tecnología IoT en la Industria Petrolera.....	13
2.3.1 Protocolo MQTT.....	13
2.3.2 Infraestructura en la Nube con AWS	13
2.4 Simulación y Validación con MATLAB	13
2.5 Node-RED para Monitoreo y Control Simulado	14
2.6 Integración del Sistema.....	14
3. Metodología	15
3.1 Modelo matemático	16
3.2 Modelo Discretizado	21
3.3 Diseño del controlador PI	23
3.4 Arquitectura IoT.....	27
4. Análisis y resultados	32
5. Conclusiones	40
6. Recomendaciones	41
Referencias:.....	43
Apéndices.....	45

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Bomba electrosumergible (ESP)</i>	12
Figura 2 <i>Diagrama de bloques de un controlador en lazo retroalimentado</i>	24
Figura 3 <i>Arquitectura Implementada para el sistema</i>	28
Figura 4 <i>Diagrama de flujo del proceso en Node-Red</i>	30
Figura 5 <i>Diagrama de flujo protocolo MQTT</i>	31
Figura 6 <i>Tendencia de la presión Pip</i>	32
Figura 7 <i>Comportamiento del modelo simulado en Matlab</i>	34
Figura 8 <i>Modelo discretizado con $T=1s$</i>	35
Figura 9 <i>Modelo en lazo cerrado</i>	36
Figura 10 <i>Controlador PI y PID simulink</i>	37
Figura 11 <i>Comparación de los tiempos de muestreo</i>	38
Figura 12 <i>Funcionamiento y monitoreo del cotrolador local</i>	38
Figura 13 <i>Variaciones en el setpoint</i>	39
Figura 14 <i>Alternancia entre control local y control de nube</i>	39
Figura 15 <i>Interfaz del monitoreo de la nube</i>	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Datos condiciones típicas bomba (ESP)</i>	21
Tabla 2 <i>Valores Simulados de PIP para Diferentes Frecuencias</i>	33
Tabla 3 <i>Impactos en Función de la Frecuencia</i>	35
Tabla 4 <i>Comparación de los tiempos de muestreo</i>	37

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice A: Repositorio en GitHub.....45

Resumen

Título: Controlador Automático de Presión para Mejorar la Eficiencia en Bombas ESP con Monitoreo IoT*¹

Autor: Juan Camilo Hernández Mateus**²

Palabras Clave: Interfaz intuitiva, optimización de procesos, bombas ESP, automatización industrial, IoT(Internet de las Cosas), control de presión, sistemas híbridos (local y nube).

Descripción: La industria petrolera enfrenta retos en la eficiencia y confiabilidad de la extracción, especialmente en pozos con baja presión natural. Las bombas eléctricas sumergibles (ESP) son esenciales, pero enfrentan problemas como desgaste prematuro, interrupciones operativas y métodos de monitoreo limitados, lo que afecta la productividad y los costos. Este proyecto propone diseñar y simular un controlador automático de presión para bombas ESP, utilizando modelos matemáticos que relacionen la presión del pozo con la frecuencia de la bomba, e integrando un sistema de monitoreo IoT basado en el protocolo MQTT y servicios en la nube de AWS para supervisar el sistema. Con herramientas como MATLAB/Simulink y un controlador ajustado por el método del Lugar de las Raíces, se busca optimizar la extracción, reducir tiempos de inactividad y mejorar la confiabilidad operativa. Aunque se limita a simulaciones, el proyecto sienta bases sólidas para futuras aplicaciones industriales.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: William Razvan Castro Jaluba, MSc

Abstract

Title: Controlador Automático de Presión para Mejorar la Eficiencia en Bombas ESP con Monitoreo IoT*³

Author: Juan Camilo Hernández Mateus**⁴

Keywords: Interfaz intuitiva, optimización de procesos, bombas ESP, automatización industrial, IoT(Internet de las Cosas), control de presión, sistemas híbridos (local y nube).

Description: The oil industry faces challenges in extraction efficiency and reliability, particularly in wells with low natural pressure. Electric submersible pumps (ESPs) are essential but encounter issues such as premature wear, operational interruptions, and limited monitoring methods, impacting productivity and costs. This project proposes the design and simulation of an automatic pressure controller for ESPs, using mathematical models that correlate well pressure with pump frequency and integrating an IoT monitoring system based on the MQTT protocol and AWS cloud services for system supervision. With tools like MATLAB/Simulink and a controller fitted by the Root Locus method, the aim is to optimize extraction, reduce downtime, and improve operational reliability. Although limited to simulations, the project lays a solid foundation for future industrial applications.

³ Degree Project

⁴ Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering.
Director: William Razvan Castro Jaluba, MSc

Introducción

La extracción de petróleo, una de las actividades industriales más relevantes a nivel mundial, enfrenta numerosos desafíos técnicos y operativos. En un escenario global donde la demanda de energía sigue en aumento, es fundamental asegurar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de extracción para mantener la competitividad y sostenibilidad del sector. Según estimaciones recientes, más del 90% de los pozos petroleros dependen de sistemas artificiales de levantamiento, como las bombas eléctricas sumergibles (ESP, por sus siglas en inglés), debido a la baja presión natural en los yacimientos. Estas bombas son cruciales para extraer petróleo desde grandes profundidades, aunque su operación se ve afectada por problemas como desgaste prematuro, tiempos de inactividad y la carencia de sistemas de monitoreo avanzados, lo que impacta negativamente los costos y la productividad (Schlumberger, 2022).

La adopción de tecnologías que combinen eficiencia operativa con monitoreo avanzado se ha convertido en una prioridad global. Organismos como la Agencia Internacional de Energía han destacado la necesidad de implementar soluciones innovadoras que optimicen los procesos industriales y reduzcan los riesgos asociados con fallos críticos en sistemas clave. En este contexto, el presente proyecto se centra en diseñar y simular un controlador automático de presión para bombas ESP, acompañado de un sistema de monitoreo basado en tecnología IoT que permita supervisar y optimizar la operación. Estas tecnologías buscan no solo reducir tiempos de inactividad y mejorar la confiabilidad operativa, sino también minimizar riesgos económicos y operativos derivados de fallos inesperados (Agencia Internacional de Energía, 2023).

El controlador propuesto emplea un enfoque basado en controladores clásicos, ajustados mediante el método del lugar de las raíces, para garantizar una respuesta eficiente ante cambios en la frecuencia de la bomba. Por su parte, el sistema de monitoreo IoT utiliza el protocolo MQTT y servicios en la nube alojados en AWS para ofrecer datos en tiempo real sobre presión y desempeño del sistema. La validación del modelo y el análisis de su impacto se realizarán mediante simulaciones en MATLAB/Simulink.

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

Este proyecto no solo aborda los desafíos actuales de confiabilidad y eficiencia, sino que también sienta las bases para futuras extensiones, utilizando Node-RED para simular el monitoreo y control. Esta herramienta permite modelar un proceso avanzado y escalable sin requerir la incorporación de sensores adicionales. De este modo, se optimizan los procesos de extracción en entornos simulados y se impulsa el desarrollo de tecnologías avanzadas con potencial de aplicación en múltiples sectores industriales.

El documento se organiza en cuatro capítulos: el primero revisa los fundamentos teóricos y la literatura relevante; el segundo detalla la metodología para el diseño y simulación del controlador; el tercero expone los resultados obtenidos y las conclusiones, y el cuarto aborda los desafíos futuros y posibles aplicaciones adicionales del sistema. Este trabajo pretende ser un aporte significativo a la modernización de los sistemas de levantamiento artificial en la industria petrolera, promoviendo soluciones más robustas y sostenibles.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general:

Diseñar un controlador automático de presión con monitoreo IoT para mejorar la eficiencia y confiabilidad de las bombas ESP en operaciones de extracción de petróleo.

1.2 Objetivos específicos:

- Diseñar un controlador en MATLAB, basándonos en una planta que describa el funcionamiento del sistema.
- Configurar la plataforma Node-RED para el monitoreo remoto, asegurando la transmisión de datos de presión y estado del sistema de forma eficiente, garantizando la alternancia entre control local y en la nube.
- Realizar simulaciones del sistema de control, utilizando la plataforma Node-RED de tal manera que repliquen las condiciones operativas del pozo y permitan probar el rendimiento de las bombas ESP.

2. Marco Teórico

Esta sección establecerá los conceptos fundamentales necesarios para entender el desarrollo y los objetivos del proyecto. Estos conceptos proporcionarán al lector las bases para interpretar correctamente los métodos, simulaciones y resultados expuestos, permitiendo una comprensión completa de las soluciones planteadas y su relevancia en el contexto de la industria petrolera.

2.1 Sistemas de Levantamiento Artificial

El levantamiento artificial es una técnica fundamental en la industria petrolera, empleada para garantizar la producción en pozos donde la presión natural no es suficiente para llevar el petróleo a la superficie. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran las bombas eléctricas sumergibles (ESP, por sus siglas en inglés), reconocidas por su capacidad para gestionar grandes volúmenes de extracción y adaptarse a diferentes profundidades de operación. Estas bombas están diseñadas para funcionar en pozos de hasta varios miles de metros de profundidad y se componen de un motor eléctrico, un protector, una sección de bomba y un cable de alimentación (Schlumberger, 2022).

Gracias a su diseño modular, las ESP pueden configurarse para cumplir con los requisitos específicos de cada pozo, ajustando elementos como el número de etapas de la bomba para manejar diferentes flujos o viscosidades. Sin embargo, a pesar de su versatilidad, estos sistemas enfrentan importantes desafíos, como el desgaste acelerado causado por condiciones extremas (altas temperaturas, salinidad elevada y partículas abrasivas) y la necesidad de ajustes frecuentes para maximizar la eficiencia operativa. Esto convierte a las ESP en un componente crítico, pero complejo, dentro de los sistemas de extracción (Schlumberger, 2022).

Para superar estos desafíos, es imprescindible implementar tecnologías avanzadas de monitoreo y control que permitan optimizar las condiciones operativas en tiempo real. Este proyecto propone integrar

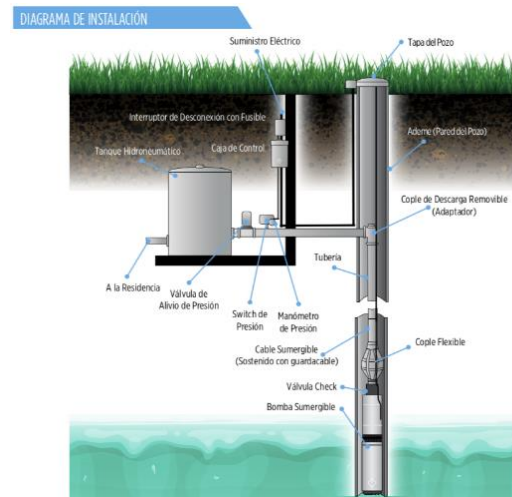
CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

estas tecnologías utilizando controladores clásicos y plataformas IoT, con el objetivo de reducir tiempos de inactividad del sistema de extracción de petróleo con bombas electrosumergibles (Schlumberger, 2022).

Figura

1

Bomba electrosumergible (ESP).



2.2 Controladores Automáticos

El control automático es esencial para garantizar la estabilidad y eficiencia de los sistemas industriales. En el caso de los sistemas de levantamiento artificial, los controladores clásicos destacan por su capacidad de regular dinámicamente las operaciones, minimizando errores y estabilizando variables críticas como la presión en el pozo (PIP).

El controlador funciona ajustando continuamente la frecuencia de operación de la bomba según la diferencia entre la presión medida y el valor de referencia. Este proyecto aplica el método del lugar de las raíces para calcular las ganancias del controlador, optimizando así la capacidad de este para responder a cambios en las condiciones del pozo.

Este enfoque asegura una respuesta eficiente frente a fluctuaciones, como variaciones en la presión, lo que disminuye el desgaste del equipo y mejora la estabilidad del sistema.

2.3 Tecnología IoT en la Industria Petrolera

2.3.1 Protocolo MQTT

El protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es una solución ligera y eficiente diseñada para la transmisión de datos en aplicaciones IoT, especialmente en entornos con ancho de banda limitado o alta latencia. Su modelo de publicación y suscripción permite que los dispositivos se comuniquen de forma asíncrona, reduciendo el uso de recursos y asegurando que solo se envíen datos relevantes (MQTT Organization, 2023).

En este proyecto, MQTT se utiliza para transmitir información operativa, como la presión y frecuencia de las bombas ESP, hacia una plataforma de monitoreo en la nube. Esto garantiza que los operadores puedan supervisar el sistema, incluso en ubicaciones remotas con conectividad limitada (MQTT Organization, 2023).

2.3.2 Infraestructura en la Nube con AWS

Amazon Web Services (AWS) ofrece una infraestructura robusta y escalable para gestionar datos IoT. Servicios como AWS IoT Core permiten conectar dispositivos a la nube, recopilar información y analizarla. Además, herramientas como AWS Lambda automatizan respuestas ante eventos críticos, mientras que Amazon S3 facilita el almacenamiento de grandes volúmenes de datos históricos, útiles para mantenimiento predictivo y análisis detallados (Amazon Web Services 2024).

La combinación de MQTT y AWS asegura que el sistema sea confiable y escalable, con capacidad para incorporar más variables o conectar múltiples pozos en una red centralizada de monitoreo (Amazon Web Services 2024).

2.4 Simulación y Validación con MATLAB

MATLAB y Simulink son herramientas clave para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos complejos. MATLAB permite desarrollar modelos matemáticos precisos que describen el comportamiento

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

del sistema, mientras que Simulink proporciona un entorno visual para evaluar la respuesta del controlador bajo diversas condiciones operativas.

En este proyecto, se modela la relación entre la presión del pozo y la frecuencia de la bomba, permitiendo analizar cómo el sistema responde a diferentes escenarios. Estas simulaciones ayudan a ajustar los parámetros del controlador y validar su desempeño antes de implementar el sistema en un entorno real.

2.5 Node-RED para Monitoreo y Control Simulado

Node-RED es una plataforma visual basada en flujos que facilita el desarrollo rápido de aplicaciones IoT. En este proyecto, se utiliza para simular el monitoreo y control del sistema ESP, representando el intercambio de datos entre sensores virtuales, el controlador y los servicios en la nube.

Node-RED permite configurar flujos de datos, generar alertas automáticas y visualizar métricas clave, como presión y frecuencia, en paneles interactivos. Esto facilita la validación del diseño antes de la implementación física y permite a los operadores interactuar con el sistema de manera sencilla.

Por ejemplo, Node-RED puede generar alertas cuando la presión supera límites críticos, simulando situaciones que podrían ocurrir en un entorno real. Esta capacidad lo convierte en una herramienta valiosa para evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones simuladas, reduciendo costos asociados a pruebas físicas.

2.6 Integración del Sistema

La combinación de MATLAB, Node-RED, MQTT y AWS crea un enfoque integral para el diseño y simulación de sistemas de levantamiento artificial. MATLAB y Simulink proporcionan una base sólida para modelar el sistema, Node-RED simula su monitoreo, MQTT asegura una comunicación eficiente y AWS ofrece la infraestructura necesaria para almacenar y analizar datos en la nube.

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

Este enfoque integrado garantiza un sistema eficiente, confiable y escalable, estableciendo bases sólidas para futuras mejoras, como el uso de inteligencia artificial para análisis predictivo o la incorporación de sensores físicos en implementaciones reales.

3. Metodología

En esta sección se describen de manera detallada los procedimientos llevados a cabo para el desarrollo del presente proyecto investigativo. El análisis comienza con una exposición clara de los objetivos planteados, seguida de una evaluación exhaustiva de las alternativas disponibles para abordar los desafíos identificados. A continuación, se presenta la descripción de los métodos seleccionados, justificando su elección en función de su aplicabilidad, eficacia y relevancia dentro del contexto del sistema de extracción mediante bombas eléctricas sumergibles (ESP).

Se incluyen también los modelos matemáticos y de simulación desarrollados para representar el comportamiento dinámico del sistema. Estos modelos fueron implementados utilizando herramientas como MATLAB y Simulink, con el propósito de validar la funcionalidad del controlador propuesto. Paralelamente, se detalla el proceso de simulación y monitoreo del sistema mediante la plataforma Node-RED, junto con la integración del protocolo MQTT, que permite emular la comunicación en tiempo real entre dispositivos conectados.

Además, se describen los flujos de datos diseñados y su vinculación con servicios en la nube, específicamente AWS, lo que asegura un sistema de monitoreo eficiente, confiable y escalable. Esta integración es clave para garantizar la supervisión en tiempo real del sistema y su adaptabilidad a futuros requerimientos.

Finalmente, se realiza un análisis preliminar de los resultados obtenidos en las simulaciones, los cuales serán discutidos en profundidad en la siguiente sección. Este análisis tiene como objetivo evaluar la

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

eficacia de las soluciones propuestas y plantear posibles mejoras para optimizar el desempeño del sistema diseñado.

3.1 Modelo matemático

El sistema se enfoca en analizar el comportamiento dinámico de la presión en el pozo (PIP) en función de la frecuencia de operación de la bomba ESP (N). La relación entre estas variables se describe mediante una ecuación diferencial obtenida a partir del balance de caudales, la cual toma en cuenta las siguientes variables:

$$C \frac{dPIP}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (1)$$

Donde:

- $\frac{dPIP}{dt}$: Representa el cambio de la presión P_{PIP} en el tiempo.
- C : Es la capacitancia volumétrica del sistema (ft^3/psi). Describe la capacidad del sistema para almacenar fluido.
- q_{in} : Es el caudal de entrada generado por la bomba ESP.
- q_{out} : Es el caudal de salida, que depende de la resistencia hidráulica (estrangulador o choke).

El caudal de entrada (q_{in}) está directamente vinculado a la frecuencia de operación de la bomba (N), mientras que el caudal de salida (q_{out}) está determinado por la resistencia al flujo, la cual es modelada a través de un estrangulador (choke).

$$q_{in} = k_b \cdot N \quad (2)$$

Donde:

- k_b : Constante que relaciona la frecuencia (RPM) con el caudal (ft^3/psi).
- N : Frecuencia de la bomba en RPM .

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

Esto implica que, al variar la frecuencia de operación de la bomba, se ajusta directamente el caudal de entrada al sistema.

El caudal de salida está modelado como una función no lineal de la presión debido al choke (estrangulador):

$$q_{out} = k_{choke} \cdot (P_{pip})^n \quad (3)$$

Donde:

- k_{choke} : Constante que describe la resistencia hidráulica del choke ($ft^3/s/psi$).
- P_{pip} : Presión en el pozo.
- n : Exponente que refleja el comportamiento no lineal del flujo.
- Sustituyendo q_{in} y q_{out} en el balance de caudales, obtenemos:

$$C \frac{dPIP}{dt} = Kb \cdot N - K_{choke} PIP^n \quad (4)$$

Para simplificar el análisis y diseño del controlador, el modelo no lineal se linealiza alrededor de un punto de operación P_{PIP0} y N_0 . Usamos una expansión de Taylor para aproximar el sistema:

$$PIP = PIP_0 + \Delta PIP \quad (5)$$

$$N = N_0 + \Delta N \quad (6)$$

2) sustituir la ecuación diferencial, usar Taylor de orden superior ($\Delta PIP^2, \Delta N^2$)

$$C \frac{d(\Delta PIP)}{dt} = Kb \cdot \Delta N - K_{choke} \cdot PIP_0^{n-1} \cdot \Delta PIP \quad (7)$$

Ecuación Linealizada

$$C \frac{d(\Delta PIP)}{dt} + n \cdot K_{choke} \cdot PIP_0^{n-1} \cdot \Delta PIP = Kb \cdot \Delta N \quad (8)$$

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

Expandir a un modelo de segundo orden para incorporar términos adicionales que representen la inercia y la resistencia del sistema, la ecuación diferencial se transforma en:

$$C \cdot \frac{d^2(\Delta P_{ip})}{dt^2} + \frac{2}{3} \cdot n \cdot k_{choke} \cdot P_{ip_0}^{n-1} \cdot \frac{d(\Delta P_{ip})}{dt} + \left(\frac{n \cdot k_{choke} \cdot P_{ip_0}^{n-1}}{C} \right)^2 \cdot \Delta P_{ip} = \frac{k_b}{C} \cdot \Delta N \quad (9)$$

Al comparar la ecuación con la forma estándar de un sistema de segundo orden, se pueden establecer las siguientes equivalencias:

La forma general de un sistema de segundo orden se expresa como:

$$\text{Modelo dinámico} \rightarrow C \frac{d^2(\Delta PIP)}{dt^2} + (2\zeta wn C) \cdot \frac{d(\Delta PIP)}{dt} + wn^2 C \cdot \Delta PIP = Kb \cdot \Delta N$$

Donde:

$wn \rightarrow$ Frecuencia neutral del sistema

$\zeta \rightarrow$ Factor de amortiguamiento

Relación con los parámetros del sistema:

$$wn = \sqrt{\frac{n \cdot Kchoque \cdot PIP_0^{n-1}}{C}} \quad (10)$$

Ajustamos el modelo en términos de las variables que nos interesan para validar nuestro sistema:

$$\frac{d^2 P_{PIP}}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dP_{PIP}}{dt} + a_2 \cdot P_{PIP} = b_0 \cdot N \quad (11)$$

Donde:

- $a_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{n \cdot k_{choke} \cdot P_{PIP,0}^{n-1}}{C}$: Término de amortiguamiento.
- $a_2 = \frac{\left(\frac{n \cdot k_{choke} \cdot P_{PIP,0}^{n-1}}{C} \right)^2}{2}$: Término de rigidez.
- $b_0 = \frac{kb}{C}$: Relación entre la frecuencia y la presión.

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

Para analizar y diseñar controladores, transformamos la ecuación diferencial al dominio de Laplace.

Su forma final es:

$$G(s) = \frac{P_{PIP}(s)}{N(s)} = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_2} \quad (12)$$

La función de transferencia obtenida corresponde a un sistema de segundo orden, cuyas principales características son las siguientes:

- **Ganancia estática (b_0):** Representa la relación entre la variación de la frecuencia y el cambio en la presión.
- **Amortiguamiento (a_1):** Indica la rapidez con la que el sistema alcanza la estabilidad.
- **Frecuencia natural (a_2):** Está asociada a la velocidad con la que el sistema responde a cambios externos.

Finalmente, obtenemos la función de transferencia que describirá el funcionamiento de nuestro sistema:

$$G(s) = \frac{P_{PIP}(s)}{N(s)} = \frac{b_0 \times K}{s^2 + a_1s + a_2} \quad (13)$$

El parámetro K es una constante que define la relación entre la presión en el tubo de producción (P_{ip}) y la frecuencia de operación de la bomba ESP (f), medida en Hz. Este parámetro es crucial para caracterizar el comportamiento del sistema de levantamiento artificial, ya que determina cómo las variaciones en la frecuencia de la bomba influyen directamente en la presión generada en el sistema.

El valor de K se calculó bajo las siguientes condiciones operativas del sistema:

- Para $f = 60\text{Hz}$, $P_{ip} = 100\text{psi}$

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

- Para $f = 30\text{Hz}$, $Pip = 400\text{psi}$

La relación se expresa mediante la fórmula:

$$K = Pip \cdot f^2 \quad (14)$$

Sustituyendo las condiciones de operación:

Para $f = 60\text{ Hz}$, $Pip = 100\text{ psi}$

$$K = 100 \cdot 60^2 = 100 \cdot 3600 = 360,000$$

Para verificar con:

Para $f = 30\text{ Hz}$, $Pip = 400\text{ psi}$

$$Pip = \frac{K}{f^2} = \frac{360,000}{30^2} = \frac{360,000}{900} = 400\text{psi} \quad (15)$$

Ambos escenarios muestran que $K=360,000$ cumple con las condiciones iniciales del sistema.

Este valor de K refleja que la presión y la frecuencia de la bomba están relacionadas de manera cuadrática. Esto significa que, al aumentar la frecuencia, la presión también aumenta de forma cuadrática, lo cual es típico del funcionamiento de las bombas eléctricas sumergibles. Este parámetro es esencial para entender y validar el modelo matemático del sistema, además de ser útil para ajustar los controladores que mejoran su operación.

Con el objetivo de validar el modelo matemático del sistema de levantamiento artificial mediante la bomba ESP, se llevaron a cabo pruebas utilizando los datos ajustados y los parámetros calculados. Estos valores, que representan las condiciones típicas de operación de un pozo petrolero, fueron empleados para evaluar la precisión y la aplicabilidad del modelo en diferentes escenarios.

En esta ocasión, las pruebas se realizaron con los siguientes datos del sistema:

Tabla**1***Datos condiciones típicas bomba (ESP)*

Parámetro	Valor	Unidad
n	2	–
$kchoke$	0.01	$Pa^{-n} \cdot s^{-1}$
Pip_0	200 <i>psi</i> = 137,895.15	<i>Pa</i>
C	1.0	m^3/Pa
Kb	2.0833	m^3/RPM
K	360,000	–

El modelo matemático resultante, representado por la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{750,000}{s^2 + 3s + 2} \quad (16)$$

3.2 Modelo Discretizado.

El primer paso para discretizar un sistema continuo es seleccionar un tiempo de muestreo $T=l$ debido a que satisface el criterio de Nyquist, asegurando que la frecuencia de muestreo es al menos el doble de la frecuencia más alta presente en la dinámica del sistema, este parámetro define la frecuencia con la que se analizan y procesan las señales del sistema.

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (17)$$

Donde T es el periodo de muestreo Reemplazamos s en el denominador de $G(s)$ por esta expresión:

$G(s)$ es $s^2 + 3s + 2$ sustituyendo s por $\frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$, obtenemos:

$$s^2 = \left(\frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 \quad 3s = 3 \cdot \frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \text{ y } 2 \text{ es constante.}$$

Sustituimos estas expresiones en el denominador. Expandimos y simplificamos para obtener un polinomio en términos de z^{-1} . Esto nos da el denominador en el dominio discreto. El numerador 750,00 es

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

constante, por lo que permanece igual al transformarlo. Finalmente obtenemos $G(z)$ en términos de z^{-1} , que tiene la forma.

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^2}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^2} \quad (18)$$

Donde:

- b_0, b_1, b_2 son los coeficientes del numerador.
- a_1, a_2 son los coeficientes del denominador.

Conversión a ecuaciones en diferencias, la salida $y[n]$ y la entrada $u[n]$ están relacionadas mediante:

$$y[n] = -a_1 y[n-1] - a_2 y[n-2] + b_0 u[n-1] + b_2 u[n-2] \quad (19)$$

Donde:

- $y[k]$: salida en el instante k
- $u[k]$: entrada en el instante k
- $y[k-1], y[k-2]$: salidas en instantes previos.
- $u[k-1], u[k-2]$: entradas en instantes previos.

Esta es la ecuación en diferencias correspondiente.

Sustituyendo los valores de a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2 obtenidos de $G(z)$, se completará la ecuación. Para calcular los coeficientes a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2 del modelo discreto, se empleó MATLAB utilizando el comando `c2d` con el método de Tustin. En primer lugar, la función de transferencia continua ($G_{\text{continuous}}$) fue convertida a su versión discreta (G_{discrete}) aplicando un tiempo de muestreo TT . Posteriormente, mediante el comando `tfdata`, se obtuvieron los coeficientes del numerador y denominador en formato

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

vectorial. Finalmente, se asignaron los valores correspondientes a los coeficientes (b_0 , b_1 , b_2 para el numerador y a_1 , a_2 para el denominador). Este procedimiento permitió describir con precisión el comportamiento del sistema en el dominio discreto.

- $b_0 = 1.5584 \times 10^3$,
- $b_1 = 3.1169 \times 10^3$,
- $b_2 = 1.5584 \times 10^3$,
- $a_1 = -1.7229$,
- $a_2 = 0.7403$.

La función de transferencia discreta es:

$$G(z) = \frac{1.5584 \times 10^3 + 3.1169 \times 10^3 z^{-1} + 1.5584 \times 10^3 z^{-2}}{1 - 1.7229 z^{-1} + 0.7403 z^{-2}} \quad (20)$$

La ecuación en diferencias:

$$y(k) = 1.5584 \cdot 10^3 \cdot u(k) + 3.1169 \cdot 10^3 \cdot u(k-1) + 1.5584 \cdot 10^3 \cdot u(k-2) + 1.7229 \cdot y(k-1) - 0.7403 \cdot y(k-2) \quad (21)$$

La ecuación en diferencias obtenida a partir del diseño del controlador PI será implementada en Node-RED para simular el comportamiento dinámico de la planta. Esta implementación permitirá replicar la respuesta del sistema, visualizando el efecto del controlador PI sobre las variables de interés, como la presión de fondo de pozo Pip.

3.3 Diseño del controlador PI

El diseño del controlador Proporcional-Integral (PI) para el sistema propuesto se realizó con el propósito de optimizar la estabilidad y el desempeño del sistema de levantamiento artificial basado en bombas eléctricas sumergibles (ESP). Este controlador fue desarrollado para asegurar un overshoot menor al 5%, este criterio fue tomado en cuenta debido a que nuestro sistema es robusto y por ende es importante

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

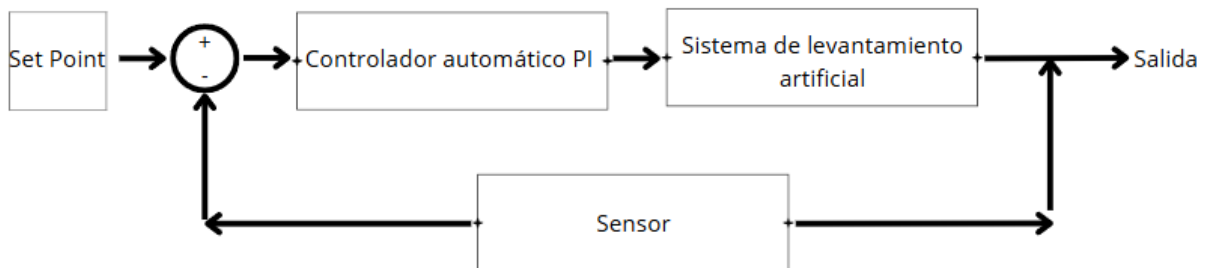
evitar oscilaciones considerables, por otro lado, se escogió un tiempo de establecimiento de 30 segundos debido a las características inherentes de la dinámica del proceso, normalmente tienen una respuesta relativamente lenta, lo que nos permite utilizar un T_s más largo sin comprometer la estabilidad ni la precisión del control. Estos son factores esenciales para garantizar la eficiencia operativa del sistema.

El proceso comenzó con el análisis del modelo matemático en lazo abierto, representado por una función de transferencia de segundo orden, y la aplicación de dos condiciones clave: Condición de Ángulo y Condición de Magnitud. Estas herramientas permitieron determinar con precisión los valores de los parámetros K_p (ganancia proporcional) y K_i (ganancia integral), cumpliendo con las especificaciones de diseño en el dominio del tiempo.

Figura

2

Diagrama de bloques de un controlador en lazo retroalimentado



Para realizar el diseño se partió de la función de transferencia continua del sistema, que describe la relación entre la frecuencia de la bomba ($u(t)$) y la presión en el pozo ($Pip(t)$):

$$G(s) = \frac{750,000}{s^2 + 3s + 2} \quad (22)$$

Esta función de transferencia representa un sistema de segundo orden. El propósito fue diseñar un controlador PI que mejore la estabilidad del sistema y su capacidad de seguimiento.

El objetivo es diseñar un controlador PI que cumpla con las especificaciones de:

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

- Overshoot (OV) < 5%.
- Estabilidad del sistema en lazo cerrado.
- Reducción del error en estado estacionario.

Teniendo en cuenta requisitos, los polos deseados se obtienen con $OV < 5\%$ y $T_s = 30$ s:

- Relación de amortiguamiento deseada (ζ) para $OV < 5\%$:

$$\zeta = -\frac{\ln(0.05)}{\sqrt{(\pi^2 + \ln^2(0.05))}} \approx 0.6901 \quad (23)$$

Frecuencia natural (ω_n):

$$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \Rightarrow \omega_n = \frac{4}{T_s \cdot \zeta} = \frac{4}{30 \cdot 0.6901} \approx 0.193 \text{ rad/s} \quad (24)$$

- Los polos deseados son:

$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{(1 - \zeta^2)} \rightarrow s_{1,2} = -0.133 \pm j0.137 \quad (25)$$

El diseño del controlador usa las condiciones de magnitud y ángulo para garantizar que:

$$C(s)G(s) = 1 \text{ cuando } s = s_1.$$

- Evaluación de $G(s)$ en $s = s_1$: Evaluamos la planta en $s_1 = -0.133 + j0.137$:

$$G(s_1) = \frac{750000}{(-0.133 + j0.137)^2 + 3(-0.133 + j0.137) + 2} \quad (26)$$

- Expandimos los términos:

$$|s^2 + 3s + 2| = |(-0.133 + j0.137)^2 + 3(-0.133 + j0.137) + 2| \quad (27)$$

$$|s^2 + 3s + 2| = |1.618 - j0.447| \quad (28)$$

- Calculamos la magnitud de $G(s_1)$:

$$|G(s_1)| = \frac{750000}{\sqrt{((0.23)^2 + (1.04)^2)}} = \frac{750000}{1.068} = 446428.57 \quad (29)$$

- **Condición de magnitud:** Para que la magnitud del lazo abierto sea 1:

$$|C(s_1) \parallel G(s_1)| = 1. \rightarrow C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (30)$$

$$\sqrt{(Kp^2 + (0.19Ki)^2)} = \frac{1}{446429.57} = 2.24 \times 10^{-6} \quad (31)$$

- La condición de ángulo requiere que el ángulo del lazo abierto sea:

$$\angle C(s_1) + \angle G(s_1) = -180^\circ \quad (32)$$

- **Ángulo de $G(s_1)$** sustituyendo en $s_1 = -0.133 + j0.137$ es:

$$\angle G(s_1) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(G(s_1))}{\text{Re}(G(s_1))} \right) \rightarrow \angle G(s_1) = \tan^{-1} \left(\frac{0.3746}{1.6375} \right) \approx 12.96^\circ \rightarrow \quad (33)$$

$$\angle G(s_1) = 0^\circ - 12.96^\circ = -12.96^\circ$$

- **Ángulo de $C(s)$:** La función del controlador PI es:

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (34)$$

En $s1 = -0.133 + j0.137$ el ángulo es:

$$-91.65^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{Ki}{Kp} \right) = -180^\circ \rightarrow \tan^{-1} \left(\frac{Ki}{Kp} \right) = -88.35^\circ. \quad (35)$$

- **Cálculo del controlador:** Para cumplir con $\angle C(s1) + \angle G(s1) = -180^\circ$, resolvemos las ecuaciones para Kp y Ki , lo que da:

$$\frac{Ki}{Kp} = \tan(-88.35^\circ) = -28.64. \rightarrow Ki = -5.44Kp \quad (36)$$

Sustituimos Ki en la ecuación de magnitud:

$$Kp^2 + \left(\frac{-5.44Kp}{0.19} \right)^2 = 5.02 \times 10^{-12} \rightarrow Ki = 1.34 \times 10^{-6}, Kp = 2.47 \times 10^{-6}. \quad (37)$$

3.4 Arquitectura IoT

En la arquitectura de nuestro proyecto, interactúan tres componentes principales: el modelo matemático de la planta, el servicio web y el controlador local, todos comunicados a través del protocolo TCP/MQTT para asegurar una transmisión eficiente de datos en tiempo real. El servicio web alojado en una máquina virtual en AWS incluye el servidor MQTT y el programa de control remoto desarrollado en Node-RED.

Este componente centraliza la supervisión del sistema y coordina las comunicaciones entre los demás elementos. El modelo matemático de la planta, que emula la operación de una bomba ESP, está

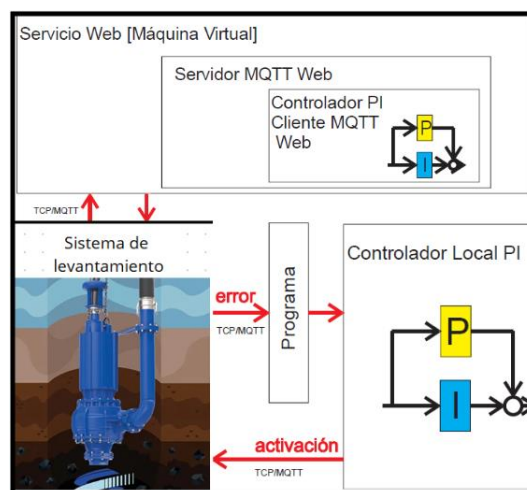
CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

implementado en Node-RED. Este modelo simula la presión (PIP), procesando las señales enviadas desde el servicio web o el controlador local. El controlador local, basado en un controlador PI diseñado y validado en MATLAB/Simulink, gestiona el control directo del sistema en caso de que el servicio web no esté disponible, garantizando la estabilidad y el desempeño del sistema. Este enfoque asegura un control eficiente y continuo, tanto de forma remota como local.

Figura

3

Arquitectura Implementada para el sistema



- Implementación en Node-RED

Se implementaron flujos en Node-RED para emular el comportamiento del modelo matemático de la planta y del controlador PI, utilizando MQTT como protocolo de intercambio de datos. El modelo matemático calcula la presión P_{ip} en función de la frecuencia ΔN , ajustada por el controlador, y publica los resultados en el tópico MQTT planta/pression. Por otro lado, el controlador PI determina el error entre el setpoint establecido y P_{ip} , generando una señal de control $u(t)$ que modifica ΔN y se envía al tópico control/frecuencia. Los nodos fueron configurados para garantizar una comunicación fluida mediante la publicación y suscripción de los datos necesarios.

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

Adicionalmente, se diseñaron paneles interactivos en Node-RED que permiten monitorear en tiempo real la evolución de Pip, ajustar el setpoint del sistema y analizar gráficos de tendencias. Esto facilita la evaluación del desempeño tanto del controlador PI como del sistema completo.

El sistema inicia su operación mediante un programa que asegura la ejecución periódica de las tareas a través de un temporizador. Este temporizador activa un nodo encargado de verificar el estado del servidor (Status Server), el cual determina si el controlador en la nube está disponible para gestionar el proceso. En caso de que el servidor esté activo, el sistema utiliza el Controlador Nube, el cual recibe las señales de error calculadas a partir de la diferencia entre el setpoint y la presión actual de la planta.

Este controlador procesa la información y envía las correcciones necesarias al modelo matemático del sistema. Este modelo simula dinámicamente el comportamiento de la planta, generando como salida los valores de presión ajustados en función de la frecuencia aplicada. Si el servidor no está disponible, el sistema transfiere automáticamente el control al Controlador Local. Este controlador opera directamente en el entorno local, calculando los ajustes necesarios de manera autónoma para mantener la continuidad del sistema. Este enfoque asegura la resiliencia del sistema, evitando interrupciones en caso de fallos en la conectividad con el servidor. El Modelo Matemático del sistema representa la planta en términos de su dinámica, procesando la señal de entrada generada por el controlador (ya sea el local o el de la nube) y produciendo los valores de salida correspondientes.

Estos resultados son enviados a un sistema de Visualización y Monitoreo, el cual utiliza dashboards interactivos implementados en Node-RED para mostrar en tiempo real el estado del sistema, incluyendo la presión, el error y las frecuencias aplicadas. Estos dashboards también permiten al usuario configurar y ajustar el setpoint del sistema según las necesidades operativas. Este enfoque combina redundancia mediante la coexistencia del controlador local y el controlador en la nube, simulación precisa del modelo matemático, y herramientas avanzadas de monitoreo y visualización en tiempo real. Además, el uso del

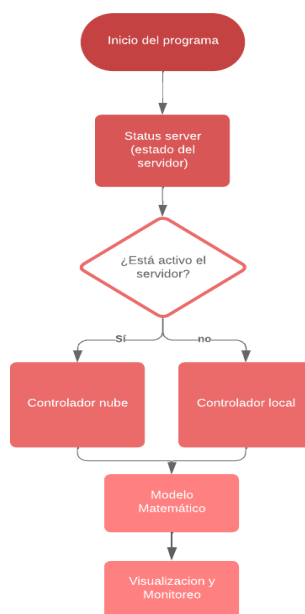
CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

protocolo MQTT asegura la comunicación eficiente y fiable entre los diferentes nodos del sistema, proporcionando un control robusto y una supervisión constante. (Figura 4).

Figura

4

Diagrama de flujo del proceso en Node-Red



- Comunicación mediante protocolo MQTT

El proceso comienza con la inicialización del programa, donde se habilitan tanto la planta local como la planta nube para garantizar la comunicación mediante el protocolo MQTT. En primer lugar, el sistema verifica si hay recepción de datos en ambos niveles (local y nube). Si no se reciben datos, se activa un temporizador (Timmer) que organiza la salida de información, estructurándola para su posterior envío a través de los nodos MQTT. En caso de que se detecten datos en la planta local, estos son procesados mediante el nodo MQTTBroker/entradaLocal, donde se organiza y guarda la información mediante la estructura de datos configurada.

Posteriormente, estos datos se reenvían a la nube utilizando el nodo MQTTBroker/entradaNube. De manera similar, si los datos son recibidos en la planta nube, estos se gestionan a través de los nodos

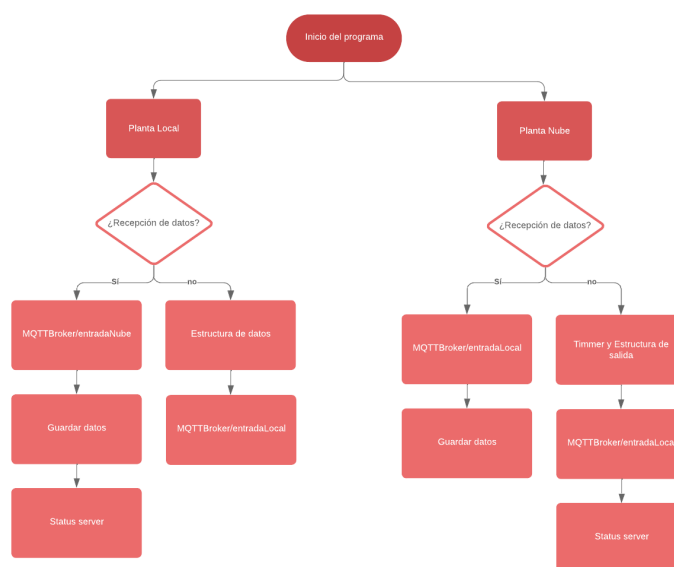
CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

correspondientes (MQTTBroker/entradaNube), estructurando y guardando la información para monitoreo o análisis. Este proceso asegura que tanto el estado de la planta local como de la planta nube se mantengan sincronizados y operativos. Finalmente, el estado del servidor (Status Server) se verifica constantemente en ambas plantas para asegurar que el sistema esté funcionando correctamente. Si en algún momento se detecta una falla en la comunicación o en el procesamiento de datos, se activan procesos de control alternativos para mantener la operación del sistema. (Figura 5)

Figura

5

Diagrama de flujo protocolo MQTT



- Monitoreo IoT

En el monitoreo IoT del sistema, se desarrolló un tablero interactivo en Node-RED que permite supervisar y controlar el funcionamiento del sistema en tiempo real. Este tablero cuenta con una gráfica de tendencia que muestra cómo evoluciona la presión de entrada al pozo (Pip) a lo largo del tiempo, junto con el setpoint definido por el usuario mediante un control deslizante. Además, incorpora un indicador visual para verificar el estado del servidor AWS y garantizar la conectividad del sistema. Los datos de presión actual son procesados y visualizados en la gráfica, facilitando el análisis del desempeño del controlador.

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

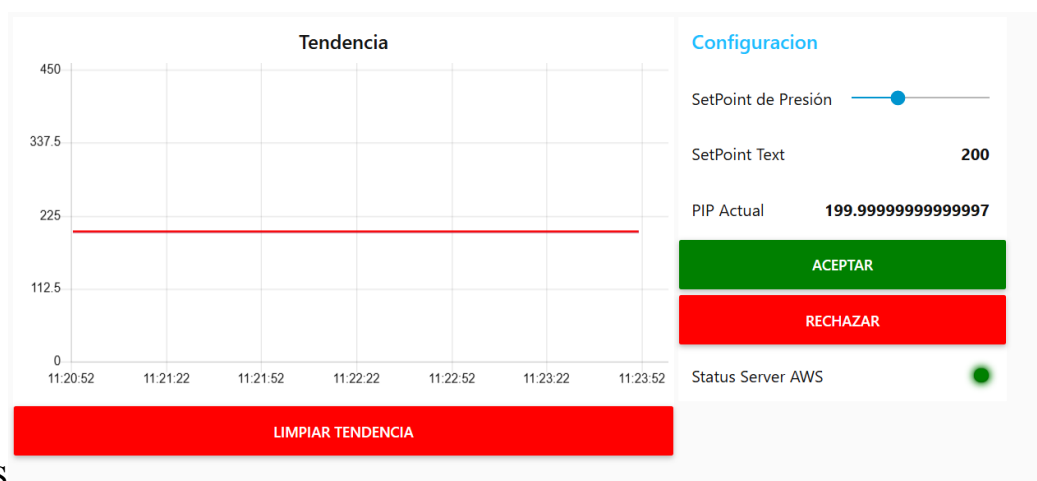
Los usuarios tienen la opción de aceptar o rechazar los valores configurados del setpoint, así como limpiar la gráfica para reiniciar el monitoreo.

La comunicación entre los nodos de presión y setpoint se realiza mediante el protocolo MQTT, asegurando una transmisión de datos dinámica y en tiempo real. Esta implementación garantiza una operación eficiente, proporcionando herramientas que permiten un control preciso y una supervisión integral del sistema. (Figura 6).

Figura

6

Tendencia de la presión Pip.



S

4. Análisis y resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto. Se realiza un análisis detallado del desempeño del sistema propuesto, evaluando su capacidad para cumplir con los objetivos establecidos inicialmente. Entre los resultados presentados se incluyen gráficos de desempeño del controlador PI, curvas de respuesta de presión frente a los cambios en el setpoint, análisis del comportamiento del sistema en escenarios de operación local y en la nube utilizando MQTT, así como la evaluación de los tiempos de respuesta y la estabilidad del sistema. Además, se discuten las implicaciones de estos hallazgos, destacando su relevancia para el rendimiento del sistema y su integración con

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

tecnologías IoT, enfatizando la importancia de los resultados obtenidos para validar la funcionalidad del sistema implementado.

- Comportamiento del modelo matemático:

El presente análisis tiene como objetivo evaluar el comportamiento dinámico de la planta simulada, basada en la función de transferencia desarrollada para el sistema de bombeo eléctrico sumergible (ESP). A través de simulaciones realizadas en MATLAB, se estudió la relación entre la presión de fondo de pozo (PIP) y la frecuencia de operación (f), considerando la relación teórica inversamente proporcional definida como:

$$PIP \propto \frac{1}{f^2} \quad (38)$$

El modelo matemático muestra que, a medida que la frecuencia aumenta, la presión de fondo disminuye de manera cuadrática. Esta relación puede explicarse físicamente por el aumento del flujo en el sistema, que reduce la presión acumulada en el pozo.

Tabla**2**

Valores Simulados de PIP para Diferentes Frecuencias.

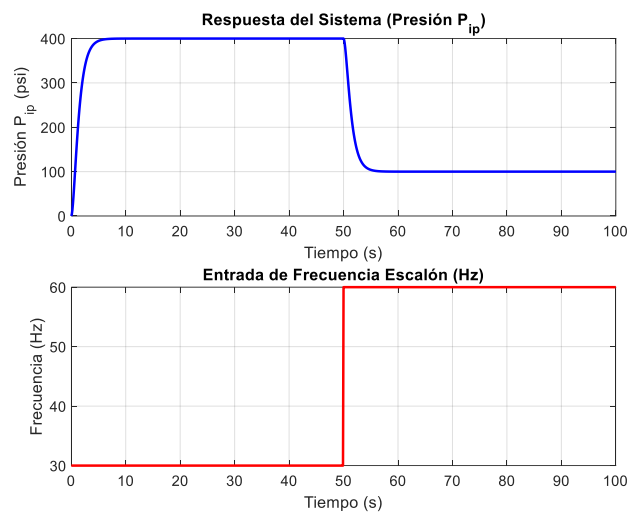
<i>Frecuencia(f) [Hz]</i>	<i>PIP [psi]</i>
30	400
40	225
50	160

Como se observa en la Tabla 2, la presión de fondo disminuye de forma significativa con el aumento de la frecuencia, siguiendo una tendencia consistente con el modelo teórico, el cual podemos mirar en la figura 7.

Figura

7

Comportamiento del modelo simulado en Matlab.



La planta se comportó de manera estable en todo el rango de frecuencias simuladas. Esto fue evidente en la ausencia de oscilaciones o inestabilidades en la respuesta de P_{ip} frente a las variaciones en f . El sistema reaccionó de manera eficiente, con tiempos de establecimiento cortos, lo que refuerza su viabilidad para aplicaciones prácticas.

El análisis específico de los extremos del rango de operación (frecuencias altas y bajas) revela conclusiones importantes:

Tabla**3***Impactos en Función de la Frecuencia*

<i>Condición</i>	<i>Característica Observa</i>	<i>Implicaciones Operativas</i>
<i>Frecuencias bajas($f < 40\text{Hz}$)</i>	<i>Alta presión(PIP)</i>	<i>Menor flujo; acumulación de presión.</i>
<i>Frecuencias altas($f > 50\text{Hz}$)</i>	<i>Baja presión(PIP)</i>	<i>Mayor flujo; riesgo de desgaste mecánico.</i>

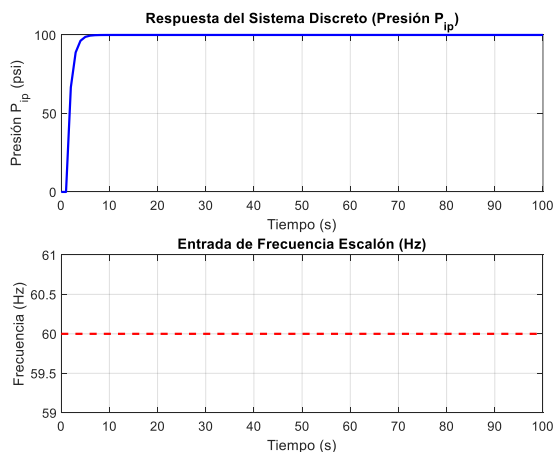
Los resultados se presentan en gráficos que ilustran cómo Pip varía en función del tiempo y la frecuencia. Estos gráficos ayudan a entender visualmente el comportamiento esperado del sistema y confirman la validez del modelo.

- Modelo discretizado

La simulación del modelo discreto del sistema ilustra el comportamiento dinámico de la presión (Pip) (en psi) frente al tiempo, bajo una entrada escalón de frecuencia constante a 60 Hz, con un período de muestreo de ($T_s = 1$) segundo. En el gráfico superior, se observa cómo (Pip) aumenta rápidamente desde un estado inicial de 0 hasta estabilizarse en un valor cercano a 100 psi, evidenciando un tiempo de respuesta inferior a 10 segundos. Este comportamiento refleja la relación inversamente proporcional entre (Pip) y (f^2), que es una característica fundamental del sistema.

Figura**8**

Modelo discretizado con $T=1s$.



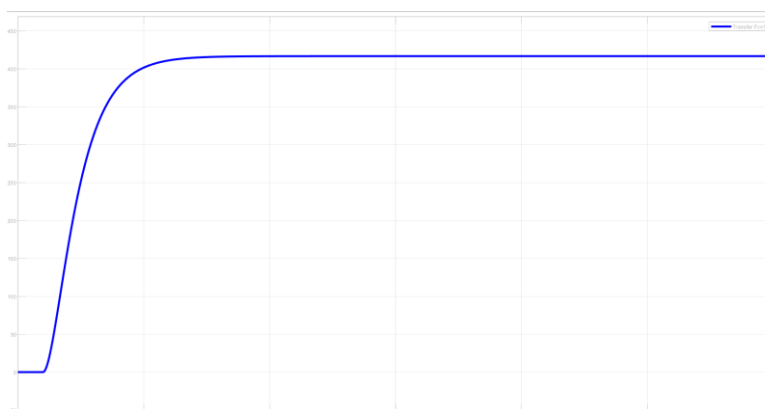
CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

En la figura 8, la entrada de frecuencia permanece constante en 60 Hz, confirmando que el sistema interpreta correctamente la señal de entrada y responde en consecuencia. La estabilidad alcanzada en (Pip) valida la precisión del modelo discreto y demuestra que el diseño del controlador cumple con las expectativas dinámicas. Este resultado reafirma la capacidad del sistema para operar en el dominio discreto, proporcionando una base sólida para su integración en el control de bombas ESP.

- Diseño del controlador

Figura**9**

Modelo en lazo cerrado



El diseño del controlador para nuestro sistema se llevó a cabo considerando los objetivos de control propuestos y el comportamiento de nuestro sistema en lazo abierto como podemos ver en la figura 9, la dinámica de la planta y las especificaciones deseadas para la respuesta del sistema. A partir del modelo matemático obtenido, se realizaron simulaciones para evaluar el desempeño de un controlador PID completo frente a un controlador PI. El controlador PI fue elegido después de un análisis exhaustivo por varias razones clave. En primer lugar, las simulaciones mostraron que el PI ofrece un comportamiento más estable y una respuesta más suave, como se evidencia en la figura 10, donde la presión Pip alcanza el setpoint con un tiempo de estabilización aceptable y sin presencia de sobreoscilaciones significativas.

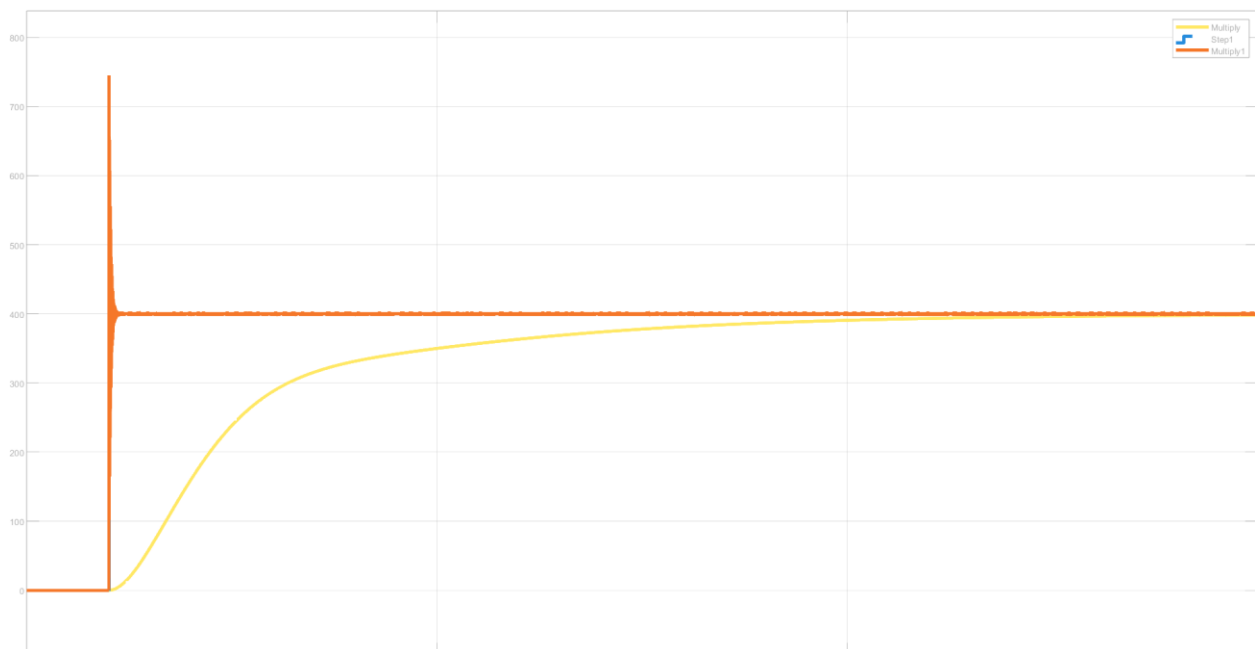
Esto contrasta con el comportamiento observado con el controlador PID, representado en la figura 10, en el cual se presentaron oscilaciones más pronunciadas antes de estabilizarse, lo que puede generar

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

desgaste en el sistema y dificultar el control preciso de la presión. Adicionalmente, al analizar las necesidades del sistema, se identificó que la acción derivativa, característica del PID, no aportaba beneficios significativos debido a la naturaleza de la dinámica de la planta. Por el contrario, esta contribuyó a la aparición de oscilaciones que complicaban el control. Por esta razón, se optó por simplificar el diseño mediante un PI, que proporcionó un equilibrio adecuado entre desempeño, robustez y simplicidad de implementación.

Figura**10**

Controlador PI y PID simulink.



En los resultados obtenidos, se comparan dos tiempos de muestreo: ($T_s = 0.1s$) y ($T_s = 1s$), como se muestra en la Tabla 4 y la Figura 11.

La Tabla 4 resume las diferencias principales. Con ($T_s = 0.1s$), el sistema tiene una salida estable, sigue el setpoint casi sin error, y el tiempo de respuesta es rápido. Además, el control es preciso y no hay distorsiones. Por otro lado, con ($T_s = 1s$), la salida presenta más oscilaciones y el control es menos eficiente,

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

con un error más grande y una respuesta más lenta. También aparecen distorsiones que no se ven con un muestreo más rápido.

En la Figura 11, las gráficas muestran claramente estas diferencias. Para ($T_s = 0.1s$), la salida de la planta llega al valor deseado rápidamente y el error desaparece en poco tiempo. En cambio, con ($T_s = 1s$), la respuesta es más inestable al principio, y el error toma más tiempo en estabilizarse, lo que confirma que un muestreo más lento afecta el control del sistema. Esto demuestra por qué es tan importante elegir bien el tiempo de muestreo en sistemas de control.

Tabla 4

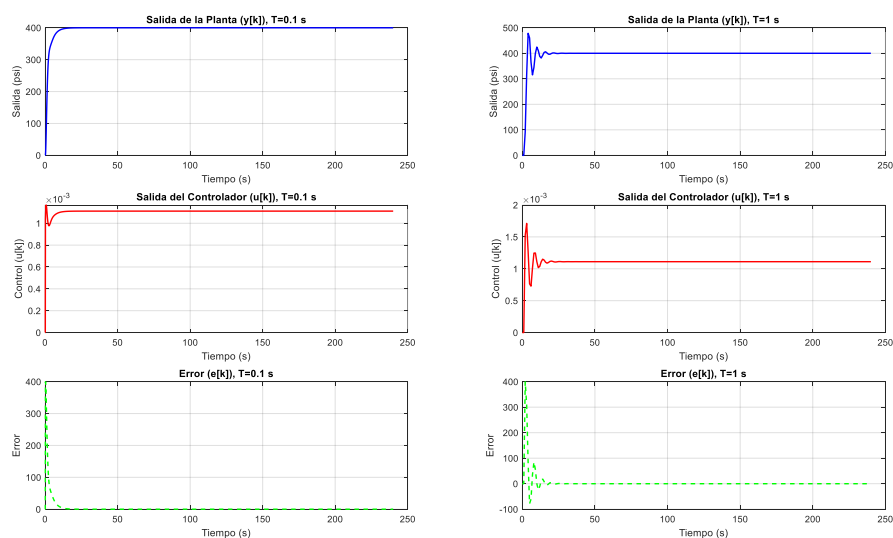
Comparación de los tiempos de muestreo.

Parámetro	$T_s = 0.1s$	$T_s = 1s$
Estabilidad de la salida	Alta: Respuesta suave y estable.	Baja: Respuesta distorsionada.
Seguimiento del setpoint	Excelente: Error insignificante	Moderado: Error más pronunciado
Tiempo de asentamiento	Corto.	Más largo debido a retrasos.
Eficiencia del control	Alta: Control preciso.	Baja: Control menos efectivo.
Distorsión en la señal	Ausente.	Presente, visible en la salida.

Figura

11

Comparación de los tiempos de muestreo.



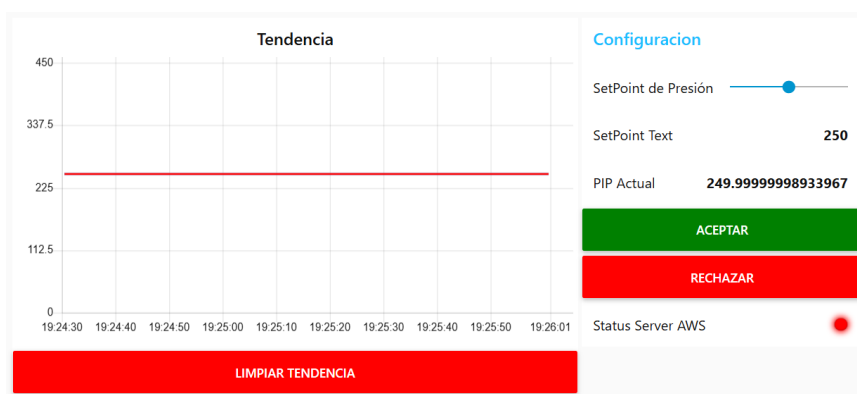
CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

- Monitoreo IoT

La implementación del sistema en Node-RED permitió simular el control y la operación de la planta de manera eficiente, utilizando la arquitectura IoT para comunicar el modelo matemático de la planta con el controlador PI y el servidor MQTT. El proceso consistió en establecer flujos de datos que representaran las variables críticas del sistema, como la presión P_{ip} , la frecuencia de la bomba N , el error $e[k]$ y la señal de control $u[k]$. Esto facilitó tanto el monitoreo como la intervención en tiempo real.

Figura**12**

Funcionamiento y monitoreo del cotrolador local.

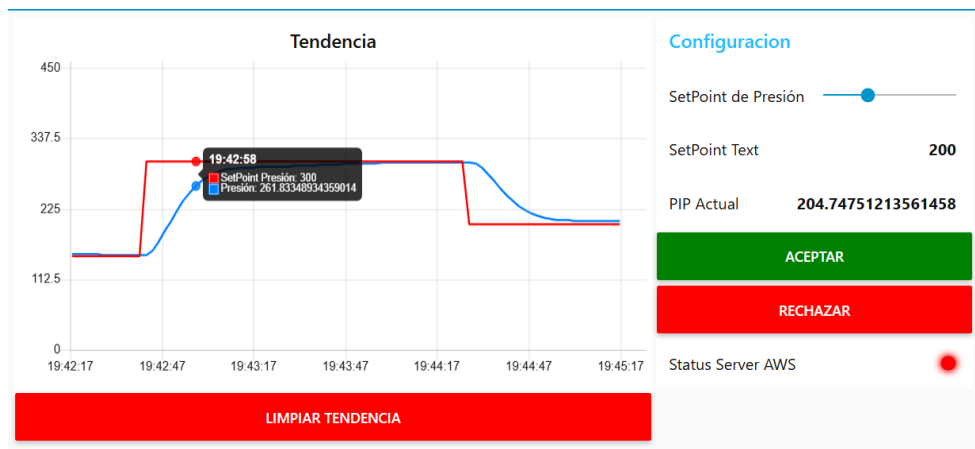


La figura 12 muestra el comportamiento de la planta y el controlador en modo local, donde el servidor en la nube está apagado. En este caso, el sistema mantiene el setpoint de presión configurado, reflejado en la gráfica como una línea horizontal estable. El estado del servidor local está activo, permitiendo la ejecución del control local sin interrupciones. Esta configuración asegura que el sistema puede funcionar de manera autónoma en caso de fallas en el servidor remoto.

Figura

13

Variaciones en el setpoint.

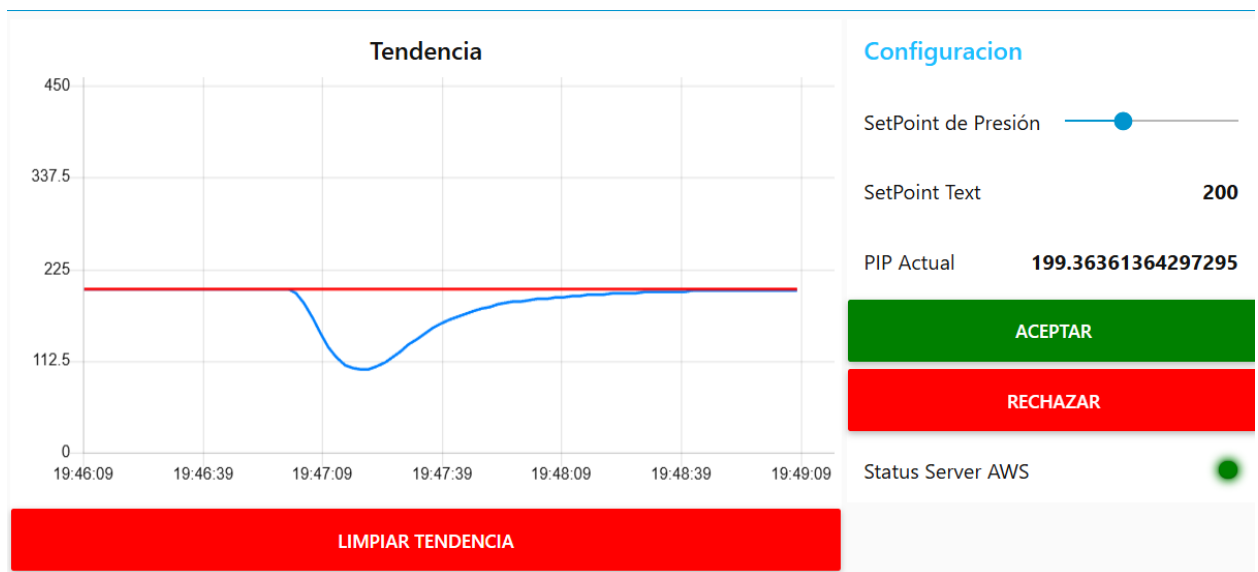


En esta gráfica (figura 13) se visualiza cómo el controlador responde a cambios de setpoint realizados desde la interfaz de monitoreo. El controlador ajusta rápidamente la salida de la planta para alcanzar los valores deseados. Este comportamiento demuestra la capacidad del sistema para adaptarse a variaciones dinámicas en las condiciones operativas y cumplir con los objetivos establecidos.

Figura

14

Alternancia entre control local y control de nube.

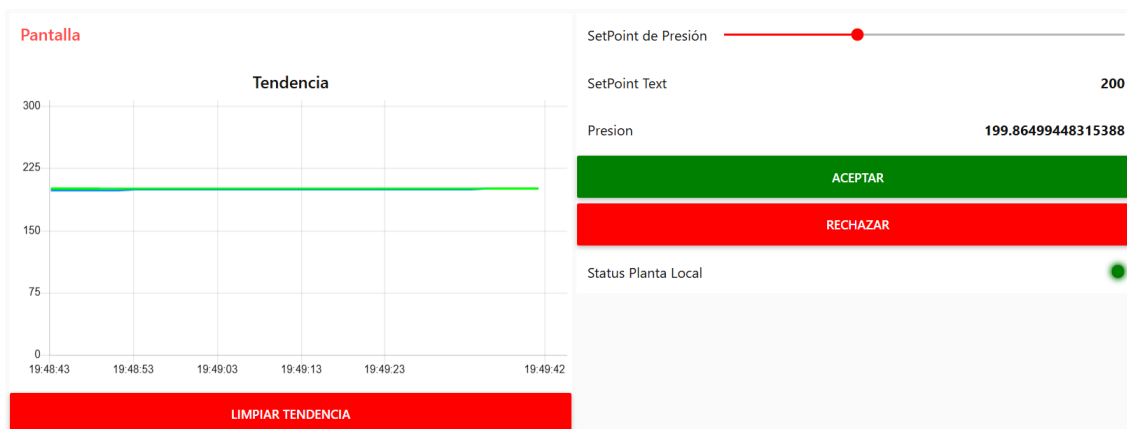


CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

En esta etapa, se muestra la activación del servidor remoto (indicada por el estado del "Status Server" en verde). A partir de este punto, el control pasa a ser gestionado por la nube, lo cual provoca un cambio en el comportamiento del sistema. La transición es evidente en la salida de la planta, donde se aprecia un ajuste temporal hasta que el controlador en la nube toma el control total de la operación.

Figura**15**

Interfaz del monitoreo de la nube.



Aquí se presenta la interfaz de monitoreo del sistema en la nube. Se puede observar en la figura 15 la estabilidad de la planta y la alineación con el setpoint configurado. Este diseño permite la supervisión y control remoto del sistema, asegurando que se mantengan las condiciones deseadas independientemente de la ubicación física del operador.

5. Conclusiones

- La implementación del sistema de control permitió combinar el monitoreo y la operación local con la gestión remota a través de un servidor en la nube. Esto demostró la capacidad del sistema para adaptarse a diferentes escenarios operativos, garantizando la continuidad de las operaciones ante posibles fallas en el servidor remoto.

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

- El controlador PI implementado mostró un desempeño adecuado para mantener la estabilidad del sistema y minimizar el error en la presión configurada como setpoint. A través de simulaciones y pruebas, se evidenció que este tipo de controlador es el más adecuado para el modelo del sistema, especialmente en términos de estabilidad y menor sobrepico, en comparación con el PID.
- Durante las simulaciones se observó que el tiempo de muestreo (T_s) juega un papel crucial en la precisión del sistema. A medida que se incrementa T_s , se introduce una mayor distorsión en la señal de salida, lo que afecta negativamente el desempeño del controlador. Esto resalta la importancia de seleccionar un tiempo de muestreo adecuado para garantizar un comportamiento óptimo.
- La utilización del protocolo MQTT para la comunicación entre los diferentes componentes del sistema (planta, controlador y servidor en la nube) fue esencial para garantizar una transmisión de datos confiable y eficiente. Este protocolo demostró ser robusto para aplicaciones en tiempo real, facilitando tanto la publicación como la suscripción de datos relevantes para el control y monitoreo.
- La implementación en Node-RED permitió una integración sencilla y eficiente de los flujos de datos, el diseño del controlador y las visualizaciones interactivas. La herramienta demostró ser adecuada para proyectos IoT, al proporcionar una interfaz visual intuitiva y flexibilidad en la programación.

6. Recomendaciones

- Implementar algoritmos de aprendizaje automático para ajustar automáticamente los parámetros del controlador (PI o PID) según las condiciones operativas de la planta, lo que podría mejorar la precisión y adaptabilidad del sistema.
- Explorar controladores más avanzados, como el control predictivo basado en modelos (MPC), para manejar mejor las no linealidades del sistema y los posibles retardos en la comunicación.
- Mejorar la interfaz de usuario en Node-RED, añadiendo visualizaciones más dinámicas, alertas automatizadas y la capacidad de descargar reportes históricos de los datos recolectados.

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

- Realizar pruebas en un entorno físico real (pozo de extracción con bomba ESP) para validar la funcionalidad y robustez del sistema bajo condiciones operativas reales.
- Investigar el impacto de diferentes tiempos de muestreo sobre el desempeño del controlador y encontrar un equilibrio óptimo entre precisión y uso de recursos.
- Diseñar el sistema para permitir la integración de múltiples plantas o dispositivos de control, utilizando un servidor centralizado para monitorear y gestionar varios sistemas simultáneamente.
- Añadir notificaciones por correo electrónico o mensajes de texto para alertar a los operadores sobre desviaciones significativas o fallas en el sistema.
- Optimizar el sistema para minimizar el consumo energético del controlador y la planta, logrando un diseño más sostenible y eficiente.

Referencias:

Agencia Internacional de Energía. (2023). World Energy Outlook 2023. Disponible en:
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

Amazon Web Services. (2024). IoT Solutions on AWS. Disponible en:
<https://aws.amazon.com/iot/>

Brown, K. E., & Lea, J. F. (1985). Artificial Lift: A Comprehensive Guide to Systems and Operations. Gulf Publishing Company. Recuperado de:
https://oilproduction.net/files/Petrogroup_Bombeo%20Electrosumergible.pdf

Equipos Industriales HAB. (s.f.). Guía de instalación bombas sumergibles. Recuperado de
<https://equiposindustrialeshab.com/blogs/noticias/guia-de-instalacion-bombas-sumergibles>

Li, H., Zhao, L., & Liu, X. (2019). Dynamic analysis and performance optimization of electric submersible pumps. Journal of Petroleum Science and Engineering, 173, 615-623.
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.021>

MathWorks. (2023). Simulink Overview. Recuperado de:
<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>

Molina, G. (n.d.). Características de la realimentación. En Dinámica de Sistemas Físicos y Control. Recuperado el [fecha de consulta], de
https://gonmolina.github.io/DSFyC_book/sources/notebooks_sources/modulo3/realimentacion/carateristicas%20de%20la%20realimentacion.html

MQTT Organization. (2023). MQTT Overview. Disponible en: <https://mqtt.org/>

CONTROL Y MONITOREO IoT DE SISTEMAS CON BOMBAS ESP

Node-RED Organization. (2023). Node-RED Guide. Recuperado de: <https://nodered.org/>

Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering (5.^a ed.). Prentice Hall. Recuperado de:
<https://archive.org/details/ModernControlEngineeringOgata>

Schlumberger. (2022). Artificial Lift Solutions for Oil Wells. Disponible en:
<https://www.slb.com/artificial-lift>

Apéndices

Apéndice A: Repositorio en GitHub

Se ha establecido un repositorio en GitHub con el propósito de facilitar el acceso académico y fomentar la colaboración en el desarrollo del proyecto. Este repositorio incluye todos los archivos relacionados, como los códigos utilizados para el diseño del controlador PI, las simulaciones en MATLAB, la implementación del modelo matemático de la planta y controlador en Node-RED.