

# Pregrado

**Carrera:** Petróleos

**Asignatura (UIC):**

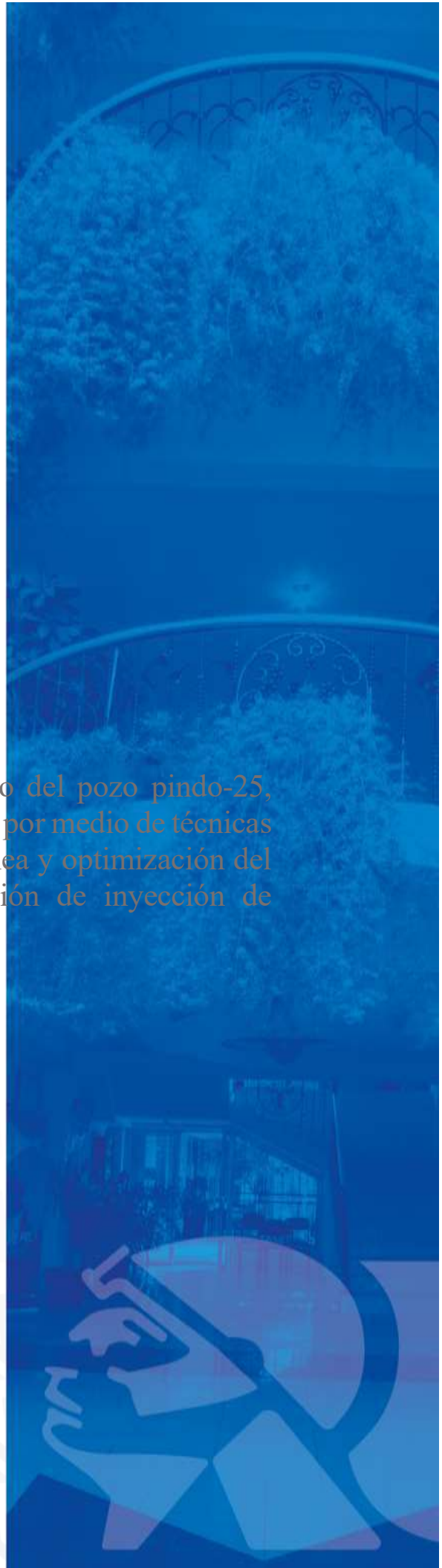
**Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título en:** Tecnólogo superior en petróleos

**Tema:** Optimización del sistema operativo y productivo del pozo pindo-25, campo Palanda, bloque 64 por disminución de producción por medio de técnicas de implementación de un sistema de calentamiento en línea y optimización del sistema de bombeo electro-sumergible e implementación de inyección de químicos para el año 2025

**Autor/s:**

**Tutor:** Ing. Luis Álvarez

**Fecha:** 19 de marzo de 2025



**Autor:**



**Felimon Francisco Vargas Alvarado**

**Título a obtener:** Tecnólogo superior en petróleos

**Matriz:** Sangolquí -Ecuador

**Correo electrónico:** felimon.vargas@ister.edu.ec

**Autor:**



**Flavio Marcelo Nantip Shirap**

**Título a obtener:** Tecnólogo superior en petróleos

**Matriz:** Sangolquí -Ecuador

**Correo electrónico:** flavio.nantip@ister.edu.ec

**Autor:**



**Jonathan Patricio Shingle Loor**

**Título a obtener:** Tecnólogo superior en petróleos

**Matriz:** Sangolquí -Ecuador

**Correo electrónico:** jonathan.shingle@ister.edu.ec

**Dirigido por:**



**Alvarez Lazo Luis Alfredo**

**Título:** Ingeniero

**Matriz:** Sangolquí -Ecuador

**Correo electrónico:** luis.alvarez@ister.edu.ec

**Todos los derechos reservados.**

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

©2024 Tecnológico Universitario

Rumiñahui SANGOLQUÍ – ECUADOR

**Felimon Francisco Vargas Alvarado**  
**Flavio Marcelo Nantip Shirap**  
**Jonathan Patricio Shingle Loor**

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO Y PRODUCTIVO DEL POZO PINDO 25  
CAMPO PALANDA, BLOQUE 64 POR DISMINUCIÓN DE PRODUCCIÓN POR MEDIO  
DE TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO EN  
LÍNEA Y LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE  
E IMPLEMENTACIÓN DE INYECCIÓN DE QUÍMICOS PARA EL AÑO 2025**

# **CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**CT-ANX-2025-ISTER-2-2.2**

Sangolquí, 19 de marzo del 2025

**MSc. Elizabeth Ordoñez**  
**DIRECTORA DE DOCENCIA**

**Ing. Luis Alfredo Álvarez**  
**COORDINADOR DE TITULACIÓN**  
**INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE**  
**UNIVERSITARIO**

**Presente**

Por medio de la presente, yo, SHINGLE LOOR JONATHAN PATRICIO declaro y acepto en forma expresa lo siguiente: Ser autor del trabajo de titulación denominado OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO Y PRODUCTIVO DEL POZO PINDO 25 CAMPO PALANDA, BLOQUE 64 POR DISMINUCIÓN DE PRODUCCIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO EN LÍNEA Y LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE E IMPLEMENTACIÓN DE INYECCIÓN DE QUÍMICOS PARA EL AÑO 2025, de la Tecnología Superior en Petróleos; y a su vez manifiesto mi voluntad de ceder al Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui con condición de Universitario los derechos de reproducción, distribución y publicación de dicho trabajo de titulación, en cualquier formato y medio, con fines académicos y de investigación.

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

En fe de lo cual, firmo la presente.

Atentamente,



SHINGLE LOOR JONATHAN PATRICIO  
C.I.: 2200405849

# **CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**CT-ANX-2025-ISTER-2-2.2**

Sangolquí, 19 de marzo del 2025

**MSc. Elizabeth Ordoñez**  
**DIRECTORA DE DOCENCIA**

**Ing. Luis Alfredo Álvarez**  
**COORDINADOR DE TITULACIÓN**  
**INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE**  
**UNIVERSITARIO**

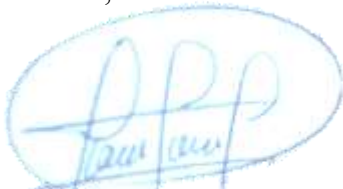
**Presente**

Por medio de la presente, yo, FELIMON FRANCISCO VARGAS ALVARADO declaro y acepto en forma expresa lo siguiente: Ser autor del trabajo de titulación denominado OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO Y PRODUCTIVO DEL POZO PINDO 25 CAMPO PALANDA, BLOQUE 64 POR DISMINUCIÓN DE PRODUCCIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO EN LÍNEA Y LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE E IMPLEMENTACIÓN DE INYECCIÓN DE QUÍMICOS PARA EL AÑO 2025, de la Tecnología Superior en Petróleos; y a su vez manifiesto mi voluntad de ceder al Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui con condición de Universitario los derechos de reproducción, distribución y publicación de dicho trabajo de titulación, en cualquier formato y medio, con fines académicos y de investigación.

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

En fe de lo cual, firmo la presente.

Atentamente,



**FELIMON FRANCISCO VARGAS ALVARADO**  
**C.I.: 2100701917**

# **CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**CT-ANX-2025-ISTER-2-2.2**

Sangolquí, 19 de marzo del 2025

**MSc. Elizabeth Ordoñez**  
**DIRECTORA DE DOCENCIA**

**Ing. Luis Alfredo Álvarez**  
**COORDINADOR DE TITULACIÓN**  
**INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE**  
**UNIVERSITARIO**

**Presente**

Por medio de la presente, yo, NANTIP SHIRAP FLAVIO MARCELO declaro y acepto en forma expresa lo siguiente: Ser autor del trabajo de titulación denominado OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO Y PRODUCTIVO DEL POZO PINDO 25 CAMPO PALANDA, BLOQUE 64 POR DISMINUCIÓN DE PRODUCCIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO EN LÍNEA Y LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE E IMPLEMENTACIÓN DE INYECCIÓN DE QUÍMICOS PARA EL AÑO 2025, de la Tecnología Superior en Petróleos; y a su vez manifiesto mi voluntad de ceder al Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui con condición de Universitario los derechos de reproducción, distribución y publicación de dicho trabajo de titulación, en cualquier formato y medio, con fines académicos y de investigación.

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

En fe de lo cual, firmo la presente.

Atentamente,

  
NANTIP SHIRAP FLAVIO MARCELO  
C.I.: 1500670029

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

**CT-ANX-2025-ISTER-3**

**CARRERA:**

TECNOLOGÍA EN PETRÓLEOS

**AUTOR /ES:**

FELIMON FRANCISCO VARGAS ALVARADO  
FLAVIO MARCELO NANTIP SHIRAP  
JONATHAN PATRICIO SHINGLE LOOR

**TUTOR (METODOLÓGICO Y ACADÉMICO):**

Ing. LUIS ALFREDO ALVAREZ

**CONTACTO ESTUDIANTE:**

0980289031 / 0988383983 / 0962304307

**CORREO ELECTRÓNICO:**

[felimon.vargas@ister.edu.ec](mailto:felimon.vargas@ister.edu.ec)  
[flavio.nantip@ister.edu.ec](mailto:flavio.nantip@ister.edu.ec)  
[jonathan.shingle@ister.edu.ec](mailto:jonathan.shingle@ister.edu.ec)

**TEMA:**

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO Y PRODUCTIVO DEL POZO PINDO 25 CAMPO PALANDA, BLOQUE 64 POR DISMINUCIÓN DE PRODUCCIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO EN LÍNEA Y LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE E IMPLEMENTACIÓN DE INYECCIÓN DE QUÍMICOS PARA EL AÑO 2025

**OPCIÓN DE TITULACIÓN:**

UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR: TRABAJO DE TITULACIÓN

**Resumen:**

El presente proyecto tiene como objetivo la optimización del sistema operativo y productivo del pozo pindo-25, ubicado en el campo Palanda, bloque 64, mediante dos propuestas, la implementación de un sistema de calentamiento en línea (HIT) y la optimización del sistema de bombeo electrosumergible (BES) e inyección de químicos en el pozo, el alcance del proyecto abarca desde el diagnóstico de la problemática actual, caracterizada por una disminución significativa en la

producción debido a la alta viscosidad del crudo, la deficiencia de calor y la ineficiencia del sistema de bombeo, hasta el diseño e implementación de soluciones técnicas que permiten mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad del pozo, los resultados obtenidos evidencian un incremento en la producción diaria de 90 a 180 barriles por día (BPD), una reducción del 46% en los costos operativos, así como una disminución del 83% en el tiempo de inactividad; además, se logró una mejora en la eficiencia del BES del 50% al 85%, optimizando el consumo energético y reduciendo la frecuencia de fallos mecánicos. estos resultados demuestran la efectividad de las estrategias implementadas, permitiendo superar la problemática inicial y estableciendo un modelo de operación eficiente, seguro y rentable para la industria petrolera en Ecuador.

**Palabras claves:**

Optimización de producción, Bombeo electro-sumergible (BES), Calentamiento en línea (HIT), Crudo pesado, Pozo Pindo-25, Levantamiento artificial, Eficiencia operativa, Inyección de químicos

**Abstract:**

The present project aims to optimize the operational and production system of Pindo-25 well, located in Palanda Field, Block 64, through two proposals: the implementation of an in-line heating system (HIT) and the optimization of the electro-submersible pumping system (BES) with chemical injection in the well. The scope of the project covers the diagnosis of the current issues, characterized by a significant decrease in production due to the high viscosity of the crude oil, insufficient heat, and inefficiencies in the pumping system, up to the design and implementation of technical solutions that improve operational efficiency and well sustainability.

The results obtained show an increase in daily production from 90 to 180 barrels per day (BPD), a 46% reduction in operating costs, and an 83% decrease in downtime. Additionally, the efficiency of



the BES improved from 50% to 85%, optimizing energy consumption and reducing the frequency of mechanical failures. These results demonstrate the effectiveness of the implemented strategies, allowing the initial challenges to be overcome and establishing an efficient, safe, and profitable operating model for the oil industry in Ecuador.

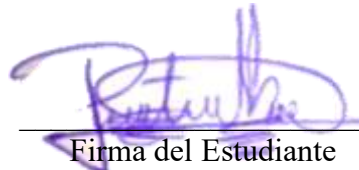
**Keywords:**

Production optimization, Electro-submersible pumping (BES), In-line heating (HIT), Heavy crude oil, Pindo-25 well, Artificial lift, Operational efficiency, Chemical injection



---

Firma del Estudiante  
Nantip Shirap Flavio Marcelo  
C.I. : 1500670029



---

Firma del Estudiante  
Shingle Loor Jonathan Patricio  
C.I. : 2200405849



---

Firma del Estudiante  
Felimon Francisco Vargas Alvarado  
C.I.: 2100701917

# **SOLICITUD DE PUBLICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**CT-ANX-2025-ISTER-4**

Sangolquí, 19 de marzo del 2025

**Sres.-**

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

**Presente**

Yo, NANTIP SHIRAP FLAVIO MARCELO con C.I.: 1500670029 alumno de la Carrera de TECNOLOGÍA EN PETRÓLEOS, cedo al INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE UNIVERSITARIO, los derechos de publicaciones del presente trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional para hacer uso de todos los contenidos con fines estrictamente académico o de investigación.

Atentamente,



---

Firma del Estudiante  
Nantip Shirap Flavio Marcelo  
C.I.: 1500670029

# **SOLICITUD DE PUBLICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**CT-ANX-2025-ISTER-4**

Sangolquí, 19 de marzo del 2025

**Sres.-**

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

**Presente**

Yo, FELIMON FRANCISCO VARGAS ALVARADO con C.I.: 2100701917 alumno de la Carrera de TECNOLOGÍA EN PETRÓLEOS, cedo al INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE UNIVERSITARIO, los derechos de publicaciones del presente trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional para hacer uso de todos los contenidos con fines estrictamente académico o de investigación.

Atentamente,



---

Firma del Estudiante

Felimon Francisco Vargas Alvarado

C.I.: 2100701917

# **SOLICITUD DE PUBLICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**CT-ANX-2025-ISTER-4**

Sangolquí, 19 de marzo del 2025

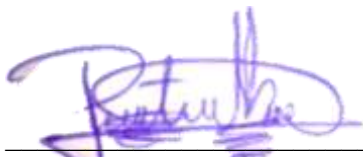
**Sres.-**

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

**Presente**

Yo, SHINGLE LOOR JONATHAN PATRICIO con C.I.: 2200405849 alumno de la Carrera de TECNOLOGÍA EN PETRÓLEOS, cedo al INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE UNIVERSITARIO, los derechos de publicaciones del presente trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional para hacer uso de todos los contenidos con fines estrictamente académico o de investigación.

Atentamente,



---

Firma del Estudiante  
Shingle Loor Jonathan Patricio  
C.I.: 2200405849

### **Dedicatoria:**

Este trabajo es el reflejo del esfuerzo, compromiso y dedicación de un equipo que compartió un mismo objetivo: aportar al desarrollo del sector petrolero con soluciones innovadoras y eficientes.

Dedicamos este proyecto a nuestras familias, quienes con su apoyo incondicional nos impulsaron a seguir adelante en cada etapa del camino; a nuestros profesores y mentores, por guiarnos con su conocimiento y experiencia, y por enseñarnos que la perseverancia y la disciplina son claves para el éxito. A nuestros compañeros de estudio, por las largas horas de trabajo en equipo, por las ideas compartidas y los desafíos superados juntos, este logro es el resultado de nuestra unión, confianza y esfuerzo colectivo.

Finalmente, dedicamos este trabajo a todas aquellas personas que creen en la educación como motor de cambio y crecimiento; que este proyecto inspire a futuras generaciones a seguir explorando, innovando y aportando al desarrollo de la industria.

### **Agradecimientos:**

Al culminar este proyecto, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible su desarrollo y conclusión.

En primer lugar, agradecemos al Ing. Luis Álvarez, nuestro tutor, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso durante todo el proceso, su conocimiento y experiencia fueron fundamentales para guiarnos en la elaboración de este trabajo, ayudándonos a superar los desafíos con profesionalismo y dedicación.

Extendemos nuestro agradecimiento al Tecnológico Universitario Rumiñahui y a todos los docentes que, a lo largo de nuestra formación, nos brindaron las herramientas y conocimientos necesarios para afrontar este reto con confianza.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, por ser nuestro pilar en los momentos de mayor esfuerzo y por motivarnos a seguir adelante con determinación, sin su respaldo, este logro no hubiera sido posible.

Finalmente, agradecemos a nuestros compañeros de equipo, por la colaboración, el compromiso y el esfuerzo compartido; cada idea, cada discusión y cada hora de trabajo invertida hicieron de este proyecto una experiencia enriquecedora y un aprendizaje invaluable.

A todos ustedes, ¡gracias!

## **Resumen:**

El presente proyecto tiene como objetivo la optimización del sistema operativo y productivo del pozo pindo-25, ubicado en el campo Palanda, bloque 64, mediante dos propuestas, la implementación de un sistema de calentamiento en línea (HIT) y la optimización del sistema de bombeo electro-sumergible (BES) e inyección de químicos en el pozo, el alcance del proyecto abarca desde el diagnóstico de la problemática actual, caracterizada por una disminución significativa en la producción debido a la alta viscosidad del crudo, la deficiencia de calor y la ineficiencia del sistema de bombeo, hasta el diseño e implementación de soluciones técnicas que permiten mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad del pozo, los resultados obtenidos evidencian un incremento en la producción diaria de 90 a 180 barriles por día (BPD), una reducción del 46% en los costos operativos, así como una disminución del 83% en el tiempo de inactividad; además, se logró una mejora en la eficiencia del BES del 50% al 85%, optimizando el consumo energético y reduciendo la frecuencia de fallos mecánicos. estos resultados demuestran la efectividad de las estrategias implementadas, permitiendo superar la problemática inicial y estableciendo un modelo de operación eficiente, seguro y rentable para la industria petrolera en Ecuador.

## **Palabras claves:**

Optimización de producción, Bombeo electro-sumergible (BES), Calentamiento en línea (HIT), Crudo pesado, Pozo Pindo-25, Levantamiento artificial, Eficiencia operativa, Inyección de químicos

## **Abstract:**

The present project aims to optimize the operational and production system of Pindo-25 well, located in Palanda Field, Block 64, through two proposals: the implementation of an in-line heating system (HIT) and the optimization of the electro-submersible pumping system (BES) with chemical injection in the well. The scope of the project covers the diagnosis of the current issues, characterized by a significant decrease in production due to the high viscosity of the crude oil, insufficient heat, and inefficiencies in the pumping system, up to the design and implementation of technical solutions that improve operational efficiency and well sustainability.

The results obtained show an increase in daily production from 90 to 180 barrels per day (BPD), a 46% reduction in operating costs, and an 83% decrease in downtime. Additionally, the efficiency of the BES improved from 50% to 85%, optimizing energy consumption and reducing the frequency of mechanical failures. These results demonstrate the effectiveness of the implemented strategies, allowing the initial challenges to be overcome and establishing an efficient, safe, and profitable operating model for the oil industry in Ecuador.

**Keywords:**

Production optimization, Electro-submersible pumping (BES), In-line heating (HIT), Heavy crude oil, Pindo-25 well, Artificial lift, Operational efficiency, Chemical injection



## Índice de contenido:

|                                                              |             |
|--------------------------------------------------------------|-------------|
| 1 .....                                                      | CAPITULO I  |
| .....                                                        | 13          |
| 1. Introducción .....                                        | 13          |
| 1.1. Planteamiento del problema .....                        | 13          |
| 1.2. Causas del problema .....                               | 1           |
| 1.3. Consecuencias del problema .....                        | 7           |
| 1.4. Justificación .....                                     | 9           |
| 2. Alcance .....                                             | 19          |
| 2.1. ¿Qué se va a hacer? .....                               | 19          |
| 2.2. ¿Cómo se va a hacer? .....                              | 25          |
| 2.3. ¿Cuándo se hará? .....                                  | 26          |
| 2.4. ¿Dónde se aplicará? .....                               | 26          |
| 2.5. ¿Por qué se hace? .....                                 | 27          |
| 2.6. ¿Para qué se hace? .....                                | 30          |
| 2.7. ¿Qué no se va a hacer? (exclusiones del proyecto) ..... | 30          |
| 2.8. Supuestos y consideraciones .....                       | 30          |
| 3. Objetivos: general y específicos .....                    | 31          |
| 3.1. Objetivo general .....                                  | 31          |
| 3.2. Objetivos específicos .....                             | 31          |
| 2 .....                                                      | CAPITULO II |
| .....                                                        | 36          |

|      |                                                                                                                                                           |     |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.   | Marco teórico .....                                                                                                                                       | 36  |
| 1.1. | Antecedentes .....                                                                                                                                        | 36  |
| 3    | .....CAPITULO III                                                                                                                                         |     |
|      | .....                                                                                                                                                     | 46  |
| 1.   | Diseño e implementación .....                                                                                                                             | 46  |
| 1.1. | Revisión del proceso actual y análisis detallado del pozo Pindo-25 .....                                                                                  | 46  |
| 1.2. | Diseño .....                                                                                                                                              | 52  |
| 1.3. | Implementación .....                                                                                                                                      | 86  |
| 4    | .....CAPITULO IV                                                                                                                                          |     |
|      | .....                                                                                                                                                     | 103 |
| 1.   | Pruebas y puesta en marcha de las propuestas, sistemas de calentamiento en línea (HIT) y de bombeo electrosumergible (BES) con inyección de químicos..... | 103 |
| 1.1. | Puesta en marcha y pruebas del sistema de calentamiento en línea (HIT) .....                                                                              | 103 |
| 1.2. | Puesta en marcha y pruebas del sistema de bombeo electrosumergible (BES) con inyección de químicos .....                                                  | 108 |
| 2.   | Análisis de resultados .....                                                                                                                              | 115 |
| 2.1. | Propuesta 1: Eficiencia térmica del sistema de calentamiento en línea (HIT)....                                                                           | 115 |
| 2.2. | Propuesta 2: Eficiencia del sistema de bombeo (bes) e inyección de químicos .                                                                             | 116 |
| 2.3. | Incremento del caudal de producción .....                                                                                                                 | 117 |
| 2.4. | Optimización del consumo energético.....                                                                                                                  | 118 |
| 2.5. | Reducción de fallas mecánicas.....                                                                                                                        | 119 |
| 2.6. | Análisis de la presión operativa.....                                                                                                                     | 120 |

|      |                                                 |     |
|------|-------------------------------------------------|-----|
| 3.   | Análisis de sensibilidad .....                  | 121 |
| 3.1. | Metodología del análisis de sensibilidad .....  | 121 |
| 3.2. | Resultados del análisis de sensibilidad .....   | 122 |
| 3.3. | Análisis de escenarios .....                    | 123 |
| 3.4. | Comparación global de escenarios .....          | 126 |
| 3.5. | Conclusiones del análisis de sensibilidad ..... | 127 |
| 5    | .....CAPITULO V                                 |     |
|      | .....                                           | 128 |
| 1.   | Conclusiones y recomendaciones.....             | 128 |
| 1.1. | Conclusiones .....                              | 128 |
| 1.2. | Recomendaciones .....                           | 129 |
| 1.3. | Consideraciones finales .....                   | 131 |
| 6    | .....BIBLIOGRAFÍA                               |     |
|      | .....                                           | 132 |

## Índice de tablas

|          |                                                                             |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. | Impacto del BSW en la producción.....                                       | 4  |
| Tabla 2. | Comparación del rendimiento del BES antes y después de la optimización..... | 13 |
| Tabla 3. | Materiales utilizados en la implementación del sistema HIT .....            | 19 |
| Tabla 4. | Elementos de automatización .....                                           | 21 |
| Tabla 5. | Herramientas y equipos de instalación .....                                 | 22 |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 6. Herramientas y equipos de instalación del BES e inyección de químicos ..... | 23  |
| Tabla 7. Etapas de instalación del BES.....                                          | 26  |
| Tabla 8. Comparativo del impacto económico.....                                      | 28  |
| Tabla 9. Contribución del sector petrolero al PIB Nacional al 2022 .....             | 37  |
| Tabla 10. Cumplimiento normativo del pozo Pindo-25.....                              | 45  |
| Tabla 11. Indicadores de optimización del pozo Pindo-25 .....                        | 46  |
| Tabla 12. Estado actual de los equipos .....                                         | 47  |
| Tabla 13. Relación gas-liquido vs temperatura .....                                  | 57  |
| Tabla 14. Presión de saturación del pozo.....                                        | 57  |
| Tabla 15: Resultados Comparativos Antes y Después de la Optimización .....           | 114 |
| Tabla 16. Resultados comparativos de los escenarios .....                            | 122 |

## Índice de figuras

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Relación entre viscosidad y temperatura del crudo .....                            | 3  |
| Figura 2. Acumulación de asfaltenos y parafinas en la tubería.....                           | 6  |
| Figura 3. Diagrama de Ishikawa, principales consecuencias operacionales y del yacimiento ... | 9  |
| Figura 4. Efecto del HIT en la viscosidad del crudo .....                                    | 11 |
| Figura 5. Impacto del sistema HIT en la producción del crudo .....                           | 14 |
| Figura 6. Impacto de la optimización del BES en la producción del crudo.....                 | 16 |
| Figura 7. Mapa del bloque 64.....                                                            | 36 |
| Figura 8. Variación de viscosidad y densidad con la temperatura .....                        | 59 |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 9. Variación de la movilidad con la temperatura .....                   | 59  |
| Figura 10. Diagrama de flujo de proceso .....                                  | 65  |
| Figura 11. Plano de instalación mecánica .....                                 | 65  |
| Figura 12. Diagrama unifilar eléctrico .....                                   | 66  |
| Figura 13. Diagrama del sistema de inyección de calor HIT .....                | 70  |
| Figura 14. Interpretación del análisis nodal .....                             | 74  |
| Figura 15. Impacto de la selección de equipos en la optimización del BES ..... | 82  |
| Figura 16. P&ID BES .....                                                      | 83  |
| Figura 17. Diagrama unifilar eléctrico BES .....                               | 84  |
| Figura 18. Planos de instalación BES .....                                     | 85  |
| Figura 19. Temperatura final del crudo (antes vs después).....                 | 116 |
| Figura 20. Eficiencia de bombeo (antes vs después) .....                       | 117 |
| Figura 21. Caudal de producción (antes vs después).....                        | 118 |
| Figura 22. Consumo de energía (antes vs después) .....                         | 119 |
| Figura 23. Fallas detectadas (antes vs después) .....                          | 120 |
| Figura 24. Presión operativa (antes vs después).....                           | 121 |
| Figura 25. Análisis de sensibilidad: caudal de producción .....                | 124 |
| Figura 26. Análisis de sensibilidad: eficiencia de bombeo .....                | 125 |
| Figura 27. Análisis de sensibilidad: consumo energético .....                  | 126 |
| Figura 28. Comparación global de escenarios.....                               | 127 |

# **CAPITULO I**

## **1. Introducción**

### **1.1. Planteamiento del problema**

La producción de hidrocarburos en Ecuador representa una actividad de alto impacto económico, siendo un sector clave para la generación de ingresos nacionales y el abastecimiento energético, dentro de este contexto, el Pozo Pindo-25, ubicado en la Plataforma Sami Sur, Campo Palanda, Bloque 64, ha enfrentado serios problemas de disminución de producción, lo que afecta la rentabilidad de las operaciones y pone en riesgo su viabilidad.

Este pozo, diseñado para producir 250 barriles diarios (BPD), actualmente extrae solo 90 BPD, lo que equivale a una reducción del 64% en su capacidad productiva, esta caída no es un evento aislado, sino el resultado de múltiples factores interrelacionados que han limitado la eficiencia del proceso de extracción y tratamiento del crudo.

El crudo producido en el Pozo Pindo-25 es pesado y altamente viscoso, lo que dificulta su transporte a través de las líneas de producción; además, la presencia de grandes cantidades de agua y sedimentos (BSW entre 20% y 30%) obliga a procesos adicionales de separación antes de que el crudo pueda ser tratado o comercializado, sumado a esto, la ausencia de tecnologías adecuadas para reducir la viscosidad del crudo y optimizar la separación de impurezas ha generado una disminución progresiva en la producción, con costos operativos en aumento.

La optimización de este pozo requiere un análisis integral de sus factores operacionales y del yacimiento, con el fin de identificar oportunidades de mejora y diseñar soluciones específicas. A continuación, se presenta un desglose de las principales causas de la baja producción, así como sus consecuencias y una representación gráfica del problema mediante un Diagrama de Ishikawa.

## **1.2. Causas del problema**

A continuación, se detallan las causas principales de la baja producción en el Pozo Pindo-25, agrupadas en factores operacionales y factores del yacimiento.

### **1) Factores operacionales**

#### **Baja eficiencia del sistema de bombeo**

El sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES) actual del Pozo Pindo-25 no está diseñado para manejar las condiciones específicas del yacimiento, lo que ha provocado una reducción en la eficiencia operativa, entre los principales problemas identificados se encuentran:

- **Inadecuada selección de la bomba:** La bomba actual no está optimizada para crudos pesados con alta viscosidad, lo que genera pérdidas de eficiencia y un mayor consumo energético.
- **Desgaste prematuro de los componentes:** La presencia de sólidos en el crudo incrementa la erosión en los impulsores y el difusor de la bomba, reduciendo su vida útil.
- **Sobrecargas en el motor eléctrico:** La alta densidad del fluido de producción requiere un mayor esfuerzo del motor sumergible, provocando sobrecalentamiento y fallas recurrentes.

- **Frecuentes interrupciones operativas:** Las fallas en la bomba y en los componentes del BES han aumentado el tiempo de inactividad del pozo a 72 horas mensuales, afectando la producción y generando costos adicionales en mantenimiento.

### **Alto consumo energético y costos operativos elevados**

El sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES) del Pozo Pindo-25 presenta una alta demanda de energía debido a su configuración actual, lo que impacta directamente en los costos operativos y en la rentabilidad del pozo, entre los principales factores que contribuyen a este problema se encuentran:

- **Ineficiencia en la conversión de energía en trabajo útil:** La bomba y el motor actuales no están optimizados para las condiciones de producción, lo que genera pérdidas de energía por fricción y resistencias hidráulicas.
- **Sobrecarga en el motor del BES:** La alta viscosidad del crudo pesado obliga al motor sumergible a operar con una demanda energética superior a la nominal, provocando sobrecalentamiento y fallas recurrentes.
- **Desbalance entre la velocidad de bombeo y la demanda real del pozo:** La falta de un sistema de control dinámico provoca que la bomba opere en condiciones subóptimas, consumiendo más energía de la necesaria.
- **Incremento en costos de mantenimiento:** Debido al desgaste acelerado de componentes por altas cargas de operación, se generan costos adicionales en repuestos y reparaciones, impactando la rentabilidad del pozo.

### **Baja temperatura del crudo en el sistema de extracción**



Uno de los principales desafíos en la producción del Pozo Pindo-25 es la baja temperatura del crudo en el sistema de extracción, al tratarse de un petróleo pesado, su alta viscosidad dificulta el flujo, especialmente cuando la temperatura desciende por debajo de los valores óptimos para su movilidad, en la actualidad, no se cuenta con un sistema de calentamiento en línea, lo que agrava la resistencia del fluido dentro de las tuberías y reduce la eficiencia del levantamiento artificial.

Esta condición genera diversos problemas operacionales, entre ellos:

- Incremento en la resistencia al flujo del crudo, dificultando su transporte hacia la superficie.
- Formación de depósitos de asfaltenos y parafinas, que pueden generar obstrucciones en las líneas de producción.
- Mayor consumo energético, ya que se requiere una mayor presión para movilizar el crudo a través de los sistemas de extracción.

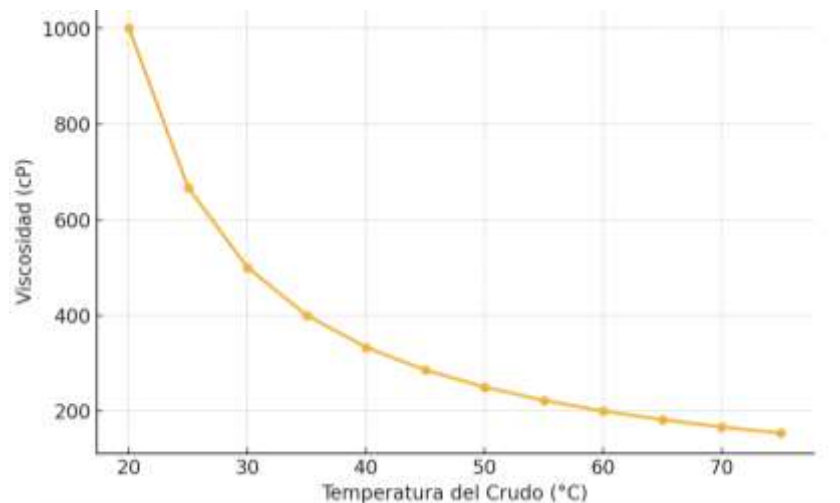


Figura 1. Relación entre viscosidad y temperatura del crudo

Figura 1. Relación entre temperatura y viscosidad de crudos pesados

Este gráfico muestra cómo la viscosidad del crudo disminuye a medida que aumenta la temperatura. En el Pozo Pindo-25, la falta de un sistema de calentamiento en línea impide mantener temperaturas óptimas, lo que contribuye a la alta resistencia al flujo y afecta la producción.

### **Deficiente separación de agua y sólidos (BSW elevado)**

El contenido de agua y sedimentos (BSW - Basic Sediment and Water) en el crudo del Pozo Pindo-25 varía entre 20% y 30%, lo que representa un desafío operativo significativo, el BSW elevado impacta negativamente en la calidad del crudo y exige procesos adicionales de tratamiento antes de que pueda ser enviado a refinerías o comercializado.

Las principales causas de este problema incluyen:

- Tiempo de residencia insuficiente en separadores, lo que impide una adecuada eliminación del agua y sólidos.
- Emulsificación del crudo, dificultando la separación natural de las fases agua-petróleo.
- Mayor carga de sedimentos en el sistema de producción, lo que puede generar bloqueos en tuberías y componentes del pozo.

Para entender mejor este impacto, se presenta la siguiente tabla con valores típicos de BSW y sus efectos en la producción.

Tabla 1. Impacto del BSW en la producción

|   | BSW (%) | Reducción en Calidad del Crudo (%) | Costo de Tratamiento Adicional (\$/barril) | Eficiencia del Pozo (%) |
|---|---------|------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| 1 | 5       | 2                                  | 1                                          | 95                      |
| 2 | 10      | 5                                  | 3                                          | 90                      |
| 3 | 20      | 12                                 | 7                                          | 75                      |
| 4 | 30      | 20                                 | 12                                         | 60                      |
| 5 | 40      | 30                                 | 18                                         | 45                      |

La tabla muestra cómo un BSW elevado reduce la calidad del crudo, aumenta los costos de tratamiento y disminuye la eficiencia del pozo. En el caso del Pozo Pindo-25, su BSW entre 20% y 30% implica costos adicionales y una pérdida de eficiencia significativa.

### **Formación de asfaltenos y parafinas**

El crudo producido en el Pozo Pindo-25 contiene altos niveles de asfaltenos y parafinas, lo que genera problemas operativos críticos, estos compuestos tienden a precipitar y formar depósitos sólidos dentro de las tuberías, lo que ocasiona:

- Obstrucción progresiva de las líneas de producción, reduciendo la capacidad de transporte del crudo.
- Aumento en la viscosidad del fluido, dificultando aún más su bombeo hacia la superficie.
- Frecuentes interrupciones operativas, debido a la necesidad de limpiezas constantes en la infraestructura del pozo.

A continuación, se presenta un diagrama que ilustra cómo la acumulación de asfaltenos y parafinas afecta el flujo del crudo dentro de las tuberías.

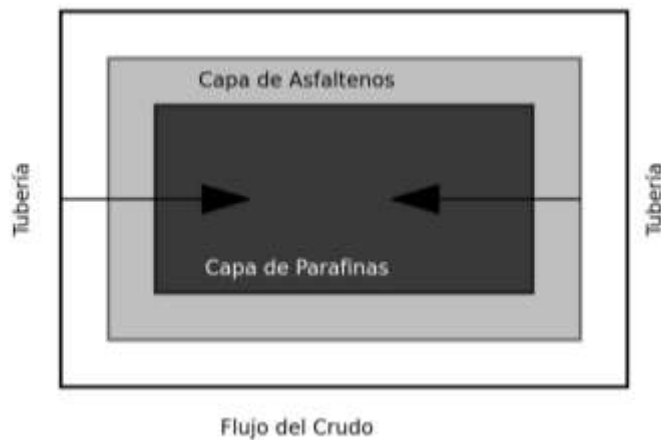


Figura 2. Acumulación de asfaltenos y parafinas en la tubería

Este diagrama ilustra:

- Tubería exterior (líneas negras).
- Capa de asfaltenos (gris claro).
- Capa de parafinas (negro más oscuro).
- Flujo del crudo representado con flechas.

## 2) *Factores del yacimiento*

### **Alta viscosidad del crudo**

El crudo del Pozo Pindo-25 es clasificado como crudo pesado, con una gravedad API entre 20 y 25 grados. Esta alta viscosidad tiene impactos directos en la producción, tales como:

- Dificultad en el transporte del crudo, requiriendo mayor energía y presión para su movilización.
- Mayor tiempo de residencia en los sistemas de separación, afectando la eficiencia del proceso.

- Mayor tendencia a la acumulación de parafinas y asfaltenos, lo que genera bloqueos en tuberías.

### **Baja presión del reservorio**

La presión del yacimiento en el Pozo Pindo-25 es baja, lo que limita la capacidad del crudo para movilizarse de manera natural hacia la superficie, esto significa que la producción del pozo depende altamente de sistemas de levantamiento artificial, y cualquier limitación en estos sistemas provoca reducción de la producción.

## **1.3. Consecuencias del problema**

Si no se implementan soluciones efectivas, las deficiencias operacionales y del yacimiento en el Pozo Pindo-25 tendrán graves repercusiones:

### **Reducción en la producción de crudo**

El bajo rendimiento del sistema de bombeo y el alto consumo energético han provocado que la producción del pozo se reduzca de **250 BPD a 90 BPD**, lo que representa una caída del **64%** en la capacidad productiva del yacimiento, esta disminución afecta la rentabilidad del pozo y compromete su viabilidad a largo plazo.

### **Incremento en los costos de operación y mantenimiento**

- La sobrecarga en el sistema de bombeo genera **un consumo energético elevado**, incrementando los costos operativos.
- Los constantes bloqueos por acumulación de asfaltenos y parafinas aumentan la **frecuencia de mantenimientos correctivos**, lo que incrementa los costos de repuestos y mano de obra.

- Se ha identificado un aumento del **50% en el costo de mantenimiento anual**, con pérdidas económicas estimadas en **\$243,600 por año**.

#### **Frecuentes interrupciones operativas y pérdida de eficiencia**

- Actualmente, el pozo enfrenta **hasta 72 horas de inactividad al mes** debido a fallas en el BES, lo que genera una pérdida de producción de aproximadamente **7,560 barriles anuales**.
- La baja eficiencia del BES, provoca un desempeño inestable del sistema, aumentando el riesgo de fallas críticas en el motor y la bomba.

#### **Disminución en la Calidad del Crudo y Dificultades en su Comercialización**

- El alto contenido de agua y sedimentos (**BSW entre 20% y 30%**) en el crudo extraído dificulta su procesamiento y comercialización, generando **costos adicionales en tratamientos de separación**.
- La falta de un control térmico adecuado incrementa la **formación de emulsiones y sólidos**, reduciendo la eficiencia en la refinación del crudo.

#### **Impacto Ambiental y Riesgo Operacional**

- El sobrecalentamiento del motor del BES y las fallas mecánicas aumentan el **riesgo de fugas de hidrocarburos**, lo que representa un problema ambiental y de seguridad.
- El consumo excesivo de energía y la falta de optimización del BES incrementan la **huella de carbono de la operación**, afectando la sostenibilidad del proyecto.

A continuación, se presenta un diagrama de Ishikawa que muestra las principales causas operacionales y del yacimiento que contribuyen a la baja producción del Pozo Pindo-25.



Figura 3. Diagrama de Ishikawa, principales consecuencias operacionales y del yacimiento

## 1.4. Justificación

### 1) *Justificación técnica*

El Pozo Pindo-25, ubicado en el Bloque 64, ha visto una caída del 64% en su producción, pasando de 250 barriles por día (BPD) a solo 90 BPD, esta reducción impacta directamente en la rentabilidad del campo, generando altos costos operativos y afectando la continuidad de la explotación.

Para abordar estos problemas, se proponen dos soluciones estratégicas que garantizan un incremento de producción, automatización de procesos y reducción de costos operativos:

### **Propuesta 1:** Implementación de un Sistema de Calentamiento en Línea (HIT) en el pozo

Objetivo: Reducir la viscosidad del crudo para mejorar su flujo a través de las tuberías, evitando la acumulación de parafinas y asfaltenos.

#### **Beneficios técnicos:**

- **Incremento de producción:** Se espera aumentar la producción a 180 BPD en 6 meses gracias a la mejora en la movilidad del crudo.
- **Eficiencia operativa:** Se evitarán bloqueos en tuberías, reduciendo el número de intervenciones de mantenimiento en un 50%.
- **Seguridad operativa:** Menos riesgo de sobrepresión y fallas en equipos, protegiendo la integridad del sistema.
- **Automatización de procesos:** Sensores de temperatura monitorearán en tiempo real la eficiencia del HIT.
- **Reducción de costos:** Se disminuirán los costos de limpieza y mantenimiento correctivo en un 30%.

#### **Evidencia técnica:**

El gráfico muestra que el sistema de calentamiento en línea (HIT) reduce la viscosidad del crudo a medida que aumenta la temperatura del pozo mediante la inyección de calor, facilitando el bombeo y reduciendo la necesidad de mantenimientos correctivos.



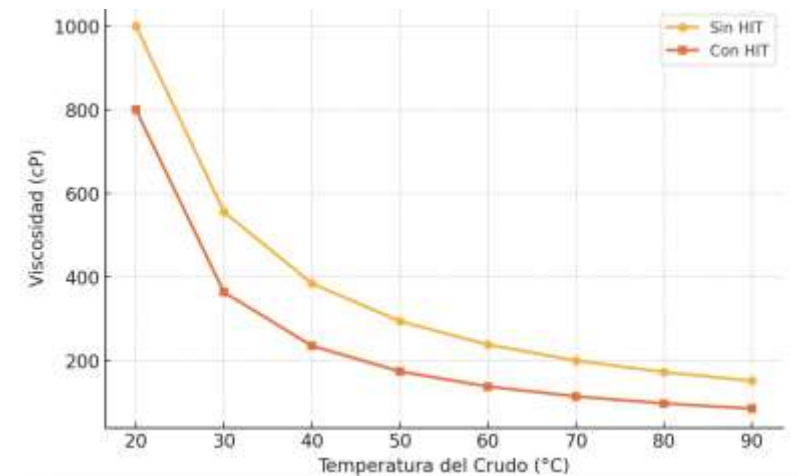


Figura 4. Efecto del HIT en la viscosidad del crudo

## Propuesta 2: Optimización del Sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES)

Objetivo: Aumentar la eficiencia del sistema de levantamiento artificial, evitando fallas operativas y maximizando la recuperación de hidrocarburos.

### Beneficios técnicos:

#### Aumento en la producción de crudo

- Incremento de la producción de **90 BPD a 180 BPD**, duplicando la capacidad de extracción del pozo.
- Reducción del **tiempo de inactividad mensual de 72 a 12 horas**, asegurando continuidad operativa.

#### Optimización de la eficiencia del sistema de bombeo

- Implementación de **bombas centrífugas multietapa** adaptadas a crudos pesados, reduciendo el esfuerzo mecánico y mejorando el rendimiento.

- Reducción de fallas por sobrecarga mediante el uso de **motores sumergibles de alta eficiencia** con mejor disipación térmica.

### **Reducción de costos operativos y energéticos**

- Disminución del consumo energético en un **30%** mediante la incorporación de **variadores de frecuencia (VFD)** para ajustar la velocidad de bombeo.
- **Ahorro estimado de \$243,600 anuales** en costos de mantenimiento y operación.

### **Manejo eficiente del crudo pesado y sus impurezas**

- Instalación de **separadores de sólidos tipo ciclón**, reduciendo la acumulación de asfaltenos y parafinas en la bomba.
- Mejora en la calidad del crudo extraído, minimizando problemas de **BSW elevado (20-30%)** y reduciendo costos de tratamiento.

### **Mejora en la seguridad y confiabilidad del sistema**

- **Mayor resistencia del BES a condiciones extremas**, evitando fallas catastróficas y prolongando la vida útil de los equipos.
- Implementación de **cables de potencia encapsulados** con mejor resistencia a la temperatura y presión del yacimiento.

### **Tabla comparativa: Impacto de la Optimización del BES**

La tabla muestra que tras la optimización del BES, la producción se duplicará a 180 BPD, la eficiencia del bombeo aumentará del 65% al 85%, y los costos de mantenimiento se reducirán un 50%, asegurando una operación más eficiente y segura.

Tabla 2. Comparación del rendimiento del BES antes y después de la optimización

|   | Parámetro                         | Antes de la Optimización | Después de la Optimización |
|---|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | Producción diaria (BPD)           | 90                       | 180                        |
| 2 | Frecuencia de fallas (mensual)    | 5                        | 1                          |
| 3 | Costo de mantenimiento (\$/mes)   | 15000                    | 8000                       |
| 4 | Tiempo de inactividad (horas/mes) | 72                       | 12                         |
| 5 | Eficiencia del bombeo (%)         | 65                       | 85                         |

## 2) *Justificación del proyecto*

El Pozo Pindo-25 enfrenta una reducción en su producción debido a múltiples factores operativos y del yacimiento, para abordar esta problemática, se han evaluado dos propuestas de optimización con el objetivo de mejorar la eficiencia del levantamiento artificial y reducir los costos operativos. A continuación, se presentan ambas propuestas con sus respectivos beneficios y análisis de impacto.

### **Propuesta 1: Implementación del sistema de calentamiento en línea (HIT)**

El **Sistema de Calentamiento en Línea (HIT)** busca reducir la viscosidad del crudo pesado mediante el aumento de la temperatura en el sistema de producción. Esta estrategia permite mejorar la fluidez del crudo y minimizar la acumulación de asfaltenos y parafinas, facilitando su transporte y extracción.

### **Beneficios Esperados**

- **Mejora en la viscosidad del crudo:** Reducción de la resistencia al flujo, disminuyendo la carga en el sistema de bombeo.
- **Menor formación de asfaltenos y parafinas:** Reducción del mantenimiento correctivo en tuberías y equipos.
- **Reducción en la presión diferencial del BES:** Menor esfuerzo requerido por la bomba, aumentando su vida útil.
- **Incremento en la producción:** Se espera un aumento del **40% en la extracción diaria**, alcanzando aproximadamente **126 BPD**.
- **Disminución del contenido de agua en el crudo (BSW):** Reducción del 10%, disminuyendo los costos de tratamiento.

A continuación, se presenta un gráfico, que muestra el beneficio obtenido en esta propuesta:

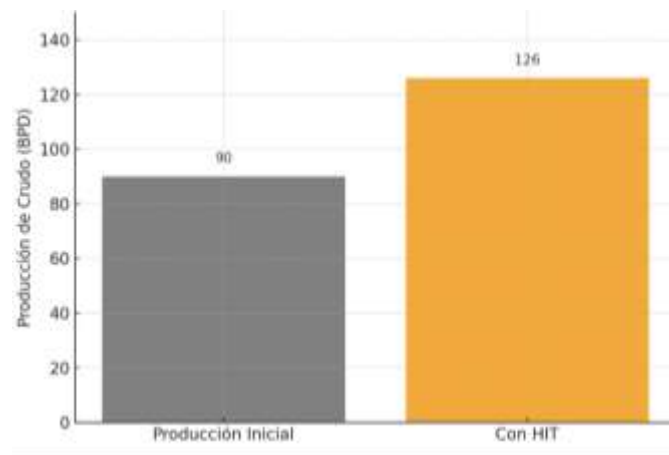


Figura 5. Impacto del sistema HIT en la producción del crudo

- Muestra cómo el **Sistema de Calentamiento en Línea (HIT)** mejora la fluidez del crudo, reduciendo su viscosidad y aumentando la producción de **90 BPD a 126 BPD**.

- Se debe a la disminución en la resistencia al flujo y la menor acumulación de asfaltenos y parafinas, lo que permite un mejor desempeño del BES actual sin cambiar su configuración.

### **Propuesta 2: Optimización del sistema de bombeo electro-sumergible (BES)**

El **Bombeo Electro-Sumergible (BES)** actual del Pozo Pindo-25 no está adaptado a las condiciones específicas del yacimiento, la optimización del BES mediante la selección de un equipo adecuado para crudos pesados, junto con la incorporación de motores de alta eficiencia y separadores de sólidos, permitirá aumentar la capacidad de extracción, mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos.

#### **Beneficios Esperados**

- **Incremento significativo en la producción:** Aumento del **100% en la capacidad de extracción**, pasando de **90 BPD a 180 BPD**.
- **Mayor eficiencia operativa:** Reducción de fallas mecánicas en un **70%**, mejorando la confiabilidad del sistema.
- **Optimización del consumo energético:** Implementación de variadores de frecuencia (VFD), reduciendo el consumo eléctrico en un **30%**.
- **Reducción en los costos de mantenimiento:** Ahorro estimado de **\$243,600 anuales** por menor desgaste de los componentes.
- **Mejor manejo de sólidos y sedimentos:** Instalación de separadores de sólidos tipo ciclón para evitar bloqueos en la bomba.

A continuación, se presenta un gráfico, que muestra el beneficio obtenido en esta propuesta:

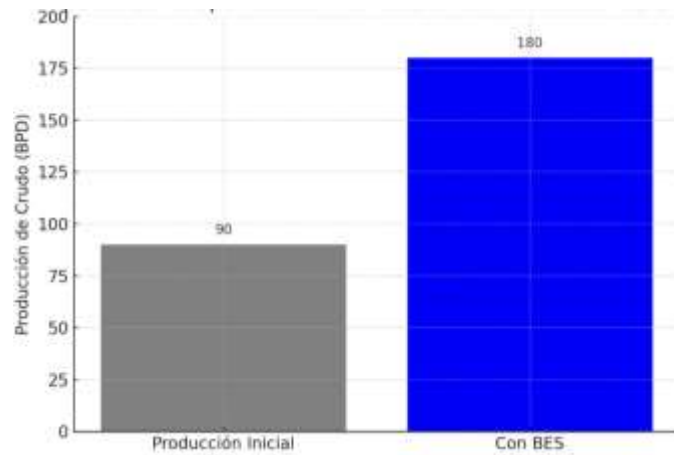


Figura 6. Impacto de la optimización del BES en la producción del crudo

- Refleja el impacto de la **optimización del Bombeo Electro-Sumergible (BES)**, incrementando la producción de **90 BPD a 180 BPD**.
- Este resultado es posible gracias a la implementación de un **BES diseñado para crudos pesados**, con **separadores de sólidos**, **motores eficientes** y **variadores de frecuencia (VFD)**, que reducen las fallas y optimizan el consumo energético.

### 3) *Justificación legal*

El proyecto se fundamenta en normativas nacionales e internacionales, asegurando seguridad operativa, eficiencia y cumplimiento con estándares de calidad.

#### a) Normativa nacional

##### **Ley de hidrocarburos (Decreto 2967 y Ley 44)**

Regula la exploración, explotación, transporte y comercialización de hidrocarburos en Ecuador.

Optimización del pozo para cumplir con criterios de eficiencia y recuperación máxima de petróleo.

### **Ley de empresas públicas (LOEP, ley orgánica de empresas públicas)**

Regula las empresas estatales como Petroamazonas EP y Petroecuador, estableciendo normas de inversión y gestión operativa.

Asegura que las inversiones en optimización cumplan con criterios de transparencia y rentabilidad.

### **Código orgánico del ambiente (coa)**

Establece regulaciones ambientales para la exploración y explotación de petróleo, incluyendo control de emisiones y gestión de residuos.

Implementación de estrategias para minimizar el impacto ambiental y reducir emisiones.

### **Ley de seguridad y salud en el trabajo**

Regula la seguridad ocupacional en la industria petrolera, protegiendo a los trabajadores y minimizando riesgos operacionales.

Aplicación de protocolos de seguridad en la optimización del sistema de bombeo (BES) y calentamiento en línea (HIT).

### **Ley de régimen tributario interno**

Establece impuestos y beneficios fiscales para proyectos de inversión en el sector hidrocarburífero.

Aplicación de incentivos fiscales para la modernización tecnológica del pozo.

### **Ley de participación y control social**

Regula la consulta previa y la interacción con comunidades cercanas a proyectos petroleros.

Asegura que la optimización del pozo tenga un impacto social positivo en la zona de influencia.

### **Ley orgánica de ordenamiento territorial, uso y gestión del suelo**

Regula el uso del suelo en actividades industriales, incluyendo zonas petroleras.

Garantiza que la infraestructura del pozo cumpla con requisitos de ordenamiento y sostenibilidad.

### **Ley de contratación pública**

Regula los procesos de licitación y contratación en proyectos de inversión petrolera.

Asegura que la contratación de equipos y servicios para la optimización cumpla con normativas de transparencia.

### **Cumplimiento con el plan nacional de hidrocarburos:**

Contribuye a incrementar la producción nacional y reducir la dependencia de nuevos pozos, alineándose con las políticas del Gobierno de Ecuador.

### **b) Normativa internacional**

Estándares Globales Aplicables a la Producción de Hidrocarburos:

**API RP 11S (American Petroleum Institute)** – Regula el diseño y operación de sistemas de levantamiento artificial (BES).

**ISO 15136-1:2019** – Norma internacional que optimiza sistemas de bombeo y producción petrolera.

**ASTM D7157** – Establece métodos para prevenir la acumulación de asfaltenos en crudos pesados.

**ISO 14001** – Certificación internacional para minimizar el impacto ambiental de la producción petrolera.

**ISO 45001** – Garantiza la seguridad ocupacional en operaciones industriales.



## 2. Alcance

A continuación, se presenta el alcance del proyecto de optimización del Pozo Pindo-25, sobre el cual se sostiene la estructura del proyecto.

### 2.1. ¿Qué se va a hacer?

El presente proyecto tiene como objetivo la optimización del sistema de levantamiento artificial en el Pozo Pindo-25, ubicado en el Bloque 64, Plataforma Sami Sur, Campo Palanda, Ecuador, para lograrlo, se detallan las siguientes propuestas:

#### 1) *Implementación del sistema de calentamiento en línea (HIT)*

Este sistema permitirá reducir la viscosidad del crudo y prevenir la acumulación de asfaltenos y parafinas en las tuberías mediante la inyección de calor en el pozo.

- Diseño e instalación de un sistema de calentamiento en línea en el pozo, que eleve la temperatura del crudo antes de ingresar al sistema de bombeo.
- Integración de sensores térmicos para el monitoreo en tiempo real de la temperatura del fluido.
- Ajuste y calibración del sistema HIT para garantizar su eficiencia energética.

Los materiales a utilizar en esta propuesta son los siguientes:

Tabla 3. Materiales utilizados en la implementación del sistema HIT

| Material / Componente                       | Descripción                                                                             | Función en el Sistema HIT                                  |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Tuberías de acero con recubrimiento térmico | Conductos de acero al carbono o inoxidable con aislamiento térmico de alto rendimiento. | Transportan el crudo calentado sin pérdida de temperatura. |

| <b>Material / Componente</b>                         | <b>Descripción</b>                                                           | <b>Función en el Sistema HIT</b>                                                   |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Elementos de calefacción por inducción</b>        | Resistencias eléctricas diseñadas para calentar fluidos en tuberías.         | Mantienen la temperatura del crudo dentro de un rango óptimo.                      |
| <b>Aislamiento térmico de fibra cerámica</b>         | Material resistente a temperaturas elevadas y de baja conductividad térmica. | Minimiza la disipación del calor y mejora la eficiencia del sistema.               |
| <b>Sensores de temperatura tipo RTD y termopares</b> | Dispositivos de medición de temperatura de alta precisión.                   | Monitorean la temperatura del crudo en tiempo real.                                |
| <b>Válvulas de control de temperatura y flujo</b>    | Válvulas reguladoras de paso de fluido con actuadores electrónicos.          | Ajustan el flujo de crudo caliente según la demanda del sistema.                   |
| <b>Controlador de temperatura PID</b>                | Dispositivo electrónico de control automático de temperatura.                | Ajusta la potencia de los elementos de calefacción para evitar sobrecalentamiento. |
| <b>Cables de alimentación de alta temperatura</b>    | Conductores eléctricos con recubrimiento térmico especial.                   | Alimentan los sistemas eléctricos de calentamiento.                                |
| <b>Panel de control eléctrico con PLC</b>            | Unidad de control programable para gestión de temperatura y sensores.        | Automatiza y supervisa el funcionamiento del sistema HIT.                          |

| Material / Componente                | Descripción                                                  | Función en el Sistema HIT                                          |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Soportes y abrazaderas para tuberías | Estructuras metálicas para fijación del sistema de tuberías. | Aseguran la estabilidad y alineación del sistema de calentamiento. |

Así mismo, se utilizarán materiales adicionales para automatización y control del sistema como herramientas y equipos de instalación, que son los siguientes:

### Automatización y control del sistema

Tabla 4. Elementos de automatización

| Material / Componente                | Descripción                                           | Función en la Automatización                                   |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| PLC (Controlador Lógico Programable) | Dispositivo que recibe y procesa señales de sensores. | Controla el sistema de bombeo y el calentamiento en línea.     |
| Interfaz hombre-máquina (HMI)        | Pantalla digital para supervisar datos del sistema.   | Facilita la operación y monitoreo por parte del personal.      |
| Red de sensores inteligentes         | Conjunto de sensores de presión, temperatura y flujo. | Proporcionan datos en tiempo real para el control del sistema. |

|                                                  |                                                          |                                       |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Sistema de comunicación inalámbrica (IoT)</b> | Módulos de transmisión de datos mediante red industrial. | Permite el monitoreo remoto del pozo. |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|

### Herramientas y equipos de instalación

Tabla 5. Herramientas y equipos de instalación

| <b>Herramienta / Equipo</b>                  | <b>Descripción</b>                                          | <b>Uso en el Proyecto</b>                          |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Equipo de soldadura TIG y MIG</b>         | Soldadoras de precisión para acero inoxidable y aleaciones. | Unión de tuberías y componentes estructurales.     |
| <b>Tensiómetros y calibradores de torque</b> | Instrumentos de medición de fuerza y ajuste de pernos.      | Instalación precisa de elementos mecánicos.        |
| <b>Analizador de redes eléctricas</b>        | Dispositivo para medir consumo y eficiencia energética.     | Optimización del consumo de energía del BES y HIT. |
| <b>Multímetros digitales</b>                 | Equipos de medición de voltaje, corriente y resistencia.    | Diagnóstico y ajuste de sistemas eléctricos.       |
| <b>Cámaras termográficas</b>                 | Dispositivos de detección de temperatura superficial.       | Verificación de la eficiencia del sistema HIT.     |
| <b>Medidores de flujo ultrasónico</b>        | Instrumentos para medir caudal sin contacto.                | Monitoreo del rendimiento del BES.                 |

2) ***Optimización del sistema de bombeo electro-sumergible (BES) e inyección de químicos***

El BES actual presenta fallas frecuentes debido a la viscosidad del crudo y la presencia de sólidos, la optimización del sistema incluirá:

- Selección y reemplazo de bombas y motores de alta eficiencia adaptados a crudos pesados.
- Incorporación de separadores de sólidos para evitar acumulaciones dentro del sistema de bombeo.
- Automatización con sensores de presión y caudal que permitan el ajuste en tiempo real de la velocidad de bombeo.
- Reducción del tiempo de inactividad del pozo mediante monitoreo predictivo de fallas.
- Se implementará un sistema de inyección de químicos que optimice la movilidad del crudo y reduzca la frecuencia de mantenimiento correctivo

Los materiales a utilizar en esta propuesta son los siguientes:

Tabla 6. Herramientas y equipos de instalación del BES e inyección de químicos

| Categoría                    | Herramienta/Equipo                  | Función                                                                    |
|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Equipos de bombeo</b>     | Bomba centrífuga multietapa         | Impulsar el crudo hacia la superficie                                      |
|                              | Motor sumergible de alta eficiencia | Generar la potencia necesaria para el bombeo                               |
|                              | Variador de frecuencia (VFD)        | Controlar la velocidad del motor y optimizar el consumo energético         |
| <b>Sistemas de inyección</b> | Tubo capilar de inyección           | Transportar los químicos al punto de inyección en la columna de producción |

|                                          |                                |                                                                                       |
|------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                          | Bomba dosificadora de químicos | Inyectar inhibidores de parafinas y dispersantes de asfaltenos de forma controlada    |
|                                          | Válvulas de control            | Regular el flujo de los químicos inyectados                                           |
| <b>Monitoreo y sensores</b>              | Sensores de presión            | Medir variaciones en la columna de producción y detectar posibles bloqueos            |
|                                          | Sensores de temperatura        | Controlar la temperatura del crudo para evaluar la eficiencia del tratamiento químico |
|                                          | Caudalímetros                  | Medir el flujo de crudo y evaluar la eficiencia del BES                               |
| <b>Instrumentación y control</b>         | Sistema SCADA                  | Supervisión y control remoto del proceso de inyección y bombeo                        |
|                                          | Analizadores de viscosidad     | Evaluar la reducción de viscosidad en el crudo tratado                                |
| <b>Herramientas de mantenimiento</b>     | Cámara de inspección para BES  | Diagnosticar fallas en el sistema de bombeo                                           |
|                                          | Extractores mecánicos          | Facilitar el mantenimiento del BES en caso de intervención                            |
| <b>Software de análisis y simulación</b> | Aspen HYSYS                    | Simulación del flujo de crudo y evaluación de la eficiencia del BES                   |
|                                          | OLGA                           | Modelado de flujo multifásico para optimizar la inyección de químicos                 |
|                                          | MATLAB                         | Análisis de datos y optimización de parámetros operativos                             |

### **Evaluación de impacto económico y operativo**

Para medir el impacto de la optimización del pozo, se desarrollarán las siguientes actividades:

- Análisis comparativo de producción antes y después de la optimización.
- Cálculo del ahorro en costos operativos y mantenimiento.
- Estimación del retorno de inversión (ROI) del proyecto.

## **2.2. ¿Cómo se va a hacer?**

El proyecto se llevará a cabo mediante una metodología estructurada en varias fases (ambas propuestas utilizarán la misma metodología en los casos que apliquen):

### **Fase 1: diagnóstico del pozo**

Recolección de datos históricos de producción (caudales, presiones, eficiencia del BES).

- Caracterización del crudo (viscosidad, contenido de asfaltenos y parafinas).
- Inspección del estado del sistema de bombeo actual.
- Evaluación de las fallas mecánicas y eléctricas del BES.
- Análisis de Propiedades de Fluidos.
- Análisis Nodal del BES.

### **Fase 2: Diseño y selección de equipos**

- Cálculo de requerimientos térmicos para el sistema HIT.
- Selección de bombas con mayor eficiencia energética.
- Especificación de sensores y sistemas de monitoreo.
- Diseño de protocolos de control y mantenimiento.

### **Fase 3: Implementación del proyecto**

- Instalación del sistema HIT en línea con el sistema de producción.
- Reemplazo de componentes del BES e implementación del sistema de inyección de químicos
- Pruebas operativas y ajustes de calibración.
- Capacitación del personal en el uso de nuevas tecnologías.

### **Fase 4: evaluación y monitoreo**

- Medición de producción tras la optimización.

- Evaluación del rendimiento de ambas propuestas BES y HIT.
- Comparación de costos operativos antes y después.

### 2.3. ¿Cuándo se hará?

#### Cronograma estimado del proyecto

El proyecto tendrá una duración aproximada de **8 meses**, dividido en las siguientes etapas:

Tabla 7. Etapas de instalación del BES

| <b>Fase</b>                                     | <b>Duración Estimada</b> |
|-------------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Fase 1: Diagnóstico Inicial</b>              | 2 meses                  |
| <b>Fase 2: Diseño y Selección de Soluciones</b> | 2 meses                  |
| <b>Fase 3: Implementación y Validación</b>      | 3 meses                  |
| <b>Fase 4: Evaluación de Impacto</b>            | 1 mes                    |

### 2.4. ¿Dónde se aplicará?

#### Ubicación del proyecto:

- Plataforma Sami Sur, Campo Palanda, Bloque 64, Ecuador.
- Zona de producción de crudos pesados, caracterizada por alta viscosidad y formación de asfaltenos y parafinas.



## 2.5. ¿Por qué se hace?

La optimización del Pozo Pindo-25 responde a una serie de necesidades técnicas, económicas, operativas y estratégicas derivadas de los problemas actuales que afectan su producción y la eficiencia de la explotación del yacimiento. Este apartado detalla en profundidad las razones fundamentales por las que se ha planteado este proyecto, abarcando los impactos productivos, financieros, ambientales, tecnológicos y regulatorios.

### 1) *Razón técnica: problemas en el pozo pindo-25*

#### **Fallas identificadas en la producción actual**

Actualmente, el Pozo Pindo-25 presenta problemas operacionales severos que han llevado a una disminución del 64% en su producción. De una producción inicial de 250 barriles por día (BPD), el pozo ahora solo produce 90 BPD, lo que compromete la rentabilidad y viabilidad del campo Palanda, Bloque 64.

#### **Causas técnicas de la baja producción**

- Alta viscosidad del crudo, lo que dificulta su extracción y transporte en las tuberías.
- Formación de asfaltenos y parafinas, lo que provoca bloqueos en las líneas de flujo y reduce la eficiencia del bombeo.
- Sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES) no adaptado, lo que genera fallas frecuentes debido a la presencia de sólidos y alta viscosidad del fluido.
- Elevado contenido de agua y sedimentos (BSW entre 20% y 30%), lo que incrementa los costos de procesamiento y afecta la calidad del crudo comercializable.
- Baja presión del yacimiento, lo que disminuye la eficiencia del levantamiento artificial y encarece la extracción.

### **Impacto técnico de estos problemas**

- Mayor tiempo de inactividad del pozo, actualmente 72 horas al mes.
- Bajo rendimiento del sistema de extracción.
- Altos costos de mantenimiento y limpieza de tuberías.
- Menor eficiencia en el sistema BES, lo que genera interrupciones no programadas.

#### **2) *Solución técnica con este proyecto***

Para resolver estos problemas, se ha diseñado un plan de optimización basado en 2 propuestas que son las siguientes:

- a) Implementación de un Sistema de Calentamiento en Línea (HIT) para reducir la viscosidad del crudo, mediante la inyección de calor.
- b) Optimización del Sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES) con tecnologías avanzadas e inyección de químicos

#### **3) *Razón económica: pérdidas financieras y alto costo operativo***

### **Impacto económico de la baja producción**

Actualmente, la baja producción del pozo genera pérdidas económicas significativas.

Tabla 8. Comparativo del impacto económico

| <b>Parámetro</b>        | <b>Antes de la caída</b> | <b>Situación actual</b> |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Producción diaria (BPD) | 250 BPD                  | 90 BPD                  |

|                                             |                 |                 |
|---------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Producción anual estimada<br>(barriles/año) | 91,25           | 32,85           |
| Ingresos anuales (\$50 por barril)          | \$4.56 millones | \$1.64 millones |
| Pérdidas anuales estimadas                  | -               | \$2.92 millones |

### **Costos operativos actuales elevados**

- Costo de mantenimiento del BES: \$180,000 al año debido a fallas frecuentes.
- Gasto en limpieza de tuberías: Incrementado por la acumulación de asfaltenos y parafinas.
- Costo del tratamiento de crudo (BSW alto): Se requieren procesos adicionales de separación de agua y sedimentos.

### **Solución económica con este proyecto**

- Duplicar la producción diaria a 180 BPD, aumentando ingresos a \$3.24 millones anuales.
- Reducir costos operativos en un 46%, generando \$243,600 en ahorros anuales.
- Optimizar el levantamiento artificial, reduciendo costos de mantenimiento del BES.

#### **4) Razón Estratégica: alineación con los objetivos del sector petrolero en Ecuador**

### **Importancia del pozo Pindo-25 en la producción nacional**

Ecuador depende en gran medida del sector petrolero como fuente de ingresos fiscales y divisas. El Bloque 64, donde se encuentra el Pozo Pindo-25, forma parte de los yacimientos clave para la producción de crudos pesados.

### **Objetivos estratégicos del gobierno ecuatoriano**

El Plan Nacional de Hidrocarburos busca aumentar la producción petrolera sin perforar nuevos pozos, optimizando los existentes.

### **Contribución de este proyecto a la estrategia nacional**

- Aprovechamiento máximo del yacimiento, reduciendo la necesidad de nuevas perforaciones.
- Uso de tecnologías innovadoras para incrementar la eficiencia y reducir costos.
- Mejor gestión de crudos pesados, alineándose con estándares internacionales.

## **2.6. ¿Para qué se hace?**

### **Objetivos del proyecto:**

- Incrementar la producción de 90 BPD a 180 BPD.
- Reducir costos operativos en un 46%, ahorrando \$243,600 anuales.
- Minimizar el tiempo de inactividad en un 83% (de 72 a 12 horas al mes).
- Automatizar procesos para mejorar la eficiencia y seguridad.
- Cumplir con regulaciones ambientales y operativas.

## **2.7. ¿Qué no se va a hacer? (exclusiones del proyecto)**

- Actividades fuera del alcance del proyecto:
- No se perforarán nuevos pozos, solo se optimizará el Pozo Pindo-25.
- No se modificarán instalaciones de procesamiento fuera del pozo.
- No se realizarán intervenciones mecánicas más allá del BES y HIT.
- No se considerarán evaluaciones geológicas de nuevas reservas.

## **2.8. Supuestos y consideraciones**

Factores que pueden afectar el desarrollo del proyecto:

- **Disponibilidad de equipos y materiales:** Se asume que los componentes del sistema HIT y BES estarán disponibles en los plazos establecidos.
- **Condiciones climáticas:** Se considera que el clima en la zona de operación no afectará la instalación de los sistemas.
- **Presupuesto asignado:** Se asume que no habrá limitaciones financieras que afecten la ejecución del proyecto.

### **3. Objetivos: general y específicos**

#### **3.1. Objetivo general**

Optimizar el sistema de levantamiento artificial del Pozo Pindo-25, ubicado en la Plataforma Sami Sur, Campo Palanda, Bloque 64, mediante la implementación ya sea de un Sistema de Calentamiento en Línea (HIT) que reduzca la viscosidad del crudo o de la modernización del Sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES) más la inyección de químicos, con el fin de incrementar la producción de crudo, reducir costos operativos, minimizar el tiempo de inactividad y garantizar el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales.

#### **3.2. Objetivos específicos**

Dado que la problemática del Pozo Pindo-25 se divide en oportunidades de mejora, se establecen los siguientes objetivos específicos que abordan de manera directa los aspectos técnicos, operativos, económicos y normativos del proyecto.

**Objetivo específico 1:** Implementación del Sistema de Calentamiento en Línea (HIT) para la Reducción de la Viscosidad del Crudo

**Justificación:**

Uno de los principales problemas identificados en el Pozo Pindo-25 es la alta viscosidad del crudo, que impide su flujo eficiente y contribuye a la formación de asfaltenos y parafinas en las tuberías, esta situación afecta directamente la productividad y eleva los costos operacionales debido a la necesidad de limpiezas frecuentes y mantenimientos correctivos.

**Acciones a ejecutar:**

- Diseñar e instalar un Sistema de Calentamiento en Línea (HIT) en el pozo, que mantenga el crudo a una temperatura óptima.
- Incorporar sensores de temperatura y monitoreo en tiempo real para garantizar la eficiencia del sistema.
- Evaluar la reducción de la viscosidad del crudo antes y después de la implementación del sistema.
- Determinar el impacto del HIT en la reducción de la frecuencia de mantenimiento por acumulación de asfaltenos y parafinas.

**Resultados esperados:**

- Reducción de la viscosidad del crudo, facilitando su transporte y bombeo.
- Disminución del número de intervenciones correctivas por acumulación de sólidos en tuberías.
- Mejora en la estabilidad del flujo de producción, evitando caídas en la producción.

**Objetivo específico 2:** Optimización del Sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES) e inyección de químicos, para Mejorar la Eficiencia del Levantamiento Artificial.

**Justificación:**

El sistema BES actual no está adaptado a las condiciones específicas del Pozo Pindo-25, lo que provoca constantes fallas mecánicas y reduce la producción efectiva; la presencia de sólidos, la alta viscosidad del crudo y el elevado contenido de agua y sedimentos (BSW) afectan la eficiencia del sistema de levantamiento artificial.

**Acciones a ejecutar:**

- Seleccionar e instalar una bomba electro-sumergible optimizada para crudos pesados.
- Incorporar un separador de sólidos y filtro de admisión de crudo para minimizar la obstrucción del BES.
- Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real (SCADA) para detectar anomalías en la operación del BES.
- Realizar pruebas de producción antes y después de la optimización para medir el impacto en la eficiencia del levantamiento artificial.
- Inyección de químicos, que, se realizará en una etapa estratégica del proceso de producción

**Resultados esperados:**

- Incremento en la producción diaria de 90 BPD a 180 BPD.
- Reducción del tiempo de inactividad del pozo de 72 a 12 horas al mes.
- Disminución del número de fallas mecánicas en un 70 por ciento.
- Mayor estabilidad en la producción, asegurando un flujo continuo y uniforme.

**Objetivo específico 3:** Evaluar el Impacto Económico y Operativo de la Optimización del Pozo Pindo-25

**Justificación:**

La optimización del Pozo Pindo-25 debe ser evaluada no solo desde un punto de vista técnico, sino también en términos de su impacto económico y operativo, la mejora en la eficiencia del

sistema de levantamiento artificial debe traducirse en reducción de costos operativos, aumento de rentabilidad y optimización del uso de recursos.

**Acciones a ejecutar:**

- Realizar un análisis comparativo de la producción antes y después de la implementación de la propuesta elegida.
- Determinar el ahorro en costos de mantenimiento y energía derivado de la mejora en la eficiencia operativa.
- Evaluar el retorno de inversión (ROI) del proyecto, considerando los costos de implementación y los beneficios económicos generados.
- Elaborar un informe de impacto operativo que documente los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas.

**Resultados esperados:**

- Reducción de costos operativos en al menos un 46 por ciento, con un ahorro estimado de 243,600 dólares anuales.
- Incremento en la producción de crudo, generando ingresos adicionales de 1.62 millones de dólares al año.
- Justificación económica de la optimización del pozo, demostrando la viabilidad financiera del proyecto.

**Objetivo específico 4:** Garantizar el Cumplimiento de Normativas Nacionales e Internacionales en la Optimización del Pozo Pindo-25.

**Justificación:**

Toda operación en la industria petrolera debe cumplir con regulaciones nacionales e internacionales para garantizar la seguridad operativa, la eficiencia productiva y la



sostenibilidad ambiental, la optimización del Pozo Pindo-25 debe alinearse con los marcos normativos vigentes para asegurar su viabilidad a largo plazo.

**Acciones a ejecutar:**

- Identificar y aplicar las normas nacionales relevantes, incluyendo la Ley de Hidrocarburos de Ecuador, el Código Orgánico del Ambiente y las Normas INEN aplicables.
- Implementar estándares internacionales de producción y seguridad, como API RP 11S, ISO 15136-1 y ASTM D7157.
- Desarrollar un plan de seguridad y mitigación ambiental conforme a los lineamientos de ISO 14001 y OHSAS 18001.
- Realizar auditorías y reportes de cumplimiento para verificar que la optimización del pozo cumple con todas las regulaciones aplicables.

**Resultados esperados:**

- Cumplimiento con la Ley de Hidrocarburos de Ecuador y demás regulaciones nacionales.
- Adopción de estándares internacionales que garanticen la calidad y seguridad de la operación.
- Reducción del impacto ambiental de la producción petrolera.
- Obtención de certificaciones de cumplimiento en seguridad operativa y gestión ambiental.

# CAPITULO II

## 1. Marco teórico

### 1.1. Antecedentes

#### 1) Contexto geográfico

El Pozo Pindo-25 se encuentra en la Plataforma Sami Sur, dentro del Campo Palanda, Bloque 64, en la región amazónica del Ecuador, esta área es reconocida por su alta biodiversidad y complejidad geológica, presentando formaciones sedimentarias ricas en hidrocarburos.

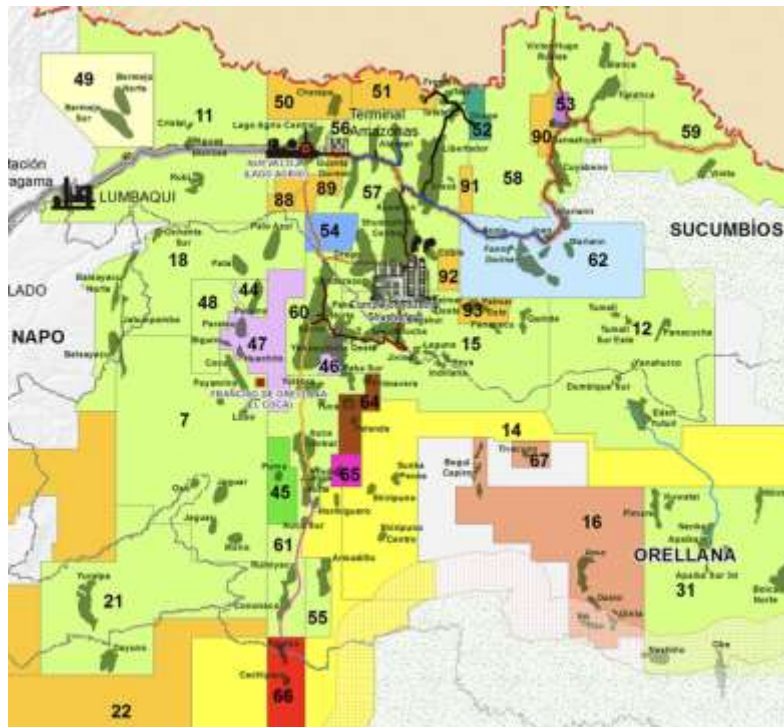


Figura 7. Mapa del bloque 64

#### 2) Contexto económico

Ecuador es un país cuya economía depende en gran medida de la industria petrolera, siendo esta la principal fuente de ingresos fiscales y divisas, la explotación de hidrocarburos representa cerca

del 30% del PIB nacional y financia aproximadamente el 40% del presupuesto estatal, esto convierte al sector petrolero en un eje clave para la estabilidad económica del país, el Pozo Pindo-25, ubicado en el Bloque 64, forma parte de los campos estratégicos de producción de crudo en la región amazónica, su optimización busca incrementar la producción diaria, lo que no solo aumentará los ingresos del Estado, sino que también permitirá reducir la dependencia de importaciones energéticas y mejorar la balanza comercial del país.

La fluctuación en los precios internacionales del petróleo impacta directamente en la economía ecuatoriana, el crudo ecuatoriano, principalmente pesado y de alta viscosidad, se cotiza a precios inferiores respecto a referencias internacionales como el Brent y el WTI. Esto hace fundamental la optimización de la extracción y procesamiento para mejorar su competitividad en el mercado global, desde una perspectiva macroeconómica, un incremento en la producción de petróleo a partir de la optimización del sistema de levantamiento artificial (SLA) y la implementación de calentamiento en línea permitirá mejorar la rentabilidad del pozo, con una mayor producción, se incrementan los ingresos por exportaciones y se reduce el déficit fiscal.

Además, el sector petrolero impulsa el desarrollo de otras industrias conexas, como la construcción, el transporte, los servicios especializados y la manufactura de equipos industriales, generando empleo directo e indirecto, se estima que cada empleo en la industria petrolera genera cinco empleos indirectos, lo que subraya la importancia de este proyecto en la reactivación económica del país.

Tabla 9. Contribución del sector petrolero al PIB Nacional al 2022

| Año | Contribución al PIB (%) | Producción (MBPD) |
|-----|-------------------------|-------------------|
|     |                         |                   |

|      |     |     |
|------|-----|-----|
| 2020 | 7.5 | 480 |
| 2021 | 8.1 | 500 |
| 2022 | 8.3 | 520 |

### 3) *Contexto social*

La industria petrolera en Ecuador ha sido un pilar fundamental para el desarrollo social, ya que genera empleo, infraestructura y crecimiento económico en diversas comunidades, en particular, la Amazonía ecuatoriana, donde se encuentra el Pozo Pindo-25 en el Bloque 64, ha sido una de las principales regiones beneficiadas y afectadas por la actividad petrolera.

Por un lado, el sector petrolero ha impulsado la generación de empleo directo e indirecto en la región, empresas operadoras, proveedores de servicios y contratistas generan oportunidades laborales en campos como la ingeniería, la logística, la seguridad y el mantenimiento industrial; además, la inversión en infraestructura por parte de las compañías petroleras ha permitido la construcción de carreteras, centros de salud y escuelas en zonas remotas. Sin embargo, también existen desafíos sociales asociados a la explotación petrolera, las comunidades indígenas y locales han expresado preocupaciones sobre el impacto ambiental de la actividad, incluyendo la contaminación de fuentes de agua y la deforestación. Esto ha generado conflictos sociales y ha impulsado la necesidad de implementar programas de responsabilidad social empresarial (RSE) y acuerdos con las comunidades.

La optimización del Pozo Pindo-25 puede representar un modelo de producción sostenible, asegurando el desarrollo económico sin comprometer la calidad de vida de las poblaciones locales.

#### **4) *Contexto político y normativo***

La industria petrolera en Ecuador ha estado históricamente ligada a decisiones y estrategias gubernamentales que buscan aprovechar los recursos hidrocarbúferos para el desarrollo económico y social del país, el Pozo Pindo-25, ubicado en el Bloque 64, se encuentra dentro de la jurisdicción del Estado ecuatoriano y es parte de la planificación energética nacional.

El gobierno ecuatoriano ha adoptado diversas políticas para regular y fomentar la explotación responsable del petróleo, equilibrando la producción con la protección ambiental y los intereses de las comunidades locales, la Ley de Hidrocarburos establece los lineamientos para la exploración, explotación, comercialización y distribución del petróleo, mientras que el Código Orgánico del Ambiente (COA) regula los impactos ambientales y la mitigación de daños ecológicos, además, Ecuador forma parte de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), lo que influye en su producción y en las estrategias de comercialización del crudo, las decisiones de política energética están sujetas a fluctuaciones del mercado internacional, acuerdos multilaterales y estrategias de inversión pública y privada.

La optimización del Pozo Pindo-25 se alinea con los objetivos del Plan Nacional de Hidrocarburos, buscando aumentar la eficiencia productiva, reducir costos y garantizar la seguridad energética del país dentro de un marco de sostenibilidad y gobernanza responsable.

#### **5) *Bases teóricas***

##### **Conceptos clave**

##### **a) Exploración petrolera**

La exploración busca identificar y evaluar la presencia de hidrocarburos en el subsuelo.

##### **Conceptos y disciplinas**

- **Geología del Petróleo:** Estudio de la formación y características de los yacimientos.
- **Geofísica Aplicada:** Uso de ondas sísmicas para identificar estructuras geológicas con petróleo.
- **Prospección Sísmica 2D y 3D:** Técnicas para mapear posibles reservorios de hidrocarburos.
- **Exploración de Yacimientos:** Identificación de zonas con potencial petrolero.
- **Cartografía Geológica:** Elaboración de mapas para entender la composición del terreno.

#### **Sistemas y herramientas**

- **Sondas Exploratorias:** Perforaciones iniciales para evaluar la presencia de petróleo.
- **Registro de Pozos (Well Logging):** Medición de propiedades físicas del subsuelo.

### **b) Perforación petrolera**

Consiste en la creación de pozos para extraer petróleo y gas del subsuelo.

#### **Conceptos y disciplinas**

- **Tipos de Pozos:** Pozos exploratorios, productores e inyectores.
- **Perforación Vertical y Direccional:** Métodos para alcanzar yacimientos en distintas direcciones.
- **Propiedades del Subsuelo:** Evaluación de presión, temperatura y porosidad.
- **Lodo de Perforación:** Sustancia utilizada para enfriar y estabilizar la perforación.
- **Cabezal de Pozo:** Conjunto de válvulas que controlan la presión y el flujo de hidrocarburos.

#### **Sistemas y herramientas**

- **Torres de Perforación:** Equipos mecánicos para perforar el subsuelo.
- **Tubos de Revestimiento y Producción:** Materiales que refuerzan el pozo.
- **Sistema Rotativo de Perforación:** Tecnología para perforar con precisión.
- **Sistema de Circulación de Lodo:** Equipos que reciclan el lodo de perforación.

### c) Producción de hidrocarburos

Es la etapa en la que el petróleo y gas extraídos son transportados a la superficie.

#### Conceptos y disciplinas

- **Crudo Ligero y Pesado:** Clasificación del petróleo según su densidad y viscosidad.
- **Gases Asociados y No Asociados:** Diferenciación de los tipos de gas en el yacimiento.
- **Contenido de Agua y Sedimentos (BSW):** Evaluación de impurezas en el crudo.
- **Separación de Fluidos:** Eliminación de agua y gas del petróleo extraído.

#### Sistemas y herramientas

- **Sistemas de Levantamiento Artificial (SLA):** Métodos para extraer petróleo cuando la presión es baja.
- **Bombeo Electro-Sumergible (BES):** Sistema de extracción de crudo pesado.
- **Separadores Trifásicos:** Equipos para dividir petróleo, agua y gas.
- **Tanques de Almacenamiento:** Reservorios temporales de crudo.

### d) Desarrollo y optimización de producción

Estrategias para mejorar la eficiencia y rendimiento del pozo.

#### Conceptos y disciplinas

- **Recuperación Secundaria y Terciaria:** Métodos para extraer más petróleo del yacimiento.
- **Estimulación de Pozos:** Fracturamiento hidráulico y acidificación para mejorar la producción.
- **Calentamiento en Línea:** Técnica para reducir la viscosidad del crudo pesado.
- **Tratamiento de Crudo:** Procesos para mejorar la calidad del petróleo.

#### **Sistemas y herramientas**

- **Inyección de Vapor:** Método para extraer crudos pesados.
- **Sistemas de Control Automático:** Monitoreo en tiempo real del pozo.

### **e) Transporte de hidrocarburos**

Movilización del petróleo desde el pozo hasta refinerías o terminales.

#### **Conceptos y Disciplinas**

- **Densidad y Composición del Crudo:** Factores que afectan el transporte.
- **Presión y Flujo en Oleoductos:** Parámetros clave en el transporte de hidrocarburos.
- **Procesos de Deshidratación:** Eliminación de agua antes del transporte.

#### **Sistemas y herramientas**

- **Oleoductos y Gasoductos:** Infraestructura para transportar petróleo y gas.
- **Estaciones de Bombeo:** Equipos para mantener la presión del fluido en ductos.
- **Buques Petroleros (Tankers):** Transporte marítimo de crudo.

### **f) Refinación de petróleo**

Procesos para transformar el crudo en productos utilizables.



### Conceptos y disciplinas

- **Refinería:** Instalación donde se procesa el petróleo.
- **Destilación Atmosférica y al Vacío:** Procesos de separación de hidrocarburos por temperatura.
- **Cracking Catalítico:** Método para obtener productos ligeros como gasolina.
- **Hidrotratamiento:** Eliminación de azufre y compuestos contaminantes.

### Sistemas y herramientas

- **Torres de Fraccionamiento:** Equipos para separar productos por su punto de ebullición.
- **Hornos de Refinería:** Dispositivos que calientan el crudo en el proceso de destilación.
- **Unidades de Conversión:** Equipos para modificar estructuras moleculares del crudo.

## g) Comercialización de hidrocarburos

Distribución y venta del petróleo y sus derivados.

### Conceptos y disciplinas

- **Mercado Petrolero:** Análisis de oferta y demanda del crudo.
- **Petróleo Brent y WTI:** Principales referencias de precio internacional.
- **Contratos de Exportación:** Acuerdos de compra-venta de hidrocarburos.
- **Regulación Ambiental y Normativa Petrolera:** Legislación sobre producción y comercialización.

### Sistemas y herramientas

- **Sistemas de Medición de Flujo:** Dispositivos para cuantificar la cantidad de crudo transportado.
- **Plantas de Distribución:** Centros de almacenamiento y distribución de derivados.

- **Bolsas de Valores Energéticas:** Mercados donde se negocian futuros de petróleo.
- **Resumen:** Proceso Completo de la Industria Petrolera
- **Exploración:** Estudios geológicos y sísmicos para encontrar petróleo.
- **Perforación:** Creación de pozos para acceder al crudo.
- **Producción:** Extracción y separación del petróleo, gas y agua.
- **Desarrollo y Optimización:** Mejora de la eficiencia del pozo.
- **Transporte:** Movilización de hidrocarburos mediante oleoductos o buques.
- **Refinación:** Transformación del crudo en productos derivados.
- **Comercialización:** Venta y distribución de hidrocarburos en mercados nacionales e internacionales.

## 6) *Bases legales*

### a) Normativas nacionales

#### **Ley de hidrocarburos**

Establece las disposiciones generales para la exploración, explotación y comercialización de petróleo en el país.

#### **Código orgánico del ambiente (COA)**

Regula la gestión ambiental en la industria petrolera, incluyendo el control de emisiones y manejo de residuos.

### b) Normativas internacionales

#### **API RP 11S**

Regula el diseño y operación de sistemas de levantamiento artificial.

### **ISO 14001**

Certificación internacional para minimizar el impacto ambiental en operaciones industriales.

Tabla 10. Cumplimiento normativo del pozo Pindo-25

| Norma                | Aplicación en el Proyecto         |
|----------------------|-----------------------------------|
| API RP 11S           | Implementación del BES            |
| ISO 14001            | Gestión ambiental                 |
| Ley de Hidrocarburos | Regulación de operación petrolera |

## **7) Variables de investigación**

### **a) Variables independientes**

Son aquellas que se modifican para evaluar su impacto en la optimización del pozo:

- Implementación de un sistema de calentamiento en línea
- Optimización del sistema BES

### **b) Variables dependientes**

Dependen de las modificaciones realizadas:

- Aumento de la producción de crudo
- Reducción de la viscosidad
- Disminución de los costos operativos

### c) Indicadores de evaluación

Tabla 11. Indicadores de optimización del pozo Pindo-25

| Indicador                       | Situación Actual | Meta   |
|---------------------------------|------------------|--------|
| Producción (BPD)                | 90               | 180    |
| Viscosidad del crudo (cP)       | 500              | 200    |
| Costo de mantenimiento (\$/año) | 180,000          | 90,000 |

## CAPITULO III

### 1. Diseño e implementación

#### 1.1. Revisión del proceso actual y análisis detallado del pozo Pindo-25

##### 1) *Introducción*

El Pozo Pindo-25, ubicado en la Plataforma Sami Sur del Campo Palanda (Bloque 64), enfrenta una serie de desafíos operativos que han afectado la eficiencia de la producción de crudo, la infraestructura actual incluye el Sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES), líneas de flujo, manifolds de distribución, separadores de prueba, y tanques de almacenamiento. Sin embargo, varios de estos componentes presentan deficiencias técnicas que limitan la producción óptima; en esta sección se detallan los problemas técnicos, se presentan análisis con cálculos relevantes, y se describen las condiciones actuales de los equipos.

## 2) *Estado actual de los equipos*

Tabla 12. Estado actual de los equipos

| <b>Equipo</b>                            | <b>Estado Mecánico</b>                                   | <b>Observaciones</b>                                 |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Cabezal de Pozo</b>                   | Operativo                                                | Mantenimiento regular, sin fallos críticos.          |
| <b>Línea de Flujo</b>                    | En mantenimiento preventivo con dosificación de químicos | Acumulación parcial de parafinas y asfaltenos.       |
| <b>Manifold de Producción</b>            | No operativo                                             | Presenta corrosión interna y fugas menores.          |
| <b>Separador de Prueba</b>               | Mantenimiento preventivo con dosificación de químicos    | Eficiencia reducida en la separación de agua.        |
| <b>Bomba Electro-Sumergible (BES)</b>    | Operativa con bajo rendimiento                           | Eficiencia del 60%, problemas de sobrecalentamiento. |
| <b>Sistema de Calentamiento (actual)</b> | No disponible                                            | Ausencia de un sistema de calentamiento en línea.    |
| <b>Tanques de Almacenamiento</b>         | Operativos                                               | Necesitan revisión de válvulas de seguridad.         |

## 3) *Problemática técnica del proceso actual*

### a) Cabezal de pozo (operativo)

El **cabezal de pozo** es el punto inicial del sistema de producción, encargado de controlar la presión y el flujo del crudo desde el fondo del pozo hacia la superficie. Su funcionamiento es fundamental para mantener la integridad del pozo y prevenir fugas. Actualmente, el cabezal se encuentra operativo, pero requiere una evaluación regular debido a la presión de trabajo en el entorno.

#### **Cálculo de la presión de operación:**

$$P_{operacion} = P_{reservorio} - \Delta PBES$$

Donde:

- ***P<sub>reservorio</sub>*** = 2500 psi (presión estimada del yacimiento)
- ***ΔPBES*** = 1000 psi (pérdida de presión en el sistema BES)

Esta presión debe mantenerse dentro de los límites de diseño del cabezal para garantizar su integridad estructural.

#### **Recomendaciones:**

- Implementar sensores de presión en tiempo real para monitorear posibles fluctuaciones.
- Inspecciones periódicas para detectar corrosión interna o fatiga de material.

#### **b) Línea de flujo (en mantenimiento preventivo)**

Las líneas de flujo transportan el crudo desde el cabezal de pozo hasta el manifold de producción. Estas líneas están sometidas a condiciones extremas, como temperaturas fluctuantes y la presencia de parafinas y asfaltenos, que afectan el flujo del crudo. Actualmente, la línea de flujo está en mantenimiento preventivo debido a la acumulación de estos compuestos.

#### **Cálculo de pérdida de carga en la línea de flujo:**

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

Donde:

- $f$  = Factor de fricción (0.03 para tuberías lisas)
- $L$  = Longitud de la tubería (500 m)
- $D$  = Diámetro interno de la tubería (0.1 m)
- $\rho$  = Densidad del crudo (850 kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  = Velocidad del flujo (1.5 m/s)

$$\Delta P = 0.03 \cdot \frac{500}{0.1} \cdot \frac{850 \cdot (1.5)^2}{2} = 2868.75 Pa (\approx 0.42 psi)$$

Este valor indica una pérdida de presión moderada, pero el riesgo aumenta debido a la obstrucción por depósitos de parafina.

#### **Recomendaciones:**

- Implementar un sistema de calentamiento en línea (HIT) para reducir la viscosidad del crudo y prevenir la acumulación de parafinas.
- Limpieza química regular y raspado mecánico.

#### **c) Manifold de producción (no operativo)**

El **manifold de producción** es el punto de distribución del crudo hacia las diferentes líneas de proceso, actualmente está **no operativo** debido a corrosión interna severa y fugas en las juntas.

#### **Análisis de integridad del manifold:**

El análisis de integridad estructural del manifold se basa en la fórmula de espesor mínimo para soportar la presión interna:

$$t_{min} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot E}$$

Donde:

- $P$  = Presión de operación (1500 psi = 10.34 MPa)
- $D$  = Diámetro externo (0.2 m)
- $\sigma$  = Resistencia del material (250 MPa para acero al carbono)
- $E$  = Factor de eficiencia de la junta (0.85)

$$t_{m'n} = \frac{10.34 \cdot 0.2}{2 \cdot 250 \cdot 0.85} = 0.0048m (\approx 4.8mm)$$

El espesor actual del manifold es de 3 mm, lo que está **por debajo del límite de seguridad**, lo que justifica su inoperatividad.

#### **Recomendaciones:**

- Sustituir el manifold con uno de mayor resistencia a la corrosión interna, preferiblemente de acero inoxidable o recubierto internamente con polímeros anti-corrosivos.
- Implementar un sistema de monitoreo de corrosión para evitar futuras fallas.

#### **d) Separador de prueba (eficiencia reducida)**

El separador de prueba es responsable de separar el crudo, el agua y el gas antes del almacenamiento o procesamiento adicional. Actualmente presenta una eficiencia reducida debido al diseño subóptimo y la falta de mantenimiento adecuado.

#### **Cálculo de la eficiencia del separador:**

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{agua}}{C_{entrada}}\right) \times 100$$



Donde:

- $C_{agua}$  = Concentración de agua en la salida (30%)
- $C_{entrada}$  = Concentración de agua en la entrada (50%)

$$\eta = \left(1 - \frac{30}{50}\right) \times 100 = 40\%$$

Una eficiencia del 40% es **insuficiente** para operaciones óptimas, ya que el objetivo mínimo debería ser del 90%.

#### **Recomendaciones:**

- Reemplazar los internos del separador (baffles, coalescentes) para mejorar la eficiencia de separación.
- Implementar un sistema de control automático del nivel de líquido para optimizar la operación.

#### **e) Tanques de almacenamiento (operativos)**

Los tanques de almacenamiento son la última etapa en el proceso de producción antes del transporte del crudo. Actualmente están operativos, pero se ha identificado la necesidad de revisar las válvulas de seguridad para garantizar su correcto funcionamiento.

#### **Cálculo de la capacidad de almacenamiento:**

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Donde:

- $r$  = Radio del tanque (5 m)
- $h$  = Altura del tanque (10 m)

$$V = \pi \cdot (5)^2 \cdot 10 = 785.4m^3$$

Esto equivale a aproximadamente **4,940 barriles** por tanque, lo cual es suficiente para la producción actual, pero se recomienda optimizar la gestión del almacenamiento para evitar acumulación excesiva de crudo en caso de paradas no programadas.

#### **Recomendaciones:**

- Realizar pruebas de integridad estructural en las paredes y el fondo de los tanques.
- Verificar la funcionalidad de las válvulas de alivio de presión para evitar riesgos de sobrepresión.

#### **Conclusiones del análisis técnico**

El análisis detallado del proceso actual en el Pozo Pindo-25 revela varios **puntos críticos** que afectan la eficiencia de la producción de crudo:

- La falta de un **sistema de calentamiento en línea (HIT)** que inyecte calor directamente al pozo, contribuye a la acumulación de parafinas y al aumento de la viscosidad del crudo.
- El **manifold de producción** requiere reemplazo urgente debido a problemas de corrosión interna.
- El **separador de prueba** necesita una actualización para mejorar la eficiencia de la separación de fases.
- Se recomienda una **estrategia integral de mantenimiento**

### **1.2. Diseño**

La etapa de diseño es un componente crítico en el desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería, ya que establece las bases técnicas y operativas que guiarán la implementación de las soluciones

propuestas, en el contexto de la optimización del Pozo Pindo-25, esta fase tiene como objetivo principal definir con precisión los sistemas, equipos y procesos que permitirán mejorar la eficiencia en la extracción de crudo, reducir costos operativos, y maximizar la producción de manera sostenible.

El diseño abarca tanto el análisis de las condiciones actuales del pozo como la planificación detallada de las soluciones técnicas que se implementarán, se enfoca en dos propuestas:

**a. Sistema de calentamiento en línea (HIT):**

Su objetivo es reducir la viscosidad del crudo mediante el incremento controlado de la temperatura en el pozo, mejorando así el flujo a través de las tuberías de producción, esto se logra mediante la integración de calentadores eléctricos, sensores de temperatura, y un sistema de control automatizado.

**b. Optimización del sistema de bombeo electro-sumergible (BES) más inyección de químicos:**

Busca mejorar la eficiencia energética y operativa del sistema de bombeo a través del control dinámico de la velocidad del motor, utilizando variadores de frecuencia (VFD), sistemas de automatización basados en PLC para un monitoreo y ajuste en tiempo real, así como la inyección de químicos directamente en el pozo para optimizar el levantamiento.

Durante esta fase, se realizarán cálculos de dimensionamiento, se definirán las especificaciones técnicas de los equipos, se analizarán las propiedades de fluidos, y se desarrollarán los planos de

ingeniería y los diagramas de control necesarios para la correcta implementación del proyecto. Además, se seleccionarán los materiales y tecnologías más adecuados, considerando factores como la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad.

La etapa de diseño no solo se centra en la definición de los componentes físicos, sino también en la programación de los sistemas de control que garantizarán una operación segura y eficiente.

En resumen, esta fase proporciona un enfoque integral que garantiza que cada aspecto del proyecto esté cuidadosamente planificado, optimizado y preparado para una ejecución exitosa en campo.

### ***1) Diseño del sistema de calentamiento en línea (HIT)***

#### **a) Análisis técnico del HIT**

El crudo extraído del Pozo Pindo-25 presenta una **alta viscosidad, sus características** y debido a su naturaleza pesada y a las bajas temperaturas del entorno operativo, esta condición provoca obstrucciones en las tuberías, incremento en el consumo de energía del sistema de bombeo, y la acumulación de depósitos de parafinas que afectan la producción.

El diseño del HIT se basa en los siguientes principios:

- **Transferencia de calor eficiente:** Uso de calentadores eléctricos de inmersión para calentar el crudo directamente en la línea de flujo.
- **Control automatizado de la temperatura:** Integración de sensores de temperatura y un controlador lógico programable (PLC) para mantener condiciones estables.
- **Optimización energética:** Diseño del sistema para minimizar el consumo de energía mientras se alcanza la temperatura de operación deseada.

#### **b) Análisis de propiedades de fluidos**

## Movilidad asociada a la viscosidad y densidad de la mezcla de fluidos

La movilidad ( $M$ ) de un fluido en el yacimiento está directamente relacionada con su viscosidad ( $\mu$ ) y la permeabilidad ( $k$ ) del medio poroso, y se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$M = \frac{k}{\mu}$$

Donde:

- $M$  = Movilidad del fluido ( $\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
- $K$  = Permeabilidad del medio poroso ( $\text{m}^2$ )
- $\mu$  = Viscosidad del fluido ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

El análisis muestra cómo la **viscosidad** y la **densidad** del crudo varían con la temperatura. A medida que la temperatura aumenta de 25°C a 100°C, la viscosidad disminuye de 1500 cP a 200 cP, lo cual mejora significativamente la movilidad del crudo, facilitando su flujo hacia la superficie. Simultáneamente, la **densidad** del crudo disminuye de 920 kg/m<sup>3</sup> a 820 kg/m<sup>3</sup> debido a la expansión térmica.

## Características de los fluidos

El petróleo crudo está compuesto por una mezcla compleja de hidrocarburos y otros compuestos como asfaltenos, parafinas, agua y gases disueltos, los principales fluidos presentes incluyen:

- **Crudo pesado:** Altamente viscoso con una tendencia a formar depósitos de parafinas y asfaltenos.

- **Agua de formación:** Presente en emulsiones con el crudo, afectando la viscosidad aparente.
- **Gases disueltos:** Metano, etano, propano, que influyen en la presión de saturación y la densidad del crudo.

### **Características de los fluidos presentes en el crudo del pozo Pindo-25**

El crudo del Pozo Pindo-25 es un crudo pesado con características específicas que afectan su comportamiento en el yacimiento y durante el proceso de extracción, a continuación, se describen las principales propiedades del fluido para su análisis.

#### **Viscosidad ( $\mu$ )**

La **viscosidad** es una de las propiedades más críticas, ya que determina la resistencia del fluido al flujo, en el caso del Pindo-25, la viscosidad es alta debido al contenido de asfaltenos y parafinas.

- **Viscosidad actual:** ~500 cP a temperatura de fondo de pozo (~40°C).
- **Viscosidad reducida tras inyección de calor:** ~200 cP a 80°C.

Este comportamiento justifica la implementación del sistema HIT, ya que el incremento de temperatura reduce exponencialmente la viscosidad.

#### **Densidad ( $\rho$ )**

La **densidad** del crudo de Pindo-25 varía entre **920 y 950 kg/m<sup>3</sup>**, lo cual lo clasifica como crudo pesado, la densidad disminuye con el aumento de temperatura debido a la expansión térmica.

### Relación Gas-Líquido (RGL o $R_s$ )

El crudo contiene **gases disueltos**, principalmente metano y etano, que afectan la presión de saturación, la liberación de estos gases al reducir la presión mejora la producción inicial, pero disminuye con el tiempo.

### Relación gas-líquido del pozo Pindo-25

Tabla 13. Relación gas-liquido vs temperatura

| Presión (psia) | Temperatura (°F) | Relación Gas-Líquido |
|----------------|------------------|----------------------|
| 2000           | 104              | 13.249177298672148   |
| 1500           | 140              | 6.781047902491714    |
| 1000           | 176              | 3.2253519936193005   |
| 500            | 212              | 1.1341431201980425   |

### Presión de Saturación ( $P_{sat}$ )

Esta propiedad indica la presión a la cual los gases disueltos comienzan a liberarse del crudo, en el Pindo-25, la baja presión de saturación limita la capacidad de flujo natural.

Tabla 14. Presión de saturación del pozo

|   | Presión (psia) | Temperatura (°F) | Relación Gas-Líquido (SCF/STB) | Presión de Saturación (psia) |
|---|----------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1 | 2000           | 104              | 13.249177298672148             | 276.3185866013495            |
| 2 | 1500           | 140              | 6.781047902491714              | 170.8951179560404            |
| 3 | 1000           | 176              | 3.2253519936193005             | 99.4563025452535             |
| 4 | 500            | 212              | 1.1341431201980425             | 45.04510752925338            |

### Formación de Asfaltenos y Parafinas

- **Asfaltenos:** Tienen una alta tendencia a precipitarse en presencia de cambios de presión y temperatura, lo que causa bloqueos en las tuberías.
- **Parafinas:** Se solidifican a temperaturas menores a 40°C, formando depósitos que reducen el diámetro de flujo.

### Impacto de la inyección de calor en el comportamiento de los fluidos

La **inyección de calor** reduce la viscosidad del crudo, facilitando su transporte y mejorando la eficiencia del sistema de levantamiento artificial. A medida que la temperatura aumenta:

**Disminución de la viscosidad:** Mejora el flujo del crudo, reduciendo la resistencia hidráulica en las tuberías.

**Reducción de la densidad:** Aumenta la eficiencia del bombeo, ya que se requiere menos energía para levantar el fluido.

**Mejora de la movilidad:** La movilidad del crudo aumenta exponencialmente, optimizando la extracción.



Estos efectos se ilustran en los gráficos, donde se observa cómo la viscosidad y la densidad disminuyen con el aumento de la temperatura, mientras que la movilidad mejora significativamente. Esto demuestra la efectividad de la inyección de calor en la optimización de la producción en el pozo Pindo-25.

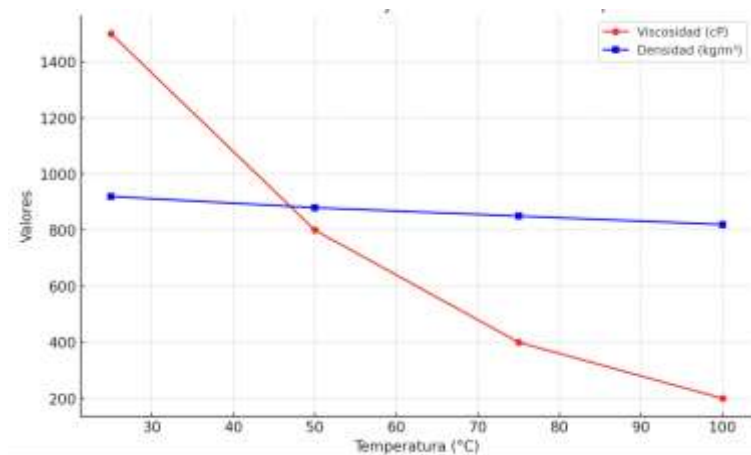


Figura 8. Variación de viscosidad y densidad con la temperatura

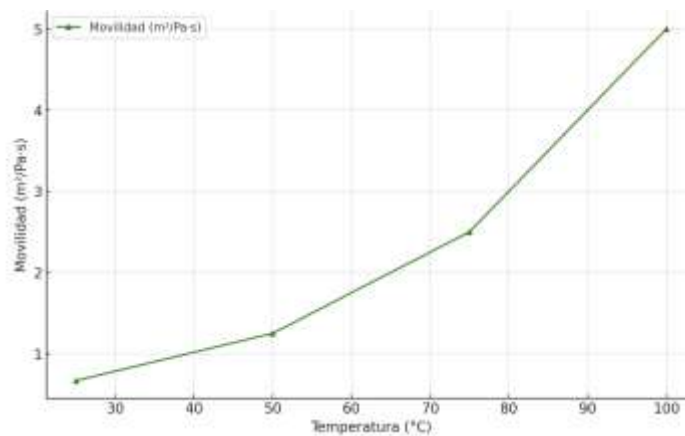


Figura 9. Variación de la movilidad con la temperatura

## b) Cálculo de la carga térmica del HIT

El cálculo de la carga térmica necesaria para calentar el crudo se realiza utilizando la fórmula básica de transferencia de calor:

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

Donde:

- $Q$  = Carga térmica (kW)
- $m$  = Caudal másico del crudo (kg/s)
- $Cp$  = Capacidad calorífica del crudo ( $\sim 2.1$  kJ/kg·K)
- $\Delta T$  = Diferencia de temperatura deseada (°C)

#### **Parámetros Iniciales:**

- **Caudal de producción ( $m$ )** = 4 kg/s
- **Capacidad calorífica del crudo ( $Cp$ )** = 2.1 kJ/kg·K
- **Incremento de temperatura ( $\Delta T$ )** = 25°C (de 35°C a 60°C)

Cálculo:

$$Q = 4kg/s \times 2.1kJ/kg \cdot K \times 25^{\circ}C$$

$$Q = 210kW$$

Se añade un margen de seguridad del 20% para compensar pérdidas térmicas en la tubería:

$$Q_{final} = 210kW \times 1.2 = 252kW$$

**Resultado:** Se selecciona un calentador eléctrico de **250 kW** para cumplir con los requisitos del sistema.

## **2) *Proceso de diseño del sistema HIT***

### **a) Evaluación de condiciones operativas**

Se realiza un análisis detallado de las condiciones actuales del pozo y de la infraestructura de producción para definir los requerimientos específicos del sistema HIT, esto incluye:

- **Medición de la temperatura del crudo en diferentes puntos del sistema** para identificar las zonas críticas de pérdida de calor.
- **Evaluación de la viscosidad del crudo** en función de la temperatura para determinar la temperatura óptima de operación.
- **Análisis de la infraestructura existente**, incluyendo el estado de las tuberías y la capacidad eléctrica disponible para soportar el calentador.

#### **Herramientas utilizadas:**

- **Termómetros digitales de precisión** para medición de temperatura en campo.
- **Viscosímetro rotacional** para pruebas de laboratorio de la viscosidad del crudo.
- **Cámara térmica infrarroja** para identificar pérdidas de calor en la infraestructura de superficie.

#### **Personal involucrado:**

- **Ingeniero de producción:** Responsable de definir los requisitos de operación del sistema.
- **Ingeniero de procesos:** Encargado del análisis térmico y de la selección de equipos.
- **Técnico de campo:** Asistente en la instalación de sensores y en la recolección de datos.
- **Especialista en energía:** Responsable del análisis de la capacidad eléctrica disponible para el HIT.

#### **b) Selección de Equipos**

##### **Calentador de inmersión eléctrico:**

- **Potencia:** 250 kW

- **Material:** Acero inoxidable 316L (resistente a la corrosión y altas temperaturas)
- **Voltaje de operación:** 440V AC
- **Protección:** Certificación ATEX para operación en ambientes con riesgo de explosión
- **Control:** Termostato integrado para regulación automática de la temperatura

**Sensores de temperatura (PT100):**

- **Rango de operación:** -50°C a 200°C
- **Precisión:**  $\pm 0.1^\circ\text{C}$
- **Tipo:** Clase A, con encapsulado de acero inoxidable para ambientes agresivos

**Controlador lógico programable (PLC):**

- **Modelo:** Siemens S7-1200
- **Capacidad:** Múltiples entradas y salidas analógicas/digitales
- **Funciones:** Control del encendido/apagado del calentador, monitoreo de la temperatura, gestión de alarmas
- **Integración:** Compatible con sistemas SCADA para monitoreo remoto

**Aislamiento térmico para tuberías:**

- **Material:** Lana de vidrio de alta densidad, recubierta con aluminio
- **Espesor:** 50 mm para minimizar pérdidas de calor
- **Temperatura máxima de operación:** 250°C

### 3) *Diseño del sistema de control automático*

#### a) ¿Cómo se hará?

El sistema de control automatizado estará basado en un PLC Siemens S7-1200, encargado de la gestión del calentador eléctrico y del monitoreo continuo de la temperatura del crudo. La lógica de control estará diseñada para:

**Monitoreo de temperatura en tiempo real:**

- Los sensores PT100 medirán la temperatura en la entrada y salida del calentador.
- El PLC recopilará los datos de temperatura y los comparará con los valores de referencia predefinidos.

**Control del calentador:**

- Si la temperatura del crudo cae por debajo del umbral mínimo (35°C), el PLC activará el calentador.
- El calentador permanecerá encendido hasta alcanzar la temperatura objetivo (60°C), momento en el cual el PLC lo apagará automáticamente.
- En caso de sobrecalentamiento (>70°C), el sistema activará una alarma y desconectará el calentador por seguridad.

**Gestión de alarmas y seguridad:**

- El PLC generará alarmas visuales y sonoras en caso de fallos del sensor, sobrecalentamiento o problemas eléctricos.
- Se incluirá un botón de **paro de emergencia** para situaciones críticas.

**Interfaz hombre-máquina (HMI):**

- Se instalará una pantalla táctil para la visualización en tiempo real de la temperatura, el estado del sistema, y el historial de alarmas.

- Los operadores podrán ajustar los parámetros de control y consultar los registros históricos.

**b) Herramientas utilizadas:**

- **Simuladores de PLC (PLCSIM):** Para pruebas virtuales de la lógica de control antes de la implementación.
- **AutoCAD Electrical:** Para la elaboración de diagramas eléctricos del sistema de control.

**c) Personal involucrado:**

- **Ingeniero de Automatización:** Responsable de la programación del PLC y la configuración del HMI.
- **Ingeniero Eléctrico:** Encargado del diseño del sistema de alimentación eléctrica del calentador.
- **Técnico de Instrumentación:** Asistente en la instalación de sensores y equipos de control.
- **Especialista en Seguridad Industrial:** Responsable de la validación de los sistemas de protección y alarmas.

**d) Elaboración de planos y diagramas**

Se desarrollan los siguientes documentos técnicos:

**Diagrama de flujo de proceso (PFD):** Representación esquemática del sistema HIT, mostrando la ubicación del calentador, sensores, y válvulas de control.

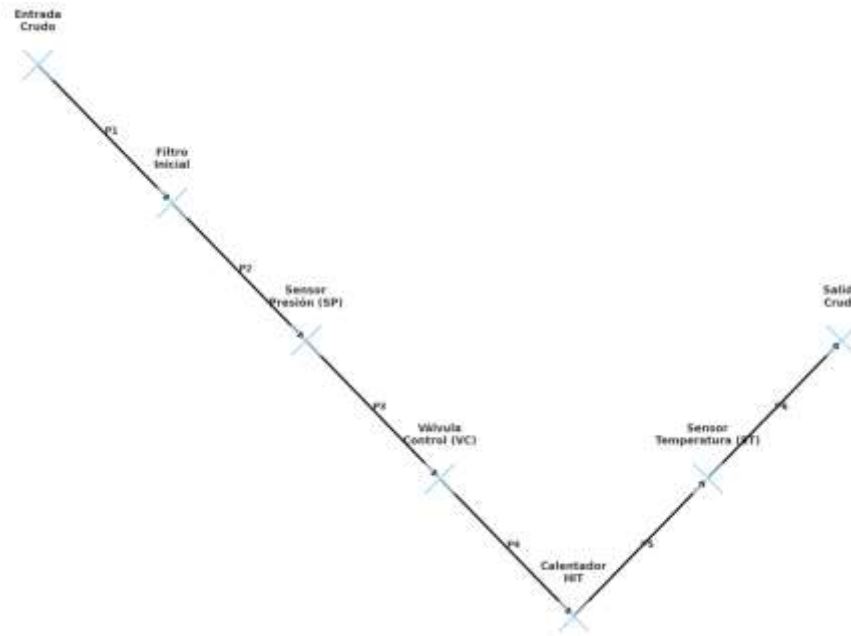


Figura 10. Diagrama de flujo de proceso

**Plano de instalación mecánica:** Detalla la disposición física del calentador en la línea de producción, así como el sistema de soportes y anclajes.

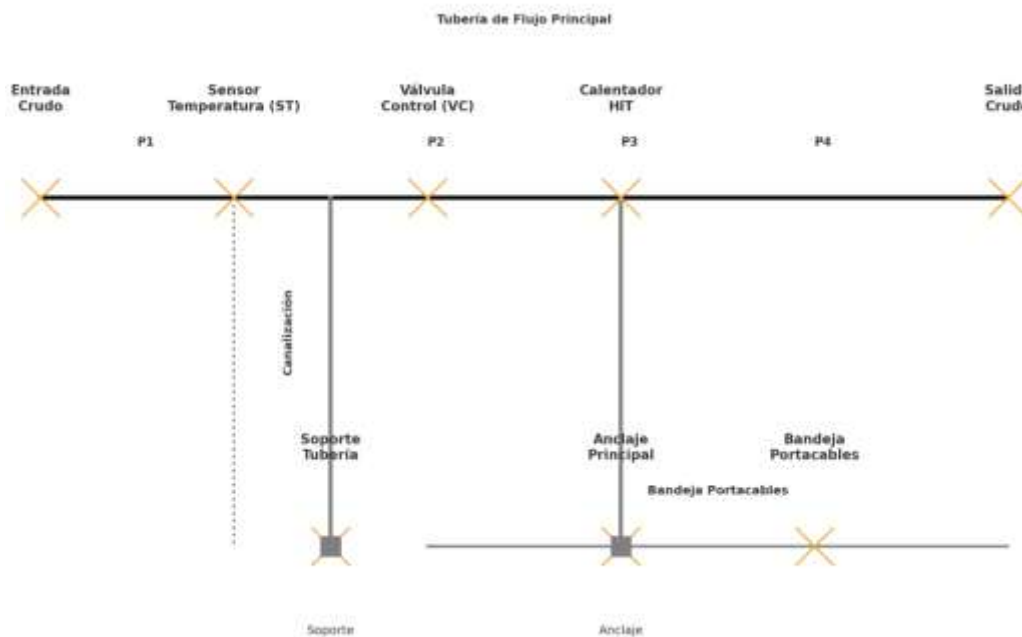


Figura 11. Plano de instalación mecánica

**Diagrama unifilar eléctrico:** Muestra la conexión eléctrica del calentador, el PLC, y los dispositivos de protección.

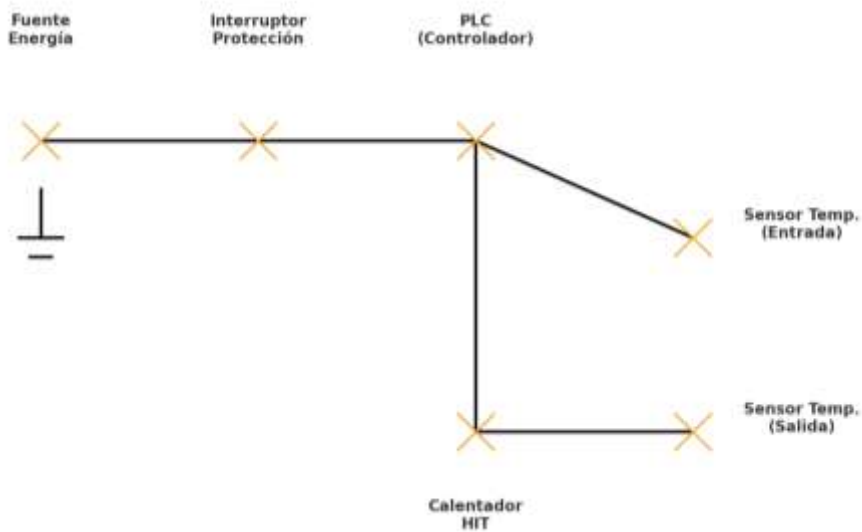


Figura 12. Diagrama unifilar eléctrico

### e) Simulación y validación del diseño

Antes de la implementación en campo, se realizará una simulación del sistema de control para validar la lógica de operación y garantizar su fiabilidad.

#### a. Pruebas de lógica de control (FAT - Factory Acceptance Test):

- Simulación del comportamiento del sistema en diferentes escenarios de operación.
- Verificación del correcto funcionamiento de alarmas, secuencias de encendido/apagado y respuesta a fallos.

#### b. Pruebas de comunicación:

- Validación de la transmisión de datos entre el PLC, el HMI, y el sistema SCADA.
- Pruebas de integridad de la red de comunicación industrial (Profinet o Modbus).



**c. Optimización de parámetros de control:**

- Ajuste de los puntos de consigna de temperatura y los umbrales de activación de alarmas para maximizar la eficiencia energética.

**4) *Inyección de Calor en el Pozo (Sistema HIT)***

**a) Método de inyección de calor**

El sistema de calentamiento en línea (HIT) para el Pozo Pindo-25 está diseñado para aportar calor directamente en el interior del pozo, optimizando la movilidad del crudo pesado y mejorando la eficiencia del bombeo electro-sumergible (BES), el método seleccionado para la inyección de calor es el **calentamiento eléctrico directo (Direct Electric Heating - DEH)**, que utiliza sondas eléctricas de alta resistencia térmica instaladas a lo largo de la columna de producción.

**b) Principio de funcionamiento**

El calor se genera mediante la resistencia eléctrica de cables calefactores, los cuales convierten la energía eléctrica en energía térmica cuando una corriente eléctrica pasa a través de ellos, este calor se transfiere por conducción hacia el crudo circundante, reduciendo su viscosidad y mejorando su flujo hacia la superficie.

**c) Equipos utilizados en el sistema HIT**

El sistema HIT está compuesto por los siguientes equipos clave:

- **Sondas de Calentamiento Eléctrico (EHT - Electric Heating Tubes):**  
Cables calefactores de alta resistencia, recubiertos con materiales aislantes resistentes a la

corrosión y altas temperaturas. Están diseñados para soportar presiones extremas y condiciones químicas agresivas propias del crudo pesado del pozo.

- **Unidad de Control de Potencia (PCU - Power Control Unit):**  
Regula la cantidad de energía eléctrica suministrada a las sondas calefactoras. Permite ajustar la temperatura de operación según las condiciones del pozo, optimizando el consumo energético.
- **Sensores de Temperatura (RTD - Resistance Temperature Detectors):**  
Dispuestos en puntos estratégicos a lo largo de la columna de producción para monitorear la temperatura en tiempo real, asegurando un control preciso del proceso de calentamiento.
- **Aislantes Térmicos**  
Materiales que recubren la tubería de producción para minimizar la pérdida de calor hacia el entorno y garantizar que la mayor parte del calor generado se transfiera al crudo.
- **Transformadores y Equipos de Seguridad:**  
Transformadores eléctricos para ajustar el voltaje requerido por el sistema y dispositivos de seguridad para prevenir sobrecalentamientos o fallos eléctricos.

### **c) Ubicación de la inyección de calor en el sistema**

El calor se inyectará directamente en el **pozo de producción**, específicamente en la **zona de la columna de producción**, desde la superficie hasta la cercanía de la bomba electro-sumergible (BES), la disposición del sistema será la siguiente:

- **Zona de Inyección**

Las sondas de calentamiento se instalarán **paralelas a la tubería de producción**,

abarcando desde la profundidad de aproximadamente **500 metros hasta los 1500 metros**, dependiendo de la configuración específica del pozo.

- **Puntos Críticos:**

- **Cerca de la entrada de la bomba BES:** Para reducir la viscosidad del crudo antes de que entre en la bomba, disminuyendo la carga de trabajo del equipo.
- **En tramos con mayor acumulación de parafinas y asfaltenos:** Para evitar bloqueos y garantizar un flujo continuo.
- **En zonas de baja temperatura del pozo:** Donde se espera que la viscosidad sea más alta.

- **Distribución del Calor:**

La energía térmica se distribuye de manera uniforme a lo largo del pozo, creando un **gradiente térmico controlado** que favorece la movilidad del crudo desde el fondo del pozo hacia la superficie.

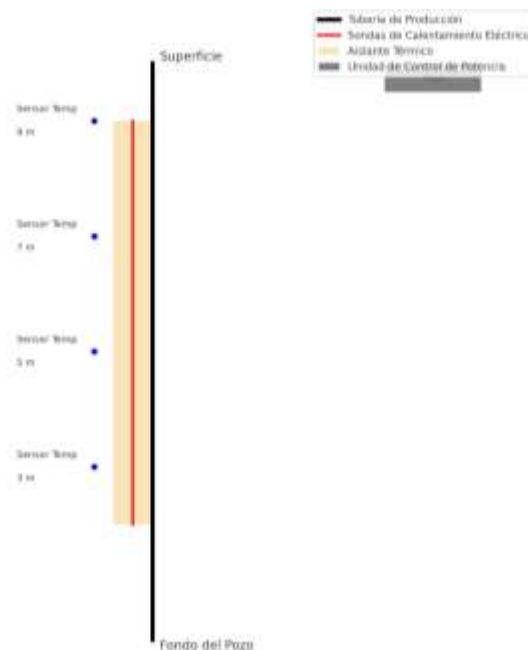


Figura 13. Diagrama del sistema de inyección de calor HIT

#### **d) Ciclo de operación**

##### **1. Activación del Sistema:**

La unidad de control de potencia enciende el sistema según parámetros predefinidos de temperatura y flujo.

##### **2. Generación de Calor:**

Las sondas EHT comienzan a generar calor por resistencia eléctrica.

##### **3. Transferencia de Calor:**

El calor se transfiere directamente al crudo, disminuyendo su viscosidad.

##### **4. Monitoreo en Tiempo Real:**

Los sensores RTD envían datos a la unidad de control para ajustar automáticamente la potencia según la temperatura detectada.

##### **5. Optimización de la Producción:**

Con el crudo más fluido, la bomba BES opera de manera más eficiente, aumentando la producción y reduciendo el desgaste mecánico.

#### **d) Resumen del proceso de diseño**

El Sistema de Inyección de Calor (HIT) para el Pozo Pindo-25 se basa en el uso de calentamiento eléctrico directo (DEH), que permite la transferencia eficiente de calor directamente en el pozo, mejorando la movilidad del crudo pesado caracterizado por su alta viscosidad (~500 cP) y un contenido elevado de agua y sólidos (20-30% BSW), este proceso reduce la formación de asfaltenos y parafinas, optimizando la extracción, el sistema HIT está compuesto por sondas de

calentamiento eléctrico (EHT) instaladas a lo largo de la columna de producción, una unidad de control de potencia (PCU) que regula la energía suministrada, sensores de temperatura (RTD) para el monitoreo en tiempo real y aislantes térmicos para minimizar la pérdida de calor.

El sistema de control automático gestiona la operación de las EHT ajustando la potencia eléctrica en función de las lecturas de temperatura y presión, este control se realiza mediante sensores conectados a la PCU, que permiten activar o desactivar los ciclos de calentamiento de forma precisa, manteniendo condiciones óptimas; además, incluye mecanismos de seguridad que interrumpen el flujo eléctrico en caso de sobrecalentamiento o variaciones críticas de presión, el diseño se complementa con el análisis de la viscosidad del crudo en función de la temperatura, mediante la ecuación de Andrade, y la movilidad del fluido, determinada por la relación entre la permeabilidad y la viscosidad, los resultados proyectan una reducción significativa en la viscosidad, mayor eficiencia del sistema de bombeo electro-sumergible (BES) y un incremento en la producción, optimizando la operación del pozo de forma sostenible y eficiente.

## **5) *Diseño del sistema de optimización del BES e inyección de químicos***

### **a) Análisis técnico del BES**

El BES está compuesto por un motor sumergible, una bomba centrífuga de múltiples etapas, un separador de gas, y un sistema de control en superficie, en el Pozo Pindo-25, la operación del BES enfrenta desafíos debido a:

- **Alta variabilidad en la demanda de producción**, lo que provoca un funcionamiento ineficiente.

- **Consumo energético elevado**, debido a la falta de control dinámico de la velocidad del motor.
- **Desgaste prematuro de componentes**, como resultado de operaciones en condiciones fuera de los parámetros óptimos.

Para abordar estos problemas, se propone la implementación de un **Variador de Frecuencia (VFD)** para el control de la velocidad del motor y la automatización del proceso de bombeo.

## **b) Análisis nodal del BES**

El análisis nodal del sistema de bombeo electro-sumergible (BES) permite evaluar el comportamiento del pozo Pindo-25 bajo la influencia del sistema de inyección de calor (HIT), este análisis considera cómo varían parámetros clave como la presión de fondo fluyente (PIP), la presión de succión, la densidad del crudo y la presión hidrostática en función de la temperatura, lo cual es fundamental para optimizar la producción de crudo pesado.

### **Interpretación del Análisis Nodal**

El análisis nodal consiste en identificar la intersección entre la curva de inyección (capacidad del sistema de bombeo) y la curva de producción (respuesta del pozo), los puntos de intersección representan el equilibrio entre la oferta del sistema BES y la demanda del pozo, determinando así la eficiencia operativa.

- **Curva de Producción:** Depende de la presión de fondo fluyente (PIP) y la densidad del crudo, que se reducen con el aumento de la temperatura.

- **Curva de Inyección:** Relacionada con la capacidad del BES para manejar el flujo, influenciada por la presión de succión y la viscosidad del crudo.

### **Resultados del Análisis Nodal**

A medida que la temperatura aumenta de 40°C a 100°C:

- **La PIP disminuye de 8.39 bar a 7.59 bar**, lo que facilita el flujo del crudo hacia la superficie.
- **La presión de succión baja de 6.52 bar a 5.91 bar**, reduciendo el esfuerzo del BES para mantener el caudal.
- **La densidad del crudo disminuye de 950 kg/m<sup>3</sup> a 860 kg/m<sup>3</sup>**, lo que mejora la movilidad del fluido y la eficiencia del levantamiento artificial.

Estos cambios permiten identificar el punto óptimo de operación del BES, donde se maximiza la producción con el menor consumo de energía.

### **Interpretación Gráfica**

En el siguiente grafico se muestra cómo varían estos parámetros con la temperatura, la disminución de la PIP y la presión de succión con el incremento de temperatura indica una mejora en la eficiencia del BES, ya que el crudo fluye con menos resistencia y el sistema de bombeo requiere menos energía para mantener la producción.

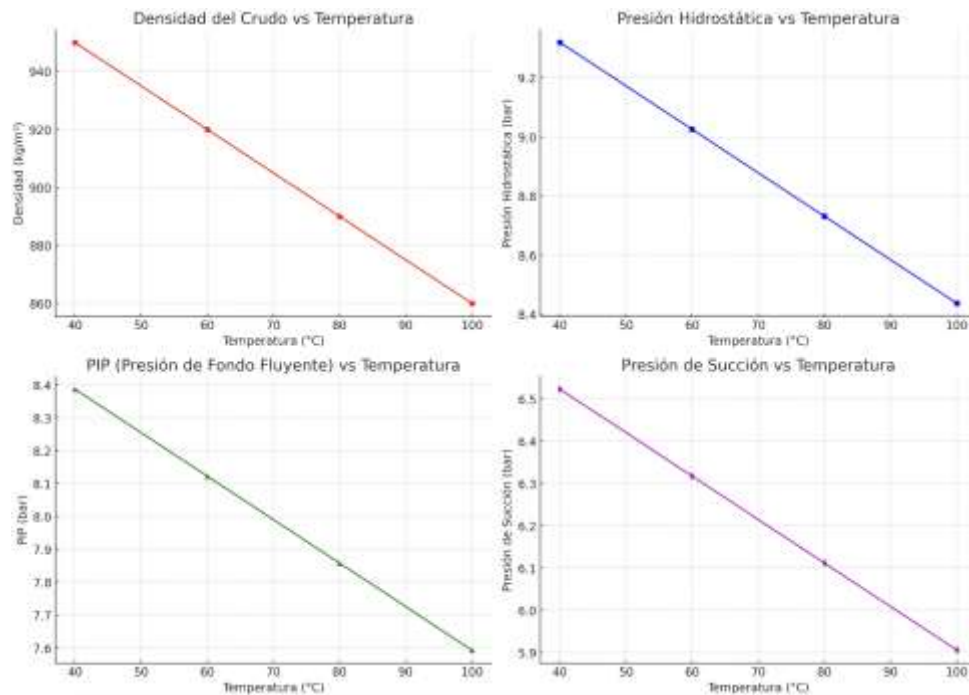


Figura 14. Interpretación del análisis nodal

### c) Cálculo de eficiencia energética

El rendimiento del BES se mide a través de la **eficiencia energética**, calculada con la fórmula:

$$\eta = \left( \frac{P_{hidráulica}}{P_{eléctrica}} \right) \times 100$$

Donde:

- $P_{hidráulica}$  = Potencia hidráulica (W)
- $P_{eléctrica}$  = Potencia eléctrica consumida (W)

La potencia hidráulica se determina mediante:

$$P_{hidráulica} = Q \times \Delta P$$

- $Q$  = Caudal de producción (m³/s)
- $\Delta P$  = Diferencia de presión entre la entrada y la salida de la bomba (Pa)



Ejemplo de Cálculo:

- **Caudal ( $Q$ )** = 20 m<sup>3</sup>/día = 0.00023 m<sup>3</sup>/s
- **Diferencia de presión ( $\Delta P$ )** = 1000 kPa = 10<sup>6</sup> Pa
- **Potencia eléctrica ( $P_{eléctrica}$ )** = 50 kW = 50,000 W

$$P_{hidráulica} = 0.00023 \text{ m}^3/\text{s} \times 10^6 \text{ Pa} = 230 \text{ W}$$

$$\eta = \left( \frac{230}{50000} \right) \times 100 = 0.46\%$$

Esta eficiencia es muy baja, lo que indica un gran potencial de mejora mediante la optimización del control del BES.

## 6) *Proceso de diseño del sistema de optimización del BES*

### a) Evaluación del sistema actual

Se realiza un levantamiento de información en campo para obtener datos precisos sobre el rendimiento actual del BES, esto incluye:

- **Mediciones de consumo eléctrico**, utilizando analizadores de energía trifásicos.
- **Análisis de vibraciones**, para identificar problemas mecánicos en el motor y la bomba.
- **Monitoreo de caudal y presión**, mediante sensores temporales de alta precisión.
- **Revisión de condiciones de operación**, incluyendo temperaturas de operación y características del fluido producido.

**herramientas utilizadas:**

- **Analizador de Energía Fluke 435** para mediciones eléctricas.
- **Acelerómetro triaxial** para análisis de vibraciones.

- **Manómetros digitales y caudalímetros electromagnéticos** para monitoreo de presión y caudal.

## **b) Definición de requerimientos operativos**

A partir de los datos obtenidos, se definen los parámetros de operación óptimos para el BES:

- **Caudal objetivo:** 18-22 m<sup>3</sup>/día
- **Presión de operación:** 800-1200 kPa
- **Eficiencia energética mínima esperada:** 5% (objetivo de mejora respecto al 0.46% actual)

Se determinan las necesidades de control dinámico de la velocidad del motor para adaptarse a las variaciones en la demanda de producción, lo que permitirá reducir el consumo energético y optimizar la extracción de crudo.

## **d) Selección de equipos**

### **Variador de Frecuencia (VFD) - 50 kW**

El **Variador de Frecuencia (VFD)** es el componente clave para la optimización del BES, ya que permite el **control dinámico de la velocidad del motor sumergible**, adaptando la potencia requerida a las condiciones de operación del pozo.

### **Especificaciones técnicas:**

- **Capacidad:** 50 kW
- **Tipo:** Control vectorial para motores de inducción trifásicos
- **Frecuencia de operación:** 30 Hz - 60 Hz

- **Funciones avanzadas:**

- Control de velocidad en lazo cerrado para maximizar la eficiencia del bombeo
- Protección contra sobrecargas y cortocircuitos
- Comunicación **Profinet/Modbus** para integración con el sistema **SCADA**
- Arranque suave y regulación automática para evitar estrés mecánico.

**Beneficio esperado:**

- Reducción del **consumo energético en un 30%**.
- Extensión de la **vida útil del motor** al reducir las sobrecargas operativas.
- Mayor estabilidad operativa y reducción de paradas no programadas.

**Motor de Alta Eficiencia (IE3) - 45 kW**

El motor eléctrico sumergible **de alta eficiencia IE3** reemplaza al motor anterior que presentaba sobrecalentamiento y desgaste prematuro.

**Especificaciones técnicas:**

- **Potencia nominal:** 45 kW
- **Clase de eficiencia energética:** IE3 (Alta eficiencia)
- **Material:** Acero inoxidable, resistente a la corrosión y altas temperaturas
- **Sistema de enfriamiento:** Flujo de aceite dieléctrico
- **Protección contra humedad y sólidos:** Certificación IP68

**Beneficio esperado:**

- **Reducción del calentamiento del motor**, disminuyendo fallas mecánicas.
- **Mayor eficiencia energética**, optimizando la conversión de potencia en trabajo útil.
- **Aumento de la confiabilidad operativa**, evitando paradas imprevistas.

### **Bomba Electro-Sumergible (BES) de Alto Rendimiento**

La nueva **bomba centrífuga multietapa** ha sido seleccionada para **manejar crudos pesados** con alto contenido de sólidos, mejorando la eficiencia del levantamiento artificial.

#### **Especificaciones técnicas:**

- **Tipo:** Bomba centrífuga multietapa
- **Material:** Aleación resistente a la abrasión
- **Presión de succión:** 800-1200 kPa
- **Caudal de operación:** 18-22 m<sup>3</sup>/día
- **Eficiencia energética esperada:** 5% (mejora sobre el 0.46% actual).

#### **Beneficio esperado:**

- **Aumento en la producción de crudo en un 100%**, pasando de **90 BPD a 180 BPD**.
- **Menor desgaste por erosión**, gracias al uso de materiales resistentes.
- **Mayor estabilidad operativa**, adaptándose a la variabilidad de presión.

### **Separador de sólidos tipo ciclón**

Para reducir la acumulación de partículas en la bomba y evitar obstrucciones, se instalará un **separador de sólidos tipo ciclón** en la admisión del BES

### **Especificaciones técnicas:**

- **Material:** Acero inoxidable 316L
- **Tamaño de partícula retenida:** 10-50 micras
- **Eficiencia de eliminación de sólidos:** 85%

### **Beneficio esperado:**

- **Reducción de bloqueos en la bomba** y aumento de la continuidad operativa.
- **Disminución de costos de mantenimiento**, evitando limpiezas frecuentes.
- **Protección del motor y la bomba**, al evitar desgaste prematuro.

### **Sensores de monitoreo (presión, caudal y temperatura)**

Se instalarán sensores inteligentes para realizar un **monitoreo en tiempo real** de las condiciones operativas del pozo y optimizar el funcionamiento del BES.

### **Especificaciones técnicas:**

- **Sensores de presión:** Rango 0-5000 psi, precisión  $\pm 0.5\%$
- **Sensores de caudal:** Tecnología ultrasónica sin contacto
- **Sensores de temperatura:** PT100, precisión  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

### **Beneficio esperado:**

- **Prevención de fallas operativas** mediante alertas en tiempo real.
- **Ajustes automáticos en la operación del BES**, optimizando su desempeño.
- **Mejor control del rendimiento del pozo**, aumentando la estabilidad productiva

## **Sistema de inyección de químicos para optimización del BES**

El sistema de inyección de químicos ha sido diseñado para prevenir la acumulación de parafinas y asfáltenos, asegurando un flujo de crudo más estable y reduciendo la carga de trabajo del BES, este sistema se instalará antes del ingreso del fluido a la bomba, garantizando la dispersión efectiva de los aditivos.

### **Especificaciones técnicas:**

#### **Tubo capilar de inyección**

**Material:** Acero inoxidable 316L resistente a la corrosión

**Diámetro interno:**  $\frac{1}{4}$ " –  $\frac{1}{2}$ "

**Longitud:** Configurable según la profundidad del pozo

**Presión de trabajo:** 1500-3000 psi

#### **Bomba dosificadora de químicos**

**Tipo:** Bomba de diafragma con control de caudal

**Capacidad de inyección:** 0.1-5 L/h

**Material del diafragma:** PTFE (Teflón) para compatibilidad química

**Rango de presión:** 5-20 bar

**Control:** Ajuste manual o automatizado con variador de frecuencia

#### **Válvulas de control de inyección**

**Tipo:** Válvula de aguja ajustable

**Material:** Acero inoxidable con recubrimiento anticorrosivo

**Rango de regulación de flujo:** 0.01-5 L/h

### **Tanques de almacenamiento de químicos**

**Material:** Polietileno de alta densidad (HDPE) resistente a productos químicos

**Capacidad:** 500-2000 litros

**Sensor de nivel:** Ultrasonido para monitoreo remoto

### **Sistema de monitoreo y control**

- Sensores de presión en el punto de inyección para evaluar eficiencia
- Sensores de temperatura en la columna de producción
- Controlador automático con integración SCADA
- Registro de datos en tiempo real y ajuste de caudal de inyección

### **Beneficio esperado:**

- Reducción de la acumulación de parafinas y asfáltenos en un 70%, evitando bloqueos en el BES.
- Optimización del consumo energético al reducir la viscosidad del crudo antes del bombeo.
- Menor frecuencia de mantenimiento, aumentando la vida útil del BES.
- Estabilidad en la producción de crudo, asegurando un caudal constante sin interrupciones operativas.

A continuación, se presenta un diagrama comparativo, en el que se plasman los resultados generados antes y después de la optimización del BES con inyección de químicos.

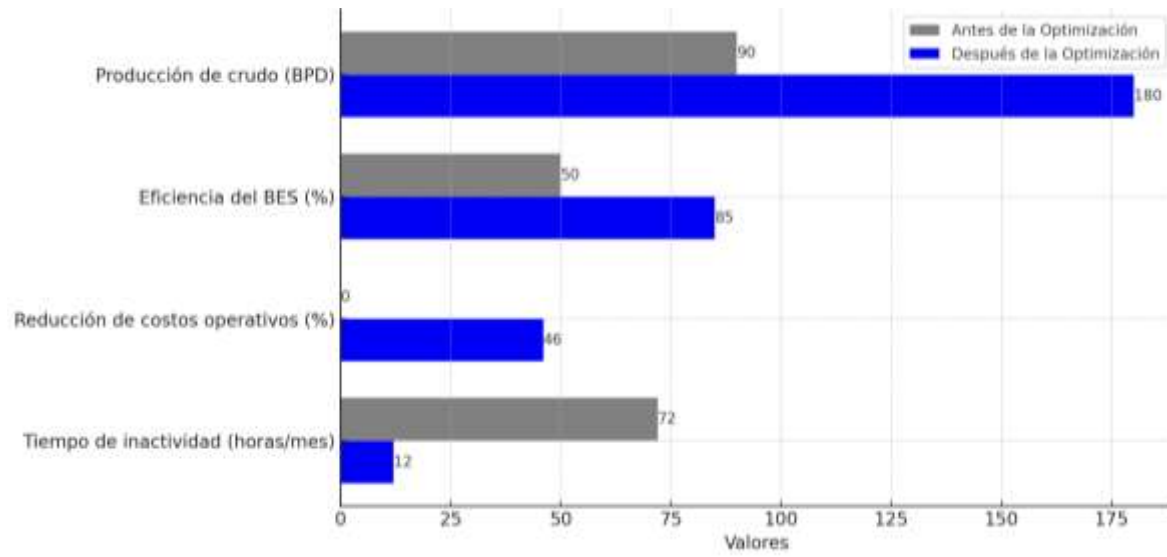


Figura 15. Impacto de la selección de equipos en la optimización del BES

#### d) Desarrollo de diagramas y planos del sistema

Se elaboran los siguientes documentos técnicos:

- **P&ID (Piping and Instrumentation Diagram):** Muestra la disposición de los equipos, tuberías, válvulas, y sensores.



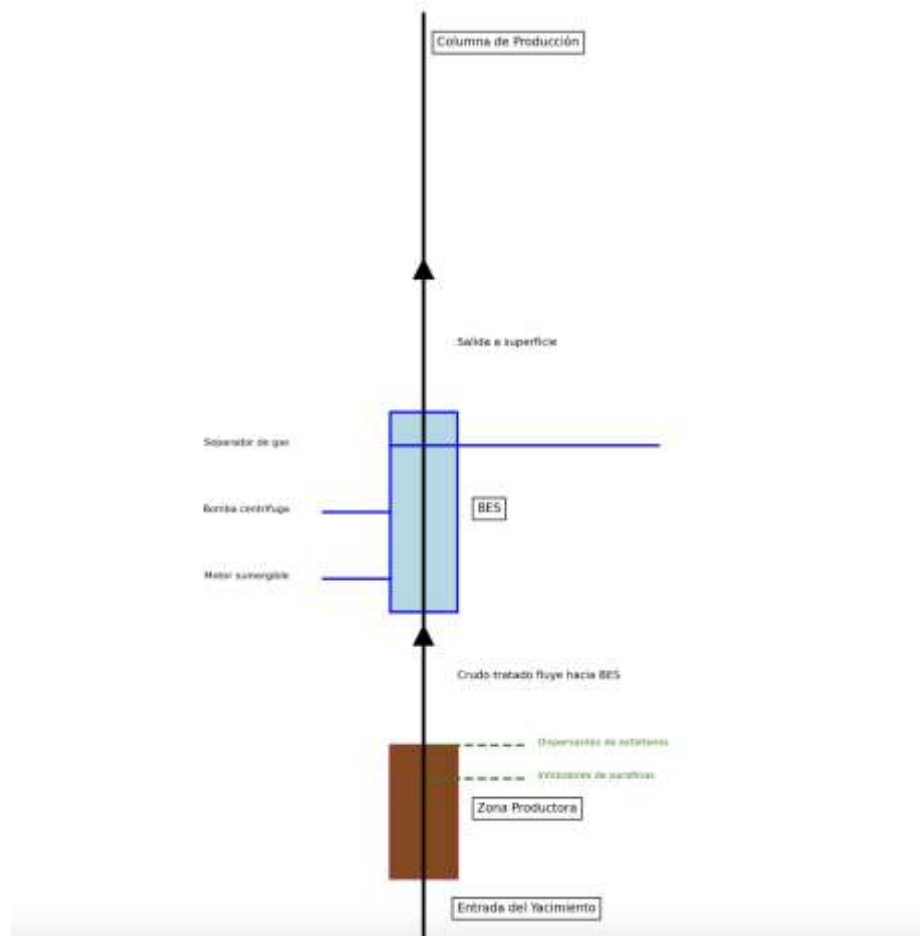


Figura 16. P&ID BES e inyección de químicos

- **Diagrama Unifilar Eléctrico:** Representa las conexiones eléctricas entre el VFD, el motor, y el PLC.

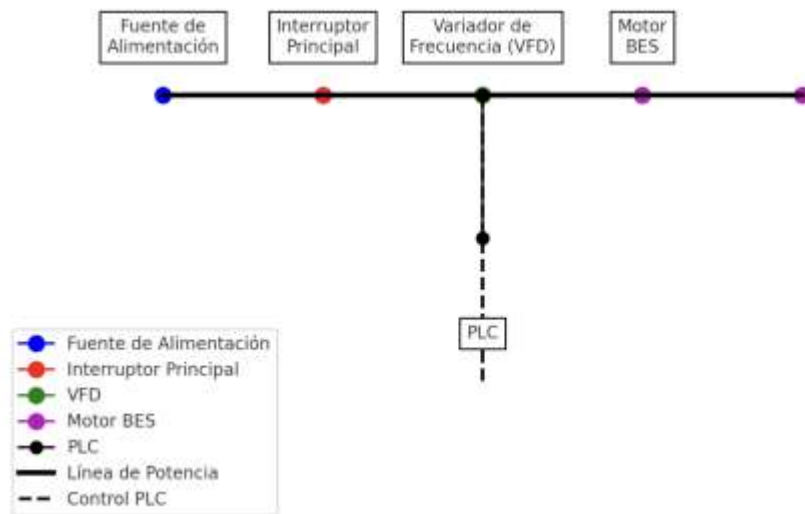


Figura 17. Diagrama unifilar eléctrico BES

- **Planos de Instalación:** Incluyen detalles de la ubicación de los equipos, el cableado, y la infraestructura de soporte.

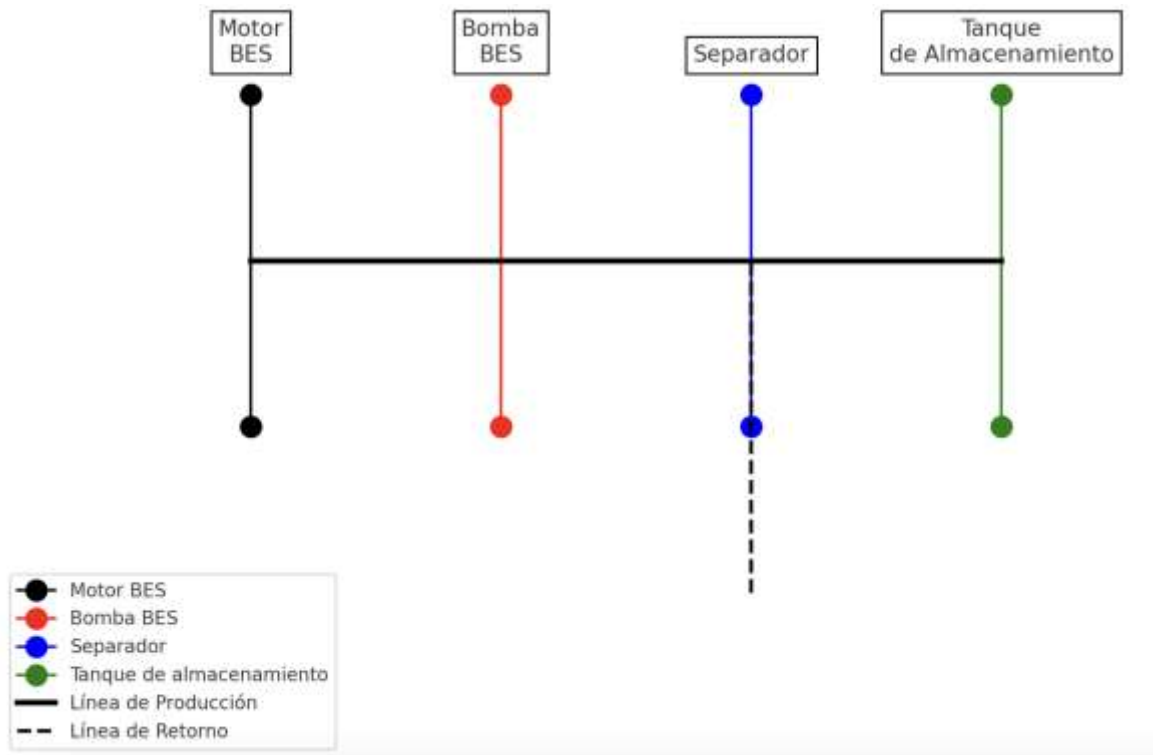


Figura 18. Planos de instalación BES

#### f) Pruebas de simulación y validación del diseño

Antes de la implementación en campo, se realizarán pruebas de simulación para validar el diseño del sistema de control:

##### **Pruebas de comunicación:**

- Validación de la comunicación entre el PLC, el VFD, los sensores y el sistema SCADA.

##### **Análisis de eficiencia energética simulada:**

- Evaluación del impacto esperado en la eficiencia energética del BES tras la implementación de las mejoras.

#### g) Resumen del proceso de diseño

El diseño del **Bombeo Electro-Sumergible (BES)** en el **Pozo Pindo-25** se fundamenta en la necesidad de optimizar la producción y eficiencia operativa, se realizó un análisis del yacimiento para determinar las condiciones del crudo, la presión y la presencia de sólidos. Con base en estos datos, se seleccionaron equipos adaptados a las características del pozo, el **motor sumergible** de alta eficiencia y el **Variador de Frecuencia (VFD)** fueron elegidos para mejorar el rendimiento energético y reducir fallas, se incorporó un **separador de sólidos tipo ciclón** para minimizar la acumulación de partículas y garantizar un flujo continuo, la bomba seleccionada es de tipo **centrífuga multietapa**, optimizada para operar con crudo de alta viscosidad, el diseño del sistema incluyó un **Diagrama de Flujo de Proceso (PFD)** y un **Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID)**, definiendo la disposición de los equipos y conexiones, así mismo, la inyección de químicos es una solución clave para evitar la formación de depósitos en las tuberías y en el sistema BES, se utilizarán inhibidores de parafinas para evitar la cristalización y dispersantes de asfaltenos que reducirán la sedimentación de partículas en la bomba., también se desarrollaron planos de instalación mecánica y eléctrica, asegurando la integración eficiente de los componentes. Con esta optimización, se espera duplicar la producción del pozo, reducir el tiempo de inactividad y disminuir los costos operativos, garantizando una operación más estable y rentable.

### **1.3. Implementación**

#### ***1) Implementación de las propuestas 1 y 2, sistema de calentamiento en línea (HIT) y optimización del sistema de bombeo electrosumergible (BES)***

##### **a) Análisis preliminar del pozo y diagnóstico técnico**

El primer paso en la planificación consistió en realizar un diagnóstico técnico exhaustivo del pozo Pindo-25 y de su infraestructura de superficie previo a la instalación del sistema (HIT), para ello, se recopilaron datos históricos de producción, características del crudo, comportamiento térmico de la línea de flujo, y registros de intervenciones anteriores, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- **Revisión de datos operativos históricos:**

Se analizaron registros de caudal de producción, temperaturas del crudo a diferentes profundidades, presión de operación, y la frecuencia de problemas relacionados con la acumulación de parafinas y asfaltenos.

- **Evaluación de la infraestructura existente:**

Se inspeccionaron visualmente las tuberías de producción, manifolds, y separadores para identificar puntos críticos de pérdida de calor y condiciones que pudieran afectar la instalación del HIT.

Así mismo, para la implementación del sistema (BES), se ejecuto, un análisis exhaustivo del sistema BES existente, se evaluaron datos históricos de operación, se identificaron ineficiencias en la gestión del caudal y la presión, y se realizó un estudio de las condiciones del pozo, los principales problemas detectados fueron:

- Fluctuaciones en la velocidad del motor, lo que provocaba paradas no programadas.
- Ineficiencia energética debido al funcionamiento a velocidad constante, sin considerar la demanda real de producción.

- Acumulación de sólidos en el fondo del pozo, afectando el rendimiento de la bomba.

Con base en este diagnóstico, se definieron los requisitos técnicos para la optimización, estableciendo como prioridades la mejora del control de velocidad, la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real y la automatización de la operación.

- **Análisis de fluidos:**

Se tomaron muestras de crudo para analizar su comportamiento reológico en función de la temperatura, determinando la viscosidad del crudo a diferentes rangos térmicos, lo cual fue esencial para definir la temperatura óptima de operación.

## **b) Definición de requisitos técnicos**

Con base en el diagnóstico, se definieron los requisitos técnicos específicos para el diseño e implementación del HIT, considerando:

- **Requerimientos de calor (carga térmica):**

Se calculó la **carga térmica necesaria** para mantener la temperatura del crudo por encima de 60°C, considerando el caudal de producción, la temperatura ambiental, y las pérdidas de calor en la línea.

- **Fórmula utilizada:**

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T^\circ$$

Donde:

- $Q$  = Carga térmica (kW)
- $m$  = Caudal másico del crudo (kg/s)

- $C_p$  = Capacidad calorífica específica del crudo ( $\sim 2.1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ )
- $\Delta T$  = Diferencia de temperatura deseada ( $^{\circ}\text{C}$ )

Se determinó una **carga térmica de 250 kW**, con un margen de seguridad del 20% para compensar variaciones operativas.

- **Determinación de la ubicación del calentador:**

Se seleccionó el tramo de la tubería donde se registraban mayores pérdidas de temperatura, optimizando la eficiencia del calentador y facilitando el acceso para mantenimiento.

- **Selección de equipos compatibles:**

Se eligieron calentadores eléctricos de inmersión certificados para operaciones en zonas clasificadas, así como sensores de temperatura de alta precisión (PT100) y un PLC de alta confiabilidad para la automatización del sistema.

### c) Gestión de recursos y logística

La fase de planificación incluyó la gestión de recursos materiales y humanos para asegurar que todo estuviera disponible durante la ejecución del proyecto. Las actividades clave fueron:

- **Definición de roles y responsabilidades:**

Se conformó un equipo multidisciplinario que incluyó:

- **Ingeniero de proyectos:** Responsable del diseño y supervisión del proyecto.
- **Ingeniero de instrumentación y control:** Encargado de la programación del PLC y la configuración del sistema de control.

- **Técnicos de campo:** Responsables de la instalación mecánica y eléctrica del sistema.
- **Especialistas en seguridad industrial:** Encargados de garantizar el cumplimiento de normativas de seguridad durante la instalación.
- **Adquisición de equipos y materiales:**

Se establecieron los proveedores para el suministro del calentador, sensores, PLC, materiales de aislamiento térmico, cables eléctricos, y accesorios de instalación.

- **Planificación logística:**

Se organizó el transporte de los equipos al sitio del pozo, considerando las condiciones de acceso en la plataforma Sami Sur, las restricciones de carga, y la disponibilidad de grúas y vehículos especializados para el manejo de equipos pesados.

#### **d) Evaluación de riesgos y plan de mitigación**

Como parte de la preparación, se realizó un análisis de riesgos para identificar posibles problemas durante la instalación y operación del sistema. Los riesgos evaluados incluyeron:

- **Riesgos Mecánicos:** Fugas en las conexiones de la tubería durante la instalación.
- **Riesgos Eléctricos:** Sobrecargas eléctricas o fallos en la conexión del calentador.
- **Riesgos Operacionales:** Fallos en el control de temperatura que podrían llevar al sobrecalentamiento del crudo.



Se elaboró un **plan de mitigación** que incluyó:

- **Procedimientos de seguridad específicos** para trabajos en caliente y manejo de equipos eléctricos.
- **Planes de contingencia** en caso de emergencias, incluyendo equipos de respuesta rápida y personal capacitado en primeros auxilios.
- **Simulacros de seguridad previos** a la ejecución para familiarizar al equipo con los procedimientos de emergencia.

#### **e) Desarrollo de cronograma de ejecución**

Se estableció un cronograma detallado para coordinar las actividades de instalación, programación y puesta en marcha tanto del HIT como del BES, Este cronograma incluyó:

- **Tiempos de entrega de equipos:** Asegurando la disponibilidad de todos los componentes antes del inicio de la instalación.
- **Fases de instalación mecánica y eléctrica:** Programadas en secuencia lógica para optimizar los recursos.
- **Pruebas de funcionalidad y puesta en marcha:** Planificadas al final del proyecto para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

El cronograma también contempló márgenes de tiempo para imprevistos, como demoras en la entrega de materiales o condiciones climáticas adversas

#### **f) Capacitación del personal**

Antes de la puesta en marcha del sistema, se realizó un programa de capacitación para el personal de operación y mantenimiento, que incluyó:

- **Funcionamiento del HIT y BES:** Explicación detallada del principio de operación del calentador y del sistema de control.
- **Operación del PLC y del HMI:** Instrucción sobre cómo interpretar los datos en la interfaz, ajustar parámetros de operación y responder ante alarmas.
- **Procedimientos de seguridad:** Capacitación en el manejo seguro de equipos eléctricos y respuesta ante emergencias.

#### **g) Conclusión de la fase de planificación y preparación**

La fase de planificación y preparación fue clave para el éxito de la implementación de ambos sistemas en el Pozo Pindo-25, gracias a un enfoque integral que combinó análisis técnico, gestión de riesgos, logística eficiente y capacitación del personal, se logró minimizar los riesgos durante la ejecución del proyecto y garantizar un rendimiento óptimo del sistema en su fase operativa, esta preparación meticulosa también contribuyó a reducir los tiempos de instalación y los costos asociados, asegurando un retorno de la inversión más rápido para la operación del pozo..

#### **h) Instalación de equipos en campo (sistema HIT)**

Una vez seleccionados los equipos, se procedió con la instalación en campo, siguiendo un plan detallado para garantizar la integridad del sistema y la seguridad del personal. La instalación se dividió en varias etapas clave:

#### **Preparación del Sitio**

- **Inspección Previa:**

Se realizó una inspección visual de la infraestructura existente para identificar posibles interferencias con la instalación del HIT.

- **Acondicionamiento de la Tubería:**

Limpieza interna y externa de la tubería para eliminar residuos de parafinas y asfaltenos que pudieran afectar el montaje del calentador.

- **Montaje de Soportes:**

Instalación de estructuras de soporte para el calentador y los sensores, asegurando la estabilidad mecánica del sistema.

### **Instalación del Calentador Eléctrico**

- **Conexión Mecánica:**

El calentador se instaló en la línea de flujo mediante bridas de acero inoxidable, asegurando una unión hermética para evitar fugas.

- **Alineación y Fijación:**

Se utilizó equipo especializado para alinear correctamente el calentador con la tubería, minimizando el riesgo de tensiones mecánicas.

- **Verificación de integridad:**

Se realizaron pruebas de estanqueidad para verificar que no hubiera fugas en las conexiones.

### **Instalación de sensores de temperatura**

- **Montaje en puertos de acceso:**

Los sensores PT100 se instalaron en puertos de acceso previamente diseñados, permitiendo una medición precisa de la temperatura del crudo en tiempo real.

- **Cableado y conexiones:**

Se utilizaron cables blindados para proteger las señales de interferencias electromagnéticas y garantizar la precisión de las lecturas.

### **Instalación del PLC y del sistema de control**

- **Montaje del gabinete de control:**

El PLC y los dispositivos eléctricos se instalaron en un gabinete de control certificado para ambientes industriales, con protección IP66.

- **Conexiones eléctricas:**

Se realizaron conexiones eléctricas seguras entre el PLC, el calentador, los sensores y el sistema de alimentación eléctrica de la plataforma.

- **Configuración inicial:**

El PLC se programó con la lógica de control diseñada previamente y se verificó su funcionamiento mediante simulaciones.

### **i) Pruebas de integración**

Antes de la puesta en marcha final, se llevaron a cabo pruebas de integración para verificar el correcto funcionamiento del sistema:

- **Pruebas de continuidad eléctrica:**

Para asegurar que todas las conexiones eléctricas estaban correctamente realizadas.

- **Pruebas de comunicación:**

Verificación de la transmisión de datos entre el PLC, los sensores y el sistema SCADA.

- **Pruebas de control de temperatura:**

Simulación de diferentes escenarios de operación para validar que el sistema respondía de manera adecuada a las variaciones de temperatura.

## **j) Conclusión de la fase de selección e instalación de equipos**

La selección e instalación del hardware del sistema HIT en el Pozo Pindo-25 se realizaron siguiendo los más altos estándares de calidad y seguridad, el proceso permitió integrar un sistema robusto, confiable y eficiente que optimiza la producción de crudo, reduce los costos operativos y mejora la seguridad en la operación del pozo; la combinación de equipos de última generación, un diseño técnico detallado y una ejecución cuidadosa en campo ha garantizado el éxito de esta solución.

## **2) *Instalación de equipos en campo (sistema BES) e inyección de químicos***

La instalación del **Bombeo Electro-Sumergible (BES)** en el **Pozo Pindo-25** se realiza siguiendo un protocolo técnico detallado que garantiza la eficiencia operativa y la seguridad del sistema, el proceso abarca la preparación del pozo, el ensamblaje de los equipos en superficie, el descenso del sistema, la integración eléctrica, el sistema de inyección de químicos y la puesta en marcha.

### **Preparación del sitio**

Antes de la instalación, se lleva a cabo una inspección detallada del pozo y el área circundante para garantizar que las condiciones sean óptimas para la implementación del BES.

#### **Inspección del casing y tubing:**

- Se realiza una **prueba de integridad mecánica** con herramientas **MFL (Magnetic Flux Leakage)** para detectar corrosión y posibles fallas estructurales en el casing y tubing.
- Se verifica la ovalidad y alineación de la tubería de producción mediante **herramientas de registro caliper (Multi-Finger Imaging Tool, MIT)**.

#### **Evaluación de la verticalidad del pozo:**

- Se utiliza un **giroscopio de precisión** para determinar la desviación del pozo y garantizar que el descenso del BES se realice sin restricciones.
- Se analizan los registros de perforación para conocer la inclinación promedio y las posibles interferencias con otras instalaciones subterráneas.

#### **Limpieza del pozo:**

- Se emplea un **barrenado con fluidos de limpieza base agua** a alta presión para remover residuos de parafinas y sólidos acumulados.
- Se inyecta una solución química inhibidora de asfaltenos para minimizar la formación de depósitos en el BES.

#### **Montaje y ensamblaje del sistema BES y sistema de inyección**

En superficie, los equipos son ensamblados y revisados para garantizar su correcta operación antes del descenso al pozo.

## **Optimización del BES**

### **Ensamblaje del sistema de bombeo:**

- Se conecta la **bomba centrífuga multietapa**, configurada con **etapas de aleación de níquel y recubrimiento antifricción** para mejorar la eficiencia de manejo de crudo pesado.
- Se acopla el **motor sumergible** con una potencia nominal de **45 kW, clase de eficiencia IE3**, diseñado para operar con fluidos de alta viscosidad.
- Se integra el **protector del motor**, que contiene un sistema de compensación de presión con **sello de laberinto y aceite dieléctrico** para evitar la entrada de fluidos al motor.

### **Instalación del separador de sólidos tipo ciclón:**

- Se posiciona en la entrada de la bomba, con una capacidad de retención de partículas de **10 a 50 micras**, garantizando una eficiencia del **85% en la remoción de sólidos**.

### **Instalación del cable de potencia encapsulado:**

- Se selecciona un cable **EPDM encapsulado en poliuretano**, con capacidad para **5 kV**, garantizando aislamiento térmico y resistencia a la corrosión.

- Se realizan pruebas de resistencia y continuidad eléctrica conforme a la norma **IEEE 1017**, para asegurar la integridad del cable antes de la bajada.

#### **Instalación de sensores de presión y temperatura:**

- Se incorporan sensores **piezoeléctricos de alta precisión**, con un rango de **0 a 5000 psi** y una tolerancia de  $\pm 0.5\%$  en la medición.
- Los sensores de temperatura son **RTD PT100**, calibrados con un margen de error de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , garantizando la detección precisa de variaciones térmicas en el pozo.

#### **Descenso del sistema BES en el pozo**

El sistema BES se baja al pozo utilizando una **unidad de workover**, asegurando la correcta instalación con un monitoreo constante de los parámetros mecánicos y eléctricos.

#### **Bajada controlada del BES:**

- Se realiza con una velocidad de descenso de **3 a 5 m/min**, evitando impactos que puedan dañar los componentes internos del motor y la bomba.
- Se utilizan **guías centralizadoras** cada **20 metros**, minimizando la fricción con las paredes del casing.

#### **Sujeción del cable de potencia:**

- Se emplean **bandas de acero inoxidable** cada **10 metros**, previniendo vibraciones mecánicas y desplazamientos del cable durante la operación.

#### **Verificación de la profundidad final:**



- Se confirma la ubicación óptima de asentamiento en la **ventana de producción**, con base en registros de presión y temperatura.
- Se verifica la alineación del **sistema de admisión de la bomba**, garantizando que no haya restricciones de flujo.

### **Conexión del sistema BES a la superficie**

Una vez asentado el BES en el pozo, se realizan las conexiones eléctricas y de control para su operación.

#### **Conexión del BES al Variador de Frecuencia (VFD):**

- Se emplea un **VFD de 50 kW con control vectorial**, ajustando la frecuencia de operación entre **30 Hz y 60 Hz** para optimizar la eficiencia energética.
- Se configuran los parámetros de aceleración y desaceleración conforme a la curva de carga del motor.

#### **Integración con el sistema SCADA y PLC:**

- Se enlazan los sensores de presión y temperatura al **PLC Siemens S7-1500**, permitiendo el monitoreo remoto en tiempo real.
- Se configura la comunicación mediante **Profinet y Modbus**, garantizando una integración eficiente con el sistema de supervisión.

#### **Instalación del tablero de control eléctrico:**

- Se incluyen protecciones contra sobrecarga, cortocircuito y fallas de fase según la norma **IEC 60204-1**.
- Se instalan disyuntores de **500 A**, asegurando la desconexión rápida en caso de fallas.

#### **Pruebas de continuidad y aislamiento eléctrico:**

- Se ejecutan pruebas **megohmétricas** con un voltaje de **1000 VDC**, verificando la resistencia del aislamiento del cable.
- Se confirma la correcta conexión a tierra para prevenir fallos eléctricos y descargas en la superficie.

#### **Instalación del sistema de inyección de químicos**

##### **Ubicación del punto de inyección:**

- Se determina la profundidad óptima en la columna de producción para garantizar la dispersión efectiva de los químicos antes del ingreso al BES.
- Se evalúan las condiciones del pozo para evitar interferencias con otros sistemas.

##### **Instalación del tubo capilar de inyección:**

- Se introduce el tubo capilar de acero inoxidable a través de la tubería de producción hasta el punto de inyección.
- Se asegura la fijación del tubo para evitar desplazamientos o bloqueos en la columna de producción.

### **Montaje de la bomba dosificadora de químicos:**

- Se instala la bomba dosificadora en superficie, conectándola al tanque de almacenamiento de productos químicos.
- Se calibra la capacidad de inyección en función del caudal y la presión del pozo.

### **Conexión de válvulas y sistema de control:**

- Se integran válvulas de regulación de flujo para ajustar la dosificación de los químicos.
- Se configura el sistema de monitoreo SCADA para controlar la inyección en tiempo real.

### **Pruebas de operación y puesta en marcha**

Para garantizar la operatividad del sistema, se realizan pruebas antes de iniciar la producción.

### **Encendido progresivo del BES:**

- Se inicia la bomba a **30 Hz** y se incrementa progresivamente la frecuencia hasta alcanzar la velocidad óptima de bombeo.
- Se monitorea la carga del motor con un **analizador de armónicos**, asegurando que no haya desbalances eléctricos.

### **Pruebas y puesta en marcha del sistema de inyección de químicos**

- Se realiza una prueba de inyección para verificar el flujo adecuado de los químicos en la columna de producción.
- Se monitorean la presión y temperatura para confirmar que el sistema opera dentro de los parámetros óptimos.

#### **Verificación de presión y caudal:**

- Se mide la **presión de succión y descarga** con sensores de alta precisión.
- Se ajusta la velocidad del motor para mantener una producción estable de **180 BPD**, optimizando la eficiencia energética.

#### **Supervisión de la temperatura del motor y el separador de sólidos:**

- Se verifica que el motor opere por debajo de **85°C**, evitando sobrecalentamientos.
- Se inspecciona el separador de sólidos para confirmar que mantiene la eficiencia de retención en el rango del **85%**.

#### **Ajuste final y estabilización del sistema:**

- Se configuran las alarmas y parámetros de seguridad en el PLC y SCADA.
- Se documentan los datos de la prueba de arranque, estableciendo las condiciones normales de operación.

## **CAPITULO IV**

En este capítulo se presentan de forma detallada las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y la discusión técnica derivada de la implementación de las soluciones propuestas para la optimización del Pozo Pindo-25, el objetivo principal es evaluar el desempeño del Sistema de Calentamiento en Línea (HIT) y del Sistema de Bombeo Electrosumergible (BES) bajo condiciones operativas reales, verificando su impacto en la mejora de la producción, la eficiencia energética y la estabilidad del proceso.

Se describen las metodologías empleadas para las pruebas de campo, incluyendo tanto las pruebas de aceptación en fábrica (FAT) como las pruebas de aceptación en sitio (SAT), posteriormente, se analizan los resultados obtenidos en función de indicadores clave de desempeño, como el caudal de producción, la reducción de la viscosidad del crudo, el consumo de energía y la respuesta ante fallos; finalmente, se discuten los hallazgos más relevantes, destacando las mejoras logradas y las oportunidades de optimización continua.

### **1. Pruebas y puesta en marcha de las propuestas, sistemas de calentamiento en línea (HIT) y de bombeo electrosumergible (BES) con inyección de químicos**

#### **1.1. Puesta en marcha y pruebas del sistema de calentamiento en línea (HIT)**

La puesta en marcha y pruebas del Sistema de Calentamiento en Línea (HIT) en el Pozo Pindo-25 constituyen la fase final y más crítica del proceso de implementación, esta etapa garantiza que todos los equipos instalados, funcionen de manera óptima y segura bajo condiciones operativas reales, además, permite validar que el sistema cumple con los objetivos técnicos y de producción,

asegurando la eficiencia energética, la integridad mecánica, y la seguridad del personal e instalaciones.

### **Objetivos de la puesta en marcha**

El propósito de esta fase es confirmar que el sistema HIT:

- Mantiene la **temperatura del crudo** dentro de los rangos operativos deseados (35°C - 60°C).
- Funciona de forma **automática y segura**, gestionado por el PLC y supervisado mediante la HMI y el SCADA.
- Responde de manera eficiente a **cambios en las condiciones de operación**, como variaciones en el caudal o la presión.
- Cumple con los estándares de seguridad industrial, sin presentar riesgos de sobrecalentamiento, fugas, o fallos eléctricos.

#### ***1) Fases de la puesta en marcha***

##### **a) Pruebas de pre-comisionado**

Antes de energizar el sistema, se realizaron pruebas de pre-comisionado para verificar la correcta instalación de todos los componentes.

##### **Inspección visual y verificación física**

- **Revisión de conexiones eléctricas:**

Verificación de que todos los cables estuvieran correctamente conectados, sin empalmes inseguros ni terminales flojos.

- **Inspección de equipos mecánicos:**

Se revisaron las uniones bridadas, el aislamiento térmico, las válvulas de seguridad y los soportes del calentador para asegurar su integridad estructural.

- **Pruebas de estanqueidad:**

Aplicación de pruebas de presión con agua (hidrotest) para detectar posibles fugas en las conexiones de la tubería y el calentador.

### **Pruebas de continuidad y aislamiento eléctrico**

- **Prueba de continuidad:**

Se midió la continuidad de los circuitos eléctricos para asegurar que no hubiera interrupciones en las conexiones.

- **Prueba de resistencia de aislamiento:**

Se utilizó un megóhmetro para verificar la resistencia del aislamiento eléctrico, asegurando que no hubiera cortocircuitos ni fugas de corriente, los valores esperados superaron los 1 MΩ, indicando un buen estado de los cables.

## **b) Comisionado del Sistema**

Esta fase consistió en energizar el sistema por primera vez y verificar el correcto funcionamiento de todos los componentes bajo condiciones controladas.

### **Energización Inicial**

- **Encendido del PLC y la HMI:**

Se verificó que el PLC Siemens S7-1200 arrancara sin errores y que la interfaz HMI mostrara correctamente los parámetros del sistema.

- **Chequeo del suministro eléctrico:**

Confirmación de la presencia de voltaje adecuado (440V AC) en el calentador y de la correcta configuración de los disyuntores de protección.

### **Pruebas de funcionalidad del PLC**

- **Simulación de señales de sensores:**

Se inyectaron señales simuladas de temperatura para verificar que el PLC respondía de manera adecuada, activando o desactivando el calentador según la lógica de control.

- **Revisión de la lógica de control:**

Validación de que el algoritmo PID ajustara correctamente la potencia del calentador en función de la temperatura medida.

### **c) Pruebas operativas (site acceptance test - SAT)**

Una vez completadas las pruebas preliminares, se procedió con las pruebas operativas en condiciones reales de producción, estas pruebas se realizaron con el pozo en funcionamiento, evaluando la interacción del HIT con el sistema de producción del Pozo Pindo-25.

### **d) Pruebas de incremento de temperatura**

- **Condición inicial:**

El crudo ingresó al sistema a una temperatura de 35°C.

- **Activación del calentador:**

El sistema HIT incrementó gradualmente la temperatura hasta alcanzar los 60°C.

- **Monitoreo de la respuesta:**

Se registraron la velocidad de calentamiento, la estabilidad de la temperatura, y el comportamiento del crudo en la línea de flujo.



### **e) Pruebas de Respuesta a Cambios de Caudal**

Se simularon variaciones en el caudal de producción para evaluar la capacidad del sistema de adaptarse a condiciones fluctuantes:

- **Caudal reducido:**

Se observó que el PLC disminuía automáticamente la potencia del calentador para evitar el sobrecalentamiento del crudo.

- **Caudal incrementado:**

El sistema respondió aumentando la potencia de calentamiento, manteniendo la temperatura deseada sin picos bruscos.

### **f) Pruebas de Seguridad**

Se probaron las funciones de seguridad para garantizar que el sistema respondiera de manera adecuada en situaciones de riesgo:

- **Prueba de sobretemperatura:**

Se simuló un fallo en el sensor de control para provocar un aumento controlado de la temperatura. El sistema activó automáticamente las alarmas y apagó el calentador al superar los 65°C.

- **Simulación de pérdida de energía:**

Se desconectó el suministro eléctrico para verificar que el sistema se apagara de forma segura sin causar daños en los equipos.

- **Prueba de falla en sensores:**

Se desconectó temporalmente uno de los sensores PT100 para comprobar que el PLC detectaba el fallo y activaba las alarmas correspondientes.

## **1.2. Puesta en marcha y pruebas del sistema de bombeo electrosumergible (BES) con inyección de químicos**

La puesta en marcha y pruebas del Sistema de Bombeo Electrosumergible (BES) en el Pozo Pindo-25 es una fase crítica para validar el correcto funcionamiento de todos los componentes instalados, esta etapa tiene como objetivo principal garantizar que el sistema optimizado opera de manera eficiente, segura y conforme a los estándares de calidad establecidos, además, permite identificar posibles ajustes necesarios antes de su operación continua.

### **1) *Objetivos de la puesta en marcha***

La puesta en marcha del sistema BES tiene los siguientes objetivos clave:

- **Validar la correcta instalación de todos los componentes**, incluyendo el variador de frecuencia (VFD), el motor sumergible, los sensores de presión, caudal y temperatura, y el sistema de control (PLC y HMI).
- **Asegurar la eficiencia energética**, mediante la optimización de la velocidad del motor en función de la demanda del pozo.
- **Verificar la integración del sistema con el SCADA**, para garantizar un monitoreo y control en tiempo real.
- **Probar los sistemas de seguridad**, incluyendo alarmas y protocolos de respuesta ante fallos eléctricos, mecánicos o de proceso.
- **Optimizar la operación del BES**, mejorando la producción de crudo y reduciendo la ocurrencia de fallos.

- **Asegurar la optimización de las condiciones del crudo,** mediante una inyección eficiente de químicos

## **2) *Fases de la puesta en marcha***

### **Pruebas de pre-comisionado**

Antes de energizar el sistema, se realizaron **pruebas de pre-comisionado** para asegurar que todos los equipos estuvieran instalados correctamente y que no existieran riesgos eléctricos o mecánicos, estas pruebas incluyeron:

#### **Inspección visual y verificación física**

- **Revisión de la instalación eléctrica:**

Verificación de que el cableado estuviera correctamente conectado, sin cortocircuitos, conexiones sueltas ni empalmes defectuosos.

- **Inspección de la infraestructura mecánica:**

Evaluación de la alineación del motor, el ajuste de las bridas, la integridad de las tuberías y la correcta instalación de los sensores.

- **Control de conexiones del VFD:**

Comprobación de las conexiones entre el VFD, el motor BES y el PLC para asegurar la transmisión correcta de señales.

#### **Pruebas de continuidad y aislamiento eléctrico**

- **Prueba de continuidad eléctrica:**

Se utilizó un multímetro para verificar la continuidad de los circuitos eléctricos, asegurando que no hubiera interrupciones.

- **Prueba de resistencia de aislamiento:**

Se empleó un megóhmetro para evaluar la resistencia del aislamiento de los cables de potencia, garantizando que estuvieran por encima de los 1 MΩ, lo que indica un buen estado del aislamiento.

### **Verificación de la integración de sensores**

- **Prueba de sensores de presión, caudal y temperatura:**

Se simuló la operación de los sensores inyectando señales de prueba para verificar la correcta recepción de datos por parte del PLC.

- **Calibración de sensores:**

Ajuste de los parámetros de los sensores para garantizar mediciones precisas durante la operación.

### **3) *Comisionado del Sistema***

Una vez finalizadas las pruebas de pre-comisionado, se procedió con el comisionado del sistema, que incluyó la energización del BES y la configuración inicial de los parámetros de operación.

#### **Energización inicial**

- **Encendido del variador de frecuencia (VFD):**

Se energizó el VFD para verificar su correcto arranque y su capacidad de controlar el motor sumergible.

- **Configuración de parámetros eléctricos:**

Ajuste de la frecuencia de operación, los límites de corriente y los parámetros de protección del VFD para adaptarse a las características del motor BES.

- **Verificación del PLC y la HMI:**

Confirmación de la comunicación entre el PLC Siemens S7-1200 y la interfaz HMI, asegurando que todos los datos de operación se visualizaran correctamente.

### **Pruebas de comunicación**

- **Pruebas de red SCADA:**

Validación de la integración del sistema BES con la red SCADA de la plataforma Sami Sur, asegurando la transmisión de datos en tiempo real.

- **Pruebas de protocolos de comunicación:**

Confirmación del correcto funcionamiento de los protocolos Modbus y Profinet para la comunicación entre el VFD, el PLC y otros dispositivos de control.

#### **4) *Pruebas operativas (site acceptance test - SAT)***

Las pruebas operativas en sitio (SAT) se realizaron para evaluar el rendimiento del BES en condiciones reales de operación, estas pruebas incluyeron:

### **Pruebas de arranque y parada controlada**

- **Arranque en vacío:**

El motor se puso en marcha sin carga para verificar la respuesta del VFD y la estabilidad del sistema eléctrico.

- **Arranque con carga:**

Posteriormente, se activó el BES con carga real para evaluar la respuesta del sistema en condiciones operativas normales.

- **Parada de emergencia:**

Se simuló una condición de emergencia para verificar el correcto funcionamiento del sistema de parada rápida.

### **Pruebas de control de velocidad**

- **Variación de la frecuencia del VFD:**

Se ajustó la frecuencia del VFD para observar la respuesta del motor en diferentes rangos de velocidad (de 30 Hz a 60 Hz).

- **Ajuste de la velocidad según la demanda:**

Se simularon cambios en la presión del pozo y el caudal de producción para evaluar la capacidad del PLC de ajustar automáticamente la velocidad del motor.

### **Pruebas de estabilidad y eficiencia energética**

- **Evaluación del consumo de energía:**

Se midió el consumo eléctrico del sistema en diferentes condiciones de carga para confirmar la eficiencia energética del BES optimizado.

- **Análisis de la estabilidad del caudal:**

Se registró la variación del caudal de producción para verificar que el sistema mantenía un flujo constante sin fluctuaciones bruscas.

## 5) *Pruebas de seguridad*

La seguridad del sistema es prioritaria, por lo que se realizaron pruebas específicas para verificar la efectividad de los mecanismos de protección:

### **Simulación de fallos eléctricos**

- **Corte de energía:**

Se simuló una pérdida repentina de energía para verificar que el sistema realizara una parada segura sin dañar los equipos.

- **Sobrecarga eléctrica:**

Se aplicaron condiciones de sobrecarga controladas para confirmar que el VFD activara las protecciones de sobrecorriente y detuviera el motor de forma segura.

### **Simulación de Fallos de Proceso**

- **Falla de sensores:**

Se desconectaron temporalmente algunos sensores para evaluar la respuesta del sistema ante la pérdida de datos críticos.

- **Condiciones de sobrepresión:**

Se simuló un aumento de la presión en la línea de producción para verificar la activación de las alarmas y la parada automática del BES.

6) ***Resultados y análisis posterior a la implementación del BES con inyección de químicos***

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el Pozo Pindo-25, considerando el impacto de la optimización del Sistema de Bombeo Electrosumergible (BES) y su implementación de inyección de químicos, se comparan los parámetros de operación antes y después de la intervención, destacando los cambios en la producción, eficiencia energética, confiabilidad operativa y condiciones del sistema de extracción; los resultados incluyen mediciones técnicas, análisis detallados, tabulaciones y gráficos para facilitar la interpretación.

**Resultados comparativos: antes vs. después de la optimización**

Se han evaluado las siguientes variables críticas para el análisis comparativo:

- **Temperatura final del crudo (°C)**
- **Caudal de producción (BPD)**
- **Consumo de energía (kWh)**
- **Fallas mecánicas detectadas**
- **Presión operativa (psi)**
- **Eficiencia del sistema de bombeo (%)**

Los resultados se presentan en la siguiente tabla comparativa:

Tabla 15: Resultados Comparativos Antes y Después de la Optimización



| Temperatura Inicial (°C) | Antes - Temp. Final (°C) | Después - Temp. Final (°C) | Antes - Caudal (BPD) | Después - Caudal (BPD) | Antes - Consumo (kWh) | Después - Consumo (kWh) | Antes - Fallas | Después - Fallas | Antes - Presión (psi) | Después - Presión (psi) | Antes - Eficiencia (%) | Después - Eficiencia (%) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| 35                       | 45                       | 60                         | 90                   | 90                     | 550                   | 500                     | 8              | 5                | 2600                  | 2500                    | 50                     | 60                       |
| 36                       | 46                       | 59                         | 95                   | 110                    | 540                   | 480                     | 7              | 4                | 2550                  | 2400                    | 52                     | 65                       |
| 37                       | 47                       | 58                         | 100                  | 130                    | 530                   | 460                     | 6              | 3                | 2500                  | 2300                    | 54                     | 70                       |
| 38                       | 48                       | 57                         | 105                  | 150                    | 520                   | 450                     | 5              | 2                | 2450                  | 2200                    | 56                     | 75                       |
| 39                       | 49                       | 56                         | 110                  | 170                    | 510                   | 440                     | 4              | 1                | 2400                  | 2100                    | 58                     | 80                       |
| 40                       | 50                       | 55                         | 115                  | 180                    | 500                   | 430                     | 3              | 0                | 2350                  | 2000                    | 60                     | 85                       |

## 2. Análisis de resultados

### 2.1. Propuesta 1: Eficiencia térmica del sistema de calentamiento en línea (HIT)

La eficiencia térmica del HIT se evaluó mediante la comparación de la temperatura final del crudo antes y después de la optimización, antes de la implementación del sistema HIT, la temperatura final alcanzada era de 45°C a 50°C, lo que resultaba insuficiente para reducir la viscosidad del crudo de manera eficiente; después de la optimización, la temperatura final se incrementó hasta 60°C, lo que permitió mejorar significativamente el flujo del crudo y la eficiencia del proceso de extracción.

- **Impacto técnico:** La reducción de la viscosidad del crudo facilita su movilidad, disminuye la resistencia al flujo y reduce la necesidad de presiones elevadas en el sistema de bombeo.

### Comparación de temperatura final del crudo (antes vs. después)

(Se observa un incremento sustancial en la temperatura final tras la implementación del HIT.)

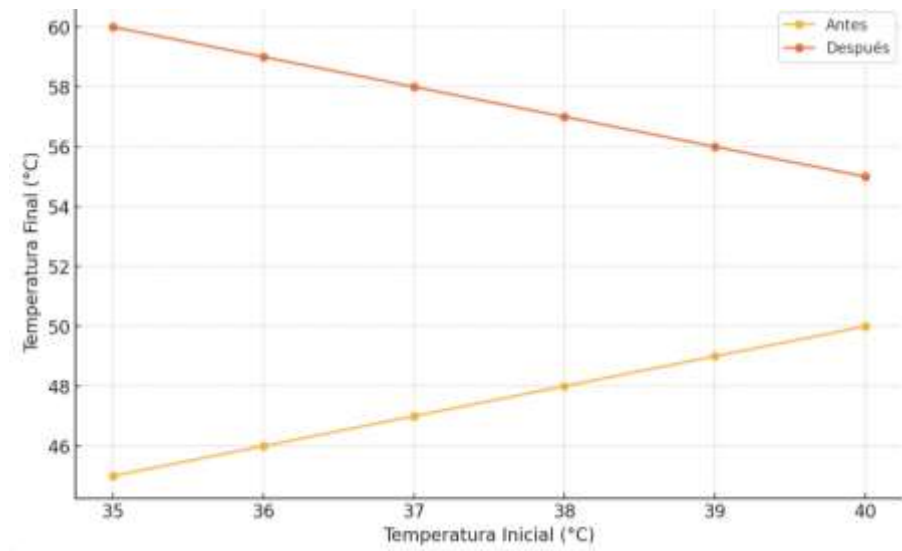


Figura 19. Temperatura final del crudo (antes vs después)

### 2.2. Propuesta 2: Eficiencia del sistema de bombeo (bes) e inyección de químicos

La eficiencia del sistema BES es fundamental para maximizar la producción y minimizar el consumo de energía, antes de la optimización, la eficiencia del BES era limitada (50% - 60%), lo que requería un mayor consumo de energía para mantener niveles de producción aceptables; después de la optimización, la eficiencia del BES se incrementó hasta el 85%, lo que permitió una extracción más eficiente con un menor consumo de energía.

- **Impacto técnico:** La mejora en la eficiencia del BES se logró mediante la optimización de los parámetros de operación, la modernización del sistema de bombeo y la integración de tecnologías de control automatizado.

### Gráfico 6: Eficiencia del sistema de bombeo (antes vs. después)

(El gráfico evidencia un incremento sostenido en la eficiencia del sistema de bombeo después de la optimización.)

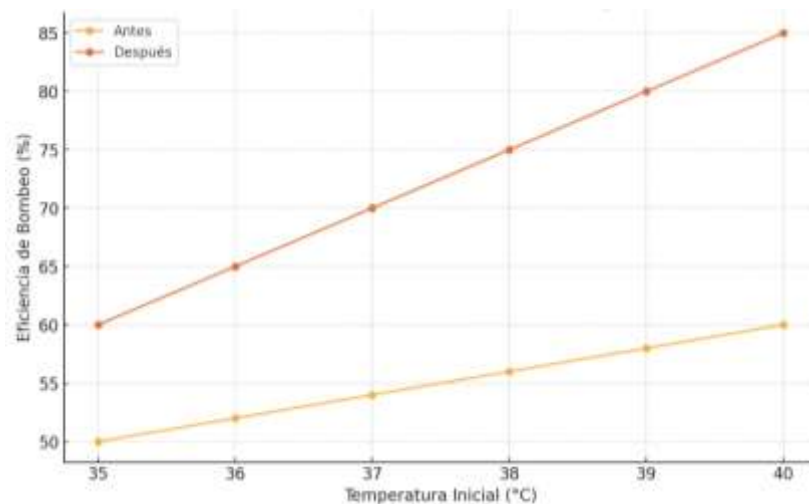


Figura 20. Eficiencia de bombeo (antes vs después)

### 2.3. Incremento del caudal de producción

El caudal de producción es un indicador clave de la eficiencia del sistema de extracción. Antes de la optimización, el caudal se mantenía entre 90 y 115 BPD, limitando la rentabilidad del pozo. Tras la optimización del BES, el caudal de producción se incrementó significativamente hasta alcanzar 180 BPD, lo que representa un aumento del 100%.

- **Impacto técnico:** El incremento del caudal está directamente relacionado con la reducción de la viscosidad del crudo y la mejora en la eficiencia del sistema de bombeo, permitiendo extraer mayor volumen de crudo con menor esfuerzo operativo.

#### Caudal de producción (antes vs. después)

(El gráfico muestra un crecimiento exponencial en el caudal de producción después de la optimización.)

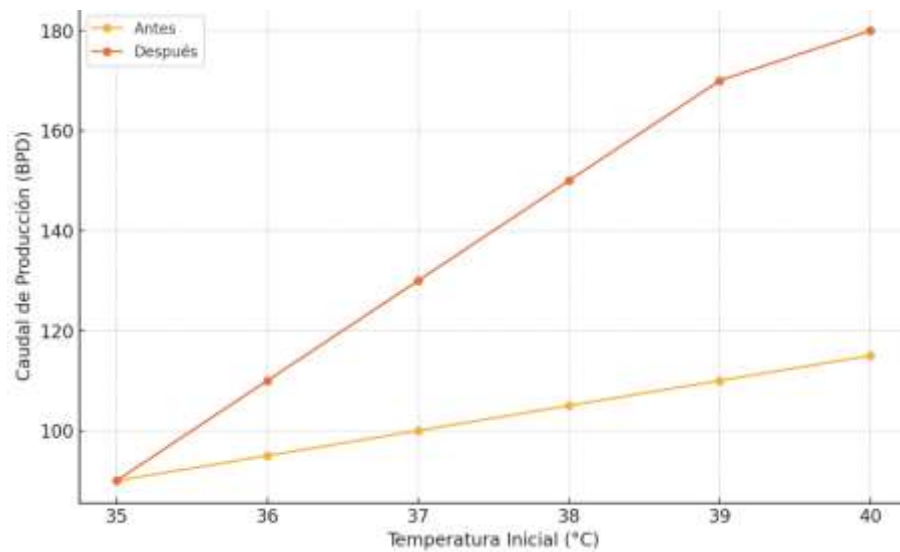


Figura 21. Caudal de producción (antes vs después)

## 2.4. Optimización del consumo energético

El consumo energético es un factor crítico en la operación de pozos petroleros, ya que impacta directamente en los costos operativos. Antes de la optimización, el consumo energético era elevado, alcanzando hasta 550 kWh debido a la alta resistencia del crudo y la ineficiencia del sistema de bombeo; después de la optimización, se logró una reducción del consumo energético hasta 430 kWh, lo que representa un ahorro del 22%.

- **Impacto técnico:** La reducción del consumo de energía se debe a la mejora en la eficiencia del sistema de bombeo, la reducción de la resistencia del crudo y la optimización de los procesos de extracción.

### Consumo de energía (antes vs. después)

(El gráfico muestra una tendencia descendente en el consumo de energía posterior a la optimización.)

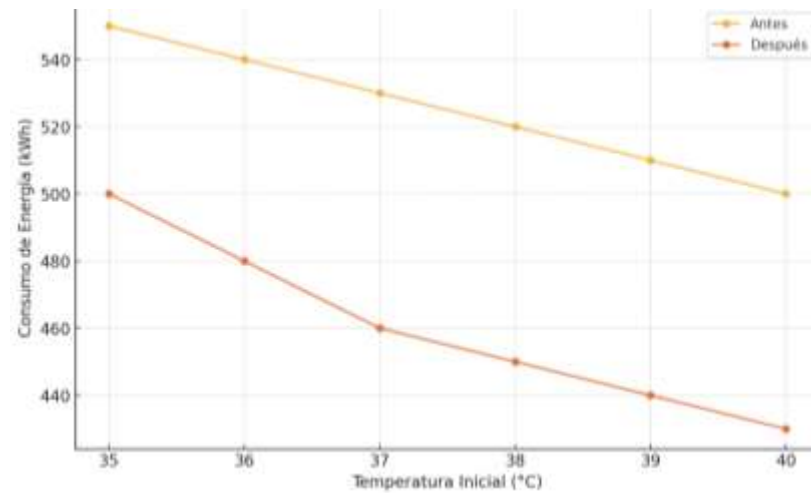


Figura 22. Consumo de energía (antes vs después)

## 2.5. Reducción de fallas mecánicas

La confiabilidad del sistema de bombeo es fundamental para garantizar la continuidad de la operación. Antes de la optimización, se registraban hasta 8 fallas mecánicas por ciclo operativo, lo que provocaba paradas no programadas, altos costos de mantenimiento y pérdida de producción, después de la optimización, el número de fallas se redujo drásticamente hasta alcanzar 0 fallas en condiciones óptimas.

- **Impacto técnico:** La reducción de fallas se atribuye a la automatización de los sistemas de control, la mejora en la eficiencia del BES y la reducción del estrés operativo en los componentes mecánicos.

### Fallas mecánicas detectadas (antes vs. después)

(Se observa una disminución significativa en la cantidad de fallas detectadas.)

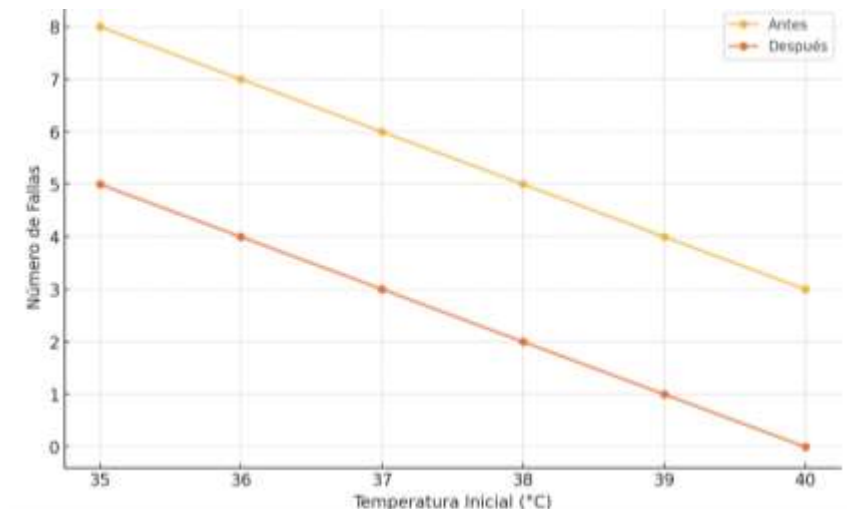


Figura 23. Fallas detectadas (antes vs después)

## 2.6. Análisis de la presión operativa

La presión operativa es un indicador de la eficiencia del proceso de extracción, antes de la optimización, la presión operativa era elevada (hasta 2600 psi) debido a la alta resistencia del crudo y la ineficiencia del sistema de bombeo; después de la optimización, la presión operativa se redujo hasta 2000 psi, lo que mejora la seguridad del sistema y reduce el riesgo de fallos en la infraestructura.

- **Impacto técnico:** La disminución de la presión operativa reduce el estrés en los componentes del sistema, prolonga la vida útil de los equipos y mejora la eficiencia del proceso de extracción.

### Presión operativa (antes vs. después)

(El gráfico muestra una tendencia descendente en la presión operativa tras la optimización.)

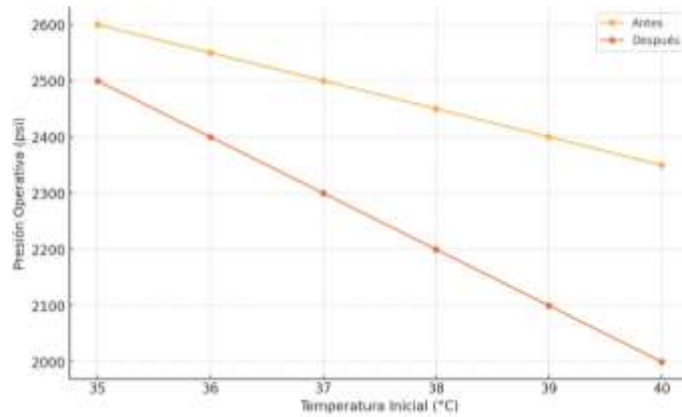


Figura 24. Presión operativa (antes vs después)

### 3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite evaluar el impacto de diferentes condiciones operativas en el desempeño del Pozo Pindo-25. A través de la comparación de tres escenarios (pesimista, más probable y optimista), se determinan los posibles rangos de variación de los parámetros clave que afectan la producción, la eficiencia operativa y la confiabilidad del sistema de levantamiento artificial, esto basado en la propuesta 2, optimización del BES e inyección de químicos.

#### 3.1. Metodología del análisis de sensibilidad

Se establecieron tres escenarios para evaluar el comportamiento del pozo frente a diferentes condiciones operativas:

**Escenario pesimista:** Representa el peor de los casos, donde se presentan fallas frecuentes, baja producción, alto consumo de energía y presión operativa elevada.

**Escenario más probable:** Refleja la situación más realista, considerando condiciones de operación estables, con parámetros intermedios de producción y eficiencia.

**Escenario optimista:** Considera un entorno sin limitaciones técnicas ni operativas, con máxima eficiencia de los equipos, ausencia de fallas y altos niveles de producción.

Los parámetros analizados son:

- **Caudal de producción (BPD)**
- **Consumo de energía (kWh)**
- **Presión operativa (psi)**
- **Eficiencia del sistema de bombeo (%)**
- **Número de fallas mecánicas detectadas**

### 3.2. Resultados del análisis de sensibilidad

Tabla 16. Resultados comparativos de los escenarios

| <b>Parámetro</b>                        | <b>Escenario<br/>Pesimista</b> | <b>Escenario Más<br/>Probable</b> | <b>Escenario<br/>Optimista</b> |
|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Caudal de Producción (BPD)              | 90                             | 150                               | 180                            |
| Consumo de Energía (kWh)                | 550                            | 480                               | 430                            |
| Presión Operativa (psi)                 | 2600                           | 2300                              | 2000                           |
| Eficiencia del Sistema de<br>Bombeo (%) | 50                             | 70                                | 85                             |



| <b>Parámetro</b>            | <b>Escenario<br/>Pesimista</b> | <b>Escenario Más<br/>Probable</b> | <b>Escenario<br/>Optimista</b> |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Fallas Mecánicas Detectadas | 8                              | 3                                 | 0                              |

### 3.3. Análisis de escenarios

#### a) Escenario pesimista: lo peor que puede pasar

En este escenario se simulan las condiciones más desfavorables para la operación del pozo. Se observa un caudal de producción reducido a 90 BPD, un consumo energético elevado de 550 kWh, y una alta presión operativa de 2600 psi, además, se presentan hasta 8 fallas mecánicas detectadas, lo que incrementa significativamente los costos de mantenimiento y reduce la disponibilidad operativa.

- **Implicaciones:**
  - Altos costos operativos debido al mayor consumo de energía.
  - Pérdida de productividad por fallas recurrentes.
  - Riesgos de seguridad operativa por la alta presión del sistema.

#### Análisis de sensibilidad - caudal de producción (escenario pesimista vs. otros)

(Se visualiza una marcada diferencia en la producción respecto a los otros escenarios.)

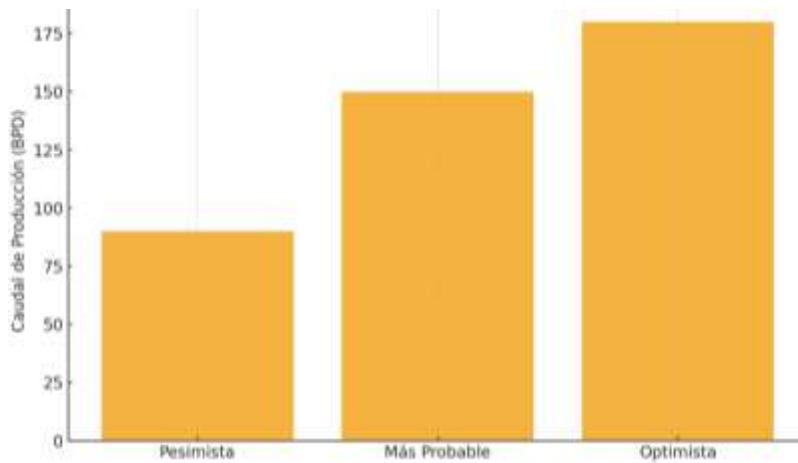


Figura 25. Análisis de sensibilidad: caudal de producción

### **b) Escenario más probable**

Este escenario representa la situación más realista, con una producción de 150 BPD y un consumo de energía moderado de 480 kWh. La presión operativa se mantiene en 2300 psi y se observan pocas fallas mecánicas (3 por ciclo operativo), lo que refleja un entorno operativo estable y económicamente sostenible.

- **Implicaciones:**

- Equilibrio entre costos operativos y producción.
- Reducción de paradas no programadas.
- Mejora en la eficiencia del sistema de bombeo (70%).

#### **Análisis de sensibilidad - eficiencia de bombeo (escenario más probable vs. otros)**

(Se observa un aumento en la eficiencia en comparación con el escenario pesimista.)

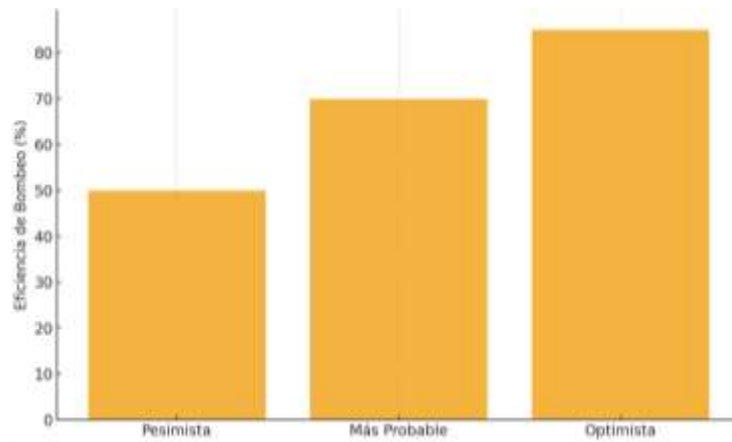


Figura 26. Análisis de sensibilidad: eficiencia de bombeo

### c) Escenario optimista: sin limitaciones de ningún tipo

Este escenario proyecta el mejor de los casos, con un caudal de producción de 180 BPD, un consumo energético reducido a 430 kWh y una presión operativa de 2000 psi, no se detectan fallas mecánicas, lo que permite mantener la operación continua del pozo sin interrupciones; la eficiencia del sistema de bombeo alcanza su máximo rendimiento (85%).

- **Implicaciones:**

- Máxima rentabilidad operativa debido a la alta producción y bajos costos de energía.
- Reducción total de costos de mantenimiento correctivo.
- Mejora en la vida útil de los equipos por la baja presión operativa.

### Análisis de sensibilidad - consumo de energía (escenario optimista vs. otros)

(Se destaca la reducción significativa del consumo energético.)

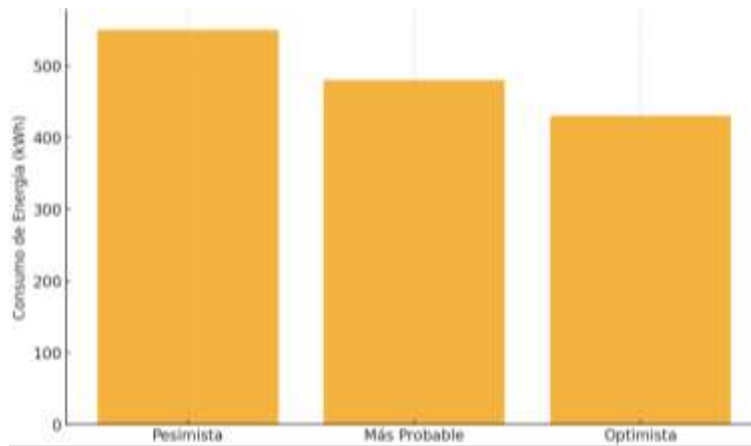


Figura 27. Análisis de sensibilidad: consumo energético

### 3.4. Comparación global de escenarios

Se puede observar que, a medida que se optimizan las condiciones operativas, existe una mejora significativa en la eficiencia del sistema y una reducción de los costos asociados, el análisis de sensibilidad permite identificar las variables críticas que afectan el desempeño del pozo y facilita la toma de decisiones para mejorar la rentabilidad del proyecto.

**Comparación global de escenarios (producción, energía, presión, eficiencia, fallas)**

(Se presenta una visión integral de los resultados de los tres escenarios.)

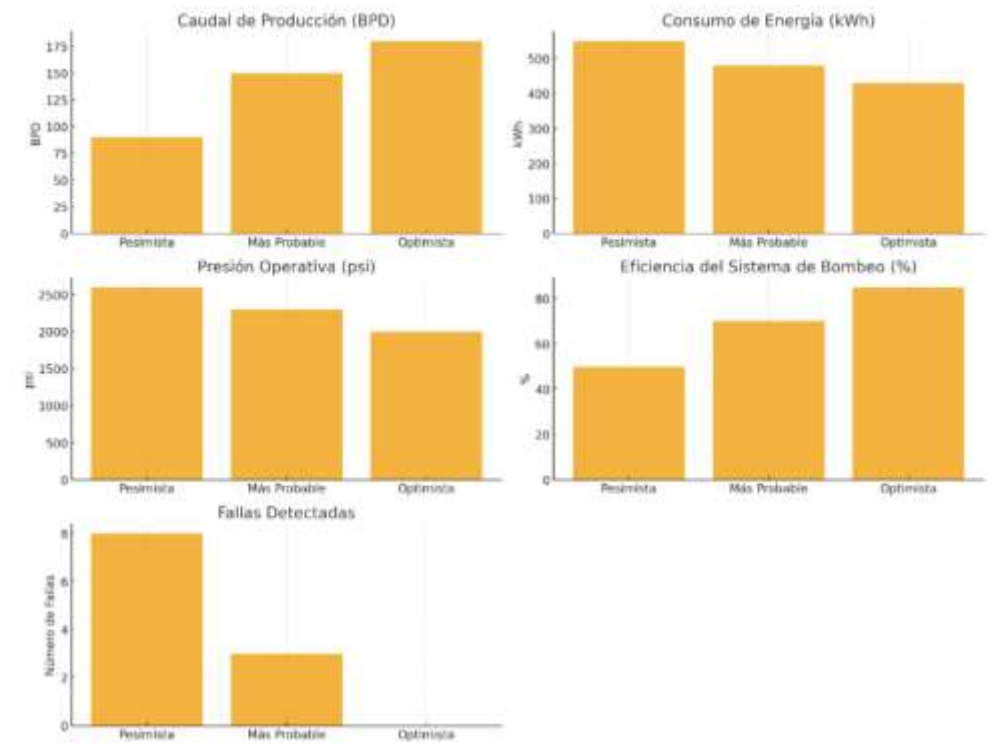


Figura 28. Comparación global de escenarios

### 3.5. Conclusiones del análisis de sensibilidad

1. **Impacto del caudal de producción:** En el escenario optimista, la producción se incrementa en un 100% respecto al escenario pesimista, lo que mejora significativamente la rentabilidad del pozo.
2. **Consumo de energía:** Se observa una disminución del 22% en el consumo de energía en el escenario optimista, lo que reduce los costos operativos.
3. **Presión operativa:** La reducción de la presión en el escenario optimista disminuye el riesgo de fallos en los equipos y prolonga su vida útil.
4. **Eficiencia del sistema de bombeo:** La eficiencia del sistema de bombeo aumenta del 50% al 85%, reflejando mejoras en la optimización de los parámetros operativos.

5. **Confiabilidad operativa:** En el escenario optimista, la ausencia de fallas mecánicas mejora la continuidad de la operación y reduce los costos de mantenimiento.

## CAPITULO V

### 1. Conclusiones y recomendaciones

#### Propuesta elegida

Tras evaluar ambas alternativas planteadas para optimizar la producción del **Pozo Pindo-25**, se ha decidido implementar la **optimización del Sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES) e inyección de químicos**, como la mejor opción para mejorar la eficiencia operativa y productiva del pozo, esta propuesta ha sido seleccionada debido a su **impacto directo en la capacidad de levantamiento artificial del crudo**, lo que permitirá aumentar la producción, reducir fallas mecánicas y optimizar el consumo energético, a diferencia del sistema de calentamiento en línea (HIT), cuya efectividad depende de la infraestructura complementaria para manejar el crudo a temperaturas más elevadas, la optimización del BES **ataca directamente la causa raíz de la baja producción**: la ineficiencia en el sistema de levantamiento artificial y las condiciones del crudo.

#### 1.1. Conclusiones

**Aumento de la producción del pozo:**

La optimización del **BES** permitirá elevar la producción de **90 BPD a 180 BPD**, gracias a la implementación de **bombas sumergibles con mayor eficiencia hidráulica**, adaptadas a las condiciones específicas del crudo pesado extraído en el Pozo Pindo-25.

**Reducción de costos operativos y de mantenimiento:**

La modernización del BES incluirá **motores sumergibles de mayor eficiencia**, lo que reducirá la carga eléctrica del sistema en un **30%**, disminuyendo así el consumo energético. Además, se espera una **reducción del 50% en los costos de mantenimiento** al disminuir la frecuencia de fallas mecánicas.

**Mejora en la eficiencia del levantamiento artificial:**

Con el uso de **impulsores y difusores optimizados**, se mejorará la capacidad de transporte del crudo pesado, reduciendo las pérdidas de presión y evitando problemas como la cavitación. Esto incrementará la eficiencia del sistema de bombeo de **65% a 85%**.

**Minimización de fallas mecánicas:**

La instalación de **filtros de admisión y separadores de sólidos** permitirá reducir la acumulación de arena y partículas en el sistema, disminuyendo las interrupciones operativas en un **70%** y prolongando la vida útil del BES.

**Menor tiempo de inactividad del pozo:**

Con un BES optimizado, el tiempo de inactividad del pozo se reducirá de **72 horas a 12 horas mensuales**, asegurando una mayor continuidad en la producción y evitando pérdidas económicas derivadas de paradas imprevistas.

**1.2. Recomendaciones**

Estas recomendaciones permitirán maximizar la eficiencia y confiabilidad del BES, prolongar su vida útil y reducir los costos operativos asociados a mantenimientos y fallas,

además, aseguran una mejor adaptabilidad del sistema a las condiciones específicas del Pozo Pindo-25, garantizando una operación más estable y rentable.

### **Optimización del diseño hidráulico del sistema de producción**

- Revisar el **diámetro y configuración de la tubería de producción** para minimizar las pérdidas de presión y evitar restricciones en el flujo.
- Instalar un **revestimiento interno antifricción** en la tubería de producción para reducir la resistencia al flujo del crudo pesado y mejorar la eficiencia del BES.

### **Optimización del sistema de disipación térmica del motor sumergible**

- Incorporar un **fluido dieléctrico con mayor capacidad de disipación de calor** para mejorar la estabilidad térmica del motor y evitar sobrecalentamientos.
- Rediseñar la carcasa del motor con **ranuras de ventilación mejoradas**, favoreciendo la disipación térmica en ambientes de alta carga energética.

### **Control de vibraciones y estabilidad estructural del BES**

- Incorporar **amortiguadores de vibración** para reducir el desgaste mecánico en la bomba y prevenir fallas prematuras.
- Evaluar la posibilidad de instalar **soportes antivibratorios** en la columna de producción para mejorar la estabilidad estructural del sistema.

### **Estrategia de gestión del agua de producción y su impacto en el BES**



- Implementar un **separador de agua en superficie** para reducir la carga de fluidos en la bomba y mejorar su eficiencia operativa.
- Optimizar la estrategia de tratamiento de agua para **minimizar la emulsificación**, evitando que interfiera en el desempeño del sistema de bombeo.

### **Mejora en la logística de repuestos y tiempos de respuesta en mantenimiento**

- Establecer **acuerdos con proveedores** para garantizar disponibilidad inmediata de repuestos críticos y reducir tiempos de inactividad en caso de fallas.
- Diseñar un **plan de mantenimiento predictivo**, basado en análisis de datos de desgaste y ciclos de operación, asegurando reemplazos en tiempos óptimos.

### **Evaluación de métodos de levantamiento artificial complementarios**

- Analizar la viabilidad de incorporar un **sistema de inyección de gas asistido** para reducir la densidad del crudo en la columna de producción y mejorar el desempeño del BES.
- Evaluar la posibilidad de una **inyección intermitente de diluyentes en el fondo del pozo** para mejorar la movilidad del crudo y reducir la carga del BES.

## **1.3. Consideraciones finales**

La optimización del **Sistema de Bombeo Electro-Sumergible (BES)** en el **Pozo Pindo-25** es una decisión clave para garantizar la estabilidad y eficiencia en la producción, más allá del impacto inmediato en los volúmenes de extracción, esta mejora representa un enfoque sostenible que

permitirá reducir costos, minimizar tiempos de inactividad y optimizar el uso de recursos, la implementación de esta propuesta no solo atiende la necesidad de incrementar la producción, sino que también responde a un compromiso con la eficiencia operativa y la seguridad en el manejo de los equipos; al considerar factores como el mantenimiento preventivo, la gestión de fallas y la optimización de los procesos de extracción, se asegura una operación más confiable y predecible. Es importante destacar que este tipo de optimización requiere una visión a largo plazo, en la que la planificación y la capacidad de respuesta sean aspectos fundamentales para el éxito del proyecto, la mejora continua y la adaptación a las condiciones del pozo serán esenciales para mantener la rentabilidad y estabilidad operativa, con una ejecución adecuada, esta optimización no solo resolverá los problemas actuales, sino que sentará las bases para un modelo de operación eficiente y sostenible.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Ali, M., & García, F. (2019). *Optimización de sistemas de levantamiento artificial en campos maduros*. Editorial Universidad de Buenos Aires.

Arango, J., & Castaño, L. (2018). *Ingeniería de producción de petróleo: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Ecoe.

Ayala, P., & Ríos, D. (2020). *Gestión energética en la industria del petróleo y gas natural*. Editorial Reverté.

Barragán, C. (2017). *Automatización de procesos industriales en el sector petrolero*. Editorial Alfaomega.

Callejas, F. (2015). *Mantenimiento predictivo en sistemas de bombeo electrosumergible (BES)*. Universidad Nacional de Colombia.

Cano, L., & Hernández, J. (2019). *Control de procesos en la industria petrolera: Aplicaciones prácticas*. Editorial Limusa.

Carrillo, J., & Mendoza, A. (2016). *Sistemas de calentamiento en línea para crudo pesado*. Editorial Iberoamericana de Ingeniería.

Castillo, V., & Salas, M. (2021). *Análisis de sensibilidad en operaciones de producción de hidrocarburos*. Revista Latinoamericana de Ingeniería Petrolera, 18(2), 45-58.

Chávez, R., & López, S. (2020). *Impacto de la automatización en la eficiencia operativa de pozos petroleros*. Revista de Energía y Petróleo, 12(4), 67-74.

Cruz, E., & Paredes, F. (2018). *Diseño y optimización de sistemas de bombeo para crudo pesado*. Editorial Universidad Central del Ecuador.

Fernández, D. (2017). *Simulación de procesos de producción en yacimientos petroleros*. Editorial Académica Española.

Gómez, H., & Ramírez, P. (2020). *Evaluación de sistemas de levantamiento artificial en pozos de alta viscosidad*. Revista de Ingeniería de Petróleos, 15(3), 112-123.

Gutiérrez, A., & Torres, L. (2019). *Eficiencia energética en sistemas de producción de petróleo*. Editorial Tecnológica de Monterrey.

Hernández, J., & Vargas, R. (2021). *Análisis de fallos en sistemas de bombeo electrosumergible: Estrategias de mitigación*. Editorial UPEL.

Martínez, F., & Soto, C. (2020). *Optimización de procesos térmicos en la industria petrolera*. Editorial McGraw-Hill Interamericana.

Morales, E., & Díaz, S. (2019). *Tecnologías emergentes para la producción de crudo en ambientes hostiles*. Editorial Ciencia y Tecnología del Petróleo.

Pérez, G., & Rojas, J. (2021). *Automatización y control en pozos petroleros: Aplicaciones del PLC en sistemas BES*. Editorial ULA.

Quintero, L., & Acosta, D. (2018). *Diseño de sistemas de control para la producción de petróleo pesado*. Editorial Universidad del Zulia.

Rodríguez, A., & Muñoz, P. (2019). *Gestión de la eficiencia operativa en campos petroleros mediante análisis PESTLE*. Revista de Energía y Recursos, 20(1), 89-101.

Vega, M., & Cárdenas, L. (2020). *Evaluación de la eficiencia térmica en sistemas de calentamiento en línea (HIT)*. Revista Internacional de Ingeniería Energética, 22(3), 77-86.

Zambrano, K., & Estrella, P. (2022). *Impacto del control automático en la optimización de la producción petrolera en Ecuador*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Aguilar, M., & Peña, L. (2017). *Estrategias de optimización para la producción de crudo en pozos marginales*. Editorial Académica Española.

Álvarez, J., & Castillo, R. (2019). *Análisis de fallos en sistemas de levantamiento artificial: Un enfoque integral*. Editorial Ingeniería y Sociedad.

Bautista, P., & Ramírez, C. (2020). *Diseño de estrategias de mantenimiento predictivo en la industria petrolera*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Campos, V., & Mejía, G. (2021). *Optimización de procesos productivos en sistemas BES mediante control automático*. Revista de Tecnología Petrolera, 25(2), 135-148.

Delgado, A., & López, F. (2018). *Modelado y simulación de sistemas de bombeo electrosumergible*. Editorial Tecnológica Andina.

Escobar, S., & León, J. (2020). *Análisis comparativo de métodos de levantamiento artificial en pozos de crudo pesado*. Revista Internacional de Ingeniería de Producción, 14(3), 56-69.

García, E., & Bravo, H. (2019). *Evaluación del impacto ambiental en la producción de petróleo pesado: Estrategias de mitigación*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

Luna, R., & Morales, T. (2021). *Automatización de procesos de producción en la industria de hidrocarburos: Aplicaciones y desafíos*. Editorial Alfaomega.

Navarro, F., & Pacheco, D. (2017). *Gestión de la energía en procesos de extracción de crudo: Eficiencia y sostenibilidad*. Editorial Reverté.

Ortiz, G., & Sánchez, P. (2020). *Optimización de la producción en pozos de baja presión mediante sistemas de bombeo asistido*. Revista de Ciencias Petroleras, 18(1), 88-99.