

|                                                                                   |                                                       |                                          |                             |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
|  | <b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b> |                                          |                             |                   |
|                                                                                   | <b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>  | Documento<br><b>F-AC-DBL-007</b>         | Código<br><b>30-09-2024</b> | Fecha<br><b>C</b> |
|                                                                                   | Dependencia<br><b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>          | Aprobado<br><b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b> | Pág.<br><b>1(1)</b>         |                   |

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                     |                   |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------|
| AUTORES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Steven Beltrán Gómez<br>Jhonnatan Prada Uribe                                                                                                                       |                   |         |
| FACULTAD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Ingeniería                                                                                                                                                          |                   |         |
| PLAN DE ESTUDIOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Especialización en Gestión de Mantenimiento Industrial                                                                                                              |                   |         |
| DIRECTOR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Jhon Arévalo Toscano                                                                                                                                                |                   |         |
| CODIRECTOR (si aplica)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Alberth Andrés Paba Álvarez                                                                                                                                         |                   |         |
| TÍTULO DE LA TESIS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Diseño de un plan de mantenimiento basado en eficiencia energética y optimización operativa en bombas de inyección de agua residual en campo jazmín, Puerto Boyacá. |                   |         |
| TITULO EN INGLES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Design of a Maintenance Plan Based on Energy Efficiency and Operational Optimization for Produced Water Injection Pumps at the Jazmín Field, Puerto Boyacá.         |                   |         |
| RESUMEN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                     |                   |         |
| La investigación desarrolla una propuesta de mantenimiento orientada a mejorar la eficiencia energética y la confiabilidad operativa de bombas de inyección. A través de análisis hidráulicos, indicadores energéticos y CBM, se identificaron pérdidas de eficiencia, desviaciones operativas y fallas de medición. El estudio plantea estrategias alineadas con estándares ISO para optimizar el consumo eléctrico, prolongar la vida útil de los equipos y fortalecer la gestión de activos industriales. |                                                                                                                                                                     |                   |         |
| RESUMEN EN INGLES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                     |                   |         |
| The research develops a maintenance proposal aimed at improving the energy efficiency and operational reliability of injection pumps. Through hydraulic analysis, energy performance indicators, and Condition-Based Maintenance (CBM), efficiency losses, operational deviations, and measurement failures were identified. The study proposes strategies aligned with ISO standards to optimize electrical energy consumption, extend equipment service life, and strengthen industrial asset management.  |                                                                                                                                                                     |                   |         |
| PALABRAS CLAVES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Eficiencia energética, mantenimiento basado en condición, confiabilidad operativa, gestión de activos.                                                              |                   |         |
| PALABRAS CLAVES EN INGLES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Energy efficiency, condition based maintenance, operational reliability, asset management.                                                                          |                   |         |
| CARACTERÍSTICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                     |                   |         |
| PÁGINAS: 141                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | PLANOS:                                                                                                                                                             | ILUSTRACIONES: 32 | CD-ROM: |



Diseño de un plan de mantenimiento basado en eficiencia energética y optimización operativa en bombas de inyección de agua residual en campo jazmín, Puerto Boyacá.

Steven Beltrán Gómez

Jhonnatan Prada Uribe

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Especialización Gestión de Mantenimiento Industrial

Msc. Jhon Arévalo Toscano

06 enero de 2026

## Índice

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 1. Diseño de un plan de mantenimiento basado en eficiencia energética y optimización operativa en bombas de inyección de agua residual en campo jazmín, Puerto Boyacá. .... | 12 |
| 1.1 Planteamiento .....                                                                                                                                                              | 13 |
| 1.2 Formulación del problema .....                                                                                                                                                   | 14 |
| 1.3 Objetivos .....                                                                                                                                                                  | 15 |
| 1.3.1 Objetivo general. ....                                                                                                                                                         | 15 |
| 1.3.2 Objetivos específicos .....                                                                                                                                                    | 15 |
| 1.4 Justificación.....                                                                                                                                                               | 15 |
| 1.5 Delimitaciones.....                                                                                                                                                              | 17 |
| 1.5.1 Geográfica. ....                                                                                                                                                               | 17 |
| 1.5.2 Temporal.....                                                                                                                                                                  | 17 |
| 1.5.3 Conceptual. ....                                                                                                                                                               | 18 |
| 1.5.4 Operativa. ....                                                                                                                                                                | 18 |
| Capítulo 2. Marco referencial .....                                                                                                                                                  | 20 |
| 2.1 Marco Histórico.....                                                                                                                                                             | 21 |
| 2.2 Marco Contextual.....                                                                                                                                                            | 22 |
| 2.3 Marco Conceptual .....                                                                                                                                                           | 23 |
| 2.4 Marco Teórico .....                                                                                                                                                              | 26 |
| 2.5 Marco Legal .....                                                                                                                                                                | 28 |
| 2.5.1 conexión del marco teórico con el problema de investigación.....                                                                                                               | 29 |
| Capítulo 3. Diseño metodológico .....                                                                                                                                                | 31 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Tipo de investigación .....                                                                   | 31 |
| 3.2 Población y muestra .....                                                                     | 32 |
| 3.2.1 Población. ....                                                                             | 32 |
| 3.2.2. Muestra .....                                                                              | 32 |
| 3.3 Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos. .... | 33 |
| Capítulo 4. Resultados .....                                                                      | 35 |
| 4.1 Fase 1. Diagnóstico energético–operativo del sistema de bombas. ....                          | 35 |
| 4.2 Resultados por bomba: Eficiencia volumétrica individual .....                                 | 37 |
| 4.3 Instrumentos de recolección de información .....                                              | 39 |
| 4.3.1 Pruebas bomba P 105-A .....                                                                 | 42 |
| 4.3.2 Pruebas bomba P 105-B .....                                                                 | 44 |
| 4.3.3 Pruebas bomba P 105-C .....                                                                 | 47 |
| 4.3.4 Pruebas bomba P 105-D .....                                                                 | 49 |
| 4.3.5 Pruebas del sistema @ 54Hz (Bombas B – C – D) .....                                         | 57 |
| 4.3.6 Pruebas del sistema @ 56Hz (Bombas B – C – D) .....                                         | 58 |
| 4.3.7 Optimización operativa del sistema de agua de inyección de agua residual.....               | 59 |
| 4.4 Curvas del sistema 54 Hz @ 850 Psi. ....                                                      | 61 |
| 4.5 Pruebas bomba P 105-C .....                                                                   | 61 |
| 4.6 Pruebas bomba P 105-D.....                                                                    | 62 |
| 4.7 Curvas del sistema 56 Hz @880 Psi .....                                                       | 63 |
| 4.7.1 Pruebas bomba P 105 B.....                                                                  | 63 |
| 4.7.2 Pruebas bomba P 105 C.....                                                                  | 64 |
| 4.7.3 Pruebas bomba P 105 D.....                                                                  | 64 |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.8 Resultados del análisis del sistema en escenarios optimizados.....                                   | 65 |
| 4.9 Resultados del análisis económico y energético .....                                                 | 65 |
| 4.10 Desempeño hidráulico frente al punto de mejor eficiencia (BEP).....                                 | 66 |
| 4.11 Análisis del consumo energético e indicadores de desempeño (EnPIs).....                             | 67 |
| 4.12 Brechas frente a estándares técnicos y normativos .....                                             | 68 |
| 4.13 Síntesis de hallazgos críticos del diagnóstico .....                                                | 68 |
| 4.14 Técnicas de análisis aplicadas .....                                                                | 69 |
| 4.14.1 Análisis estadístico descriptivo .....                                                            | 69 |
| 4.14.2 Análisis de curvas características y punto de mejor eficiencia (BEP) .....                        | 70 |
| 4.14.3 Determinación de indicadores de desempeño energético (EnPIs).....                                 | 70 |
| 4.14.4 Estimación de indicadores de confiabilidad operacional .....                                      | 71 |
| 4.15 Resultados del análisis energético .....                                                            | 71 |
| 4.16 Resultados del diagnóstico del estado actual de las bombas de inyección .....                       | 72 |
| 4.17 Resultados del análisis de confiabilidad operacional.....                                           | 74 |
| 4.18 Resultados integrados del diagnóstico energético – operativo .....                                  | 77 |
| 4.19 Resultados del análisis de costos de mantenimiento .....                                            | 77 |
| 4.19.1 Beneficio económico Optimización operativa del sistema de agua de inyección de agua residual..... | 80 |
| 4.20 Resultados de la Fase 2: Análisis de fallas críticas y su impacto en la eficiencia energética ..... | 81 |
| 4.20.1 Identificación de modos de falla críticos .....                                                   | 81 |
| 4.20.2 Impacto de las fallas en la eficiencia energética y la disponibilidad.....                        | 83 |
| 4.20.3 Implicaciones para la gestión del mantenimiento y la eficiencia energética.....                   | 86 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.20.4 Resultados del análisis de rutinas de inspección y gestión documental .....       | 86  |
| 4.20.5 Síntesis de resultados de la Fase 2.....                                          | 87  |
| 4.21 Resultados de la Fase 3 .....                                                       | 93  |
| 4.21.1 Implementación de Monitoreo Continuo de Indicadores Energéticos (EnPIs). .....    | 99  |
| 4.21.2 Instalación de Sensores Avanzados para la Medición de Variables Operativas. ....  | 99  |
| 4.21.3 Análisis de Datos para la Identificación de Modos de Falla Críticos:.....         | 100 |
| 4.21.4 Mantenimiento Predictivo Basado en Condición. ....                                | 100 |
| 4.21.5 Optimización de las Condiciones Operativas (Ajustes de Frecuencia y Presión). ... | 101 |
| 4.21.6 Capacitación Continua del Personal de Mantenimiento.....                          | 101 |
| 4.21.7 Integración del Sistema de Gestión Energética con el Sistema de Mantenimiento..   | 101 |
| 4.21.8 Implementación de Análisis de Causas Raíz para Fallas Energéticas.....            | 102 |
| 4.21.9 Realización de Pruebas Periódicas de Eficiencia Energética. ....                  | 102 |
| 4.22 Registro Visual y Monitoreo SCADA del Sistema de Inyección de Agua.....             | 103 |
| 4.23 Taxonomía y caracterización técnica de las bombas de inyección .....                | 105 |
| 4.24 Hoja de vida de los equipos.....                                                    | 106 |
| 4.25 Evidencia de planes de mantenimiento de las bombas .....                            | 119 |
| Capítulo 5. Conclusiones .....                                                           | 128 |
| Capítulo 6. Recomendaciones.....                                                         | 130 |
| Referencias.....                                                                         | 132 |
| Apéndices.....                                                                           | 135 |
| Anexos .....                                                                             | 136 |

### Lista de tablas

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. Marco de referencia del proyecto .....                                              | 20  |
| Tabla 2. Datos operacionales del sistema de inyección de agua residual del campo Jazmín..... | 37  |
| Tabla 3. Datos operacionales de la prueba de eficiencia de la bomba P-105A.....              | 42  |
| Tabla 4. Datos operacionales de la prueba de eficiencia de la bomba P-105 B .....            | 45  |
| Tabla 5. Datos operacionales de la prueba de eficiencia de la bomba P-105 C.....             | 47  |
| Tabla 6. Datos operacionales de la prueba de eficiencia de la bomba P-105 D.....             | 49  |
| Tabla 7. Volumen registrado de la bomba P-105 A.....                                         | 77  |
| Tabla 8. Registros de volumen de la bomba P-105 B.....                                       | 78  |
| Tabla 9. Registros de volumen de la bomba P-105 C.....                                       | 79  |
| Tabla 10. Registros de volumen de la bomba P-105 D.....                                      | 80  |
| Tabla 11. Registros de caudales en las pruebas de eficiencia del sistema de bombeo .....     | 87  |
| Tabla 12. Registros caudales en pruebas de eficiencia del sistema (bombas B–C–D a 54 Hz) ... | 88  |
| Tabla 13. Registros caudales en pruebas de eficiencia del sistema (bombas B–C–D a 56 Hz).... | 90  |
| Tabla 14. Escenarios de operación del sistema de inyección de agua residual (SIAR).....      | 91  |
| Tabla 15. Modos de falla críticos en bombas y su impacto en la eficiencia energética .....   | 92  |
| Tabla 16. Resultados de entrevistas semiestructuradas – categorización temática .....        | 93  |
| Tabla 17. Resultados de la guía de observación en campo.....                                 | 95  |
| Tabla 18. Triangulación de resultados (entrevistas – observación – documentos).....          | 105 |
| Tabla 19. Brechas frente a la norma ISO 50001 – Gestión de la Energía .....                  | 121 |
| Tabla 20. Brechas frente a la norma ISO 55001 – Gestión de Activos .....                     | 122 |
| Tabla 21. Planes de mantenimiento basados en condición (CBM) del sistema de bombeo .....     | 122 |
| Tabla 22. Taxonomía de la ubicación técnica de los equipos de bombeo .....                   | 123 |

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 23. Condiciones reales de operación del sistema de bombeo ..... | 123 |
| Tabla 24. Relación entre operación y confiabilidad (MTBF / MTTR)..... | 124 |
| Tabla 25. Relación del tiempo de paradas durante cada año .....       | 124 |
| Tabla 26. Instrumentos y variables analizadas en la fase 1 .....      | 125 |

## Lista de figuras

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1. Curva de mejor eficiencia (BEP) de una bomba centrífuga .....                      | 25  |
| Figura 2. Registro fotográfico del apoyo técnico a la medición de caudal de las bombas ..... | 40  |
| Figura 3. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 A.....                             | 43  |
| Figura 4. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 B.....                             | 45  |
| Figura 5. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 C .....                            | 48  |
| Figura 6. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 D.....                             | 50  |
| Figura 7. Curvas del sistema operando a 54 Hz y 850 psi – simulación Baker.....              | 61  |
| Figura 8. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 C a 54 Hz .....                    | 61  |
| Figura 9. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 D a 54 Hz .....                    | 62  |
| Figura 10. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 B a 56 Hz .....                   | 63  |
| Figura 11. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 C a 56 Hz .....                   | 64  |
| Figura 12. Simulación operativa en Baker de la bomba P-105 D a 56 Hz .....                   | 64  |
| Figura 13. Componentes del sistema de bombeo .....                                           | 94  |
| Figura 14. Listado de partes y accesorios del sistema de bombeo .....                        | 94  |
| Figura 15. Registro fotográfico del sistema de inyección y pantalla SCADA .....              | 103 |
| Figura 16. Captura de pantalla del sistema SCADA de Ecopetrol .....                          | 104 |
| Figura 17. Hoja de vida de la bomba centrífuga P-105 A .....                                 | 107 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 18. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 A .....                         | 108 |
| Figura 19. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 A (vista complementaria) .....  | 109 |
| Figura 20. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 B .....                         | 110 |
| Figura 21. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 B (vista complementaria).....   | 111 |
| Figura 22. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 B (unidad de lubricación) ..... | 112 |
| Figura 23. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 C .....                         | 112 |
| Figura 24. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 C (vista complementaria).....   | 114 |
| Figura 25. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 C – unidad de lubricación ..... | 115 |
| Figura 26. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 D.....                          | 115 |
| Figura 27. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 D (vista complementaria).....   | 117 |
| Figura 28. Unidad de bombeo de inyección de agua P-105 D (unidad de lubricación) ..... | 118 |
| Figura 29. Plan de mantenimiento de la bomba P-105 D .....                             | 120 |
| Figura 30. Plan de mantenimiento de la bomba P-105 B .....                             | 120 |
| Figura 31. Plan de mantenimiento de la bomba P-105 C .....                             | 120 |
| Figura 32. Plan de mantenimiento de la bomba P-105 D (vista complementaria) .....      | 121 |

## **Apéndice**

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| Apéndice 1. Encuestas eficiencia energética ..... | 137 |
|---------------------------------------------------|-----|

## **Anexos**

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo A. Informe de vibraciones - INF BOMBA 105A SIAR MD2 (56HZ) ..... | 136 |
| Anexo B. Informe de vibraciones - INF BOMBA 105B SIAR MD2 (56HZ) ..... | 137 |
| Anexo C. Informe de vibraciones - INF BOMBA 105C SIAR MD2 (56HZ) ..... | 138 |
| Anexo D. Informe de vibraciones - INF BOMBA 105D SIAR MD2 (56HZ). .... | 139 |
| Anexo E. Datos mantenimiento SAP 30 enero 2026 .....                   | 140 |

## **Capítulo 1. Diseño de un plan de mantenimiento basado en eficiencia energética y optimización operativa en bombas de inyección de agua residual en campo jazmín, Puerto Boyacá.**

El presente capítulo establece el marco conceptual y metodológico que orienta el desarrollo del proyecto de grado, centrado en el análisis del desempeño operativo, energético y de confiabilidad del sistema de bombas de inyección de agua residual del campo Jazmín. En este capítulo se presentan los elementos fundamentales que estructuran la investigación, permitiendo contextualizar el problema de estudio y delimitar su alcance dentro del entorno técnico e industrial en el cual se desarrolla.

Inicialmente, se expone el planteamiento del programa, en el cual se describe el contexto operativo del sistema de inyección de agua residual y se identifican las condiciones que motivan la necesidad de evaluar y mejorar la gestión del mantenimiento desde un enfoque integrado de eficiencia energética y confiabilidad operacional. Posteriormente, se formula el problema de investigación, evidenciando las brechas existentes entre la operación real del sistema y las buenas prácticas internacionales de gestión de activos, mantenimiento y energía.

A continuación, se presentan los objetivos del proyecto, tanto general como específicos, los cuales orientan el desarrollo metodológico y definen los resultados esperados del estudio. Seguidamente, se expone la justificación del proyecto, destacando su relevancia técnica, operativa y académica, así como su contribución potencial a la optimización del desempeño del sistema de bombeo.

Finalmente, se establecen las delimitaciones geográfica, temporal, conceptual y operativa, las cuales permiten acotar el alcance del estudio, garantizar la viabilidad del proyecto y clarificar las condiciones bajo las cuales se desarrollan los análisis y las conclusiones. De esta manera, el

capítulo sienta las bases necesarias para el desarrollo riguroso y coherente de los capítulos posteriores.

## **1.1 Planteamiento**

Ecopetrol S.A. es la empresa estatal colombiana encargada de gran parte de la exploración, producción, refinación, transporte y comercialización de hidrocarburos en Colombia la cual asumió recientemente la operación del activo NARE contemplando los campos Jazmín, Girasol, Moriche, Underriver y Abarco que en su momento estaban bajo contrato de la empresa Mansarovar Energy.

En su compromiso con la protección del medio ambiente y la eficiencia operativa, la compañía ha adoptado procesos de inyección de agua residual como una técnica esencial para garantizar una disposición segura de aguas producidas durante la extracción de hidrocarburos. Sin embargo, los equipos asociados a este proceso, como las bombas de inyección, suelen operar bajo condiciones severas, generando altos consumos de energía eléctrica, sobrecostos operativos y paradas no programadas debido a fallas mecánicas y eléctricas.

En el campo Jazmín, objeto de estudio, se dispone de cuatro bombas de inyección de agua residual cuya operación continua resulta crítica. Sin embargo, se han identificado diversos problemas, entre ellos un bajo rendimiento energético debido a ineficiencias en el punto de operación, fallas recurrentes ocasionadas por la ausencia de un plan de mantenimiento basado en la eficiencia, elevados costos de operación y mantenimiento correctivo, así como una limitada utilización de indicadores de desempeño energético, líneas base energéticas y operativas en la gestión del mantenimiento (López Quintero et al., 2021).

La importancia en el proceso de inyección de agua radica en que es un proceso intensivo en consumo eléctrico, lo que lo convierte en un foco prioritario para la implementación de medidas de eficiencia energética. El uso racional de la energía en aplicaciones como el bombeo no solo contribuye a reducir costos de operación, sino que también impacta en la sostenibilidad ambiental y en la seguridad del suministro energético. Por tanto, mejorar la eficiencia energética en bombas no solo aumenta la competitividad de los sectores productivos, sino que también contribuye a la reducción de emisiones y al cumplimiento de objetivos de sostenibilidad energética a nivel nacional. (Organización Latinoamericana de Energía, 2017)

La eficiencia energética de una bomba está directamente ligada a factores como: el estado de los impulsores y sellos, el alineamiento correcto del motor y la bomba, la prevención de fenómenos como la cavitación que generan pérdidas de rendimiento, el control de vibraciones y desgastes que afectan la curva de operación. Asimismo, mediante un mantenimiento basado en eficiencia energética y condiciones, apoyado a través del monitoreo de variables operativas (presión, caudal, potencia absorbida y vibraciones), es posible identificar desviaciones respecto al punto de mejor eficiencia (BEP). (Valderrama García, 2022)

Este contexto plantea la necesidad de desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento fundamentado en la eficiencia energética y optimización operativa, que permita extender la vida útil de los equipos, reducir costos y mejorar la sostenibilidad del proceso productivo.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo implementar un modelo de mantenimiento que optimice el consumo energético y mejore la confiabilidad de las cuatro bombas de inyección de agua residual de campo Jazmín?

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general.***

Diseñar una propuesta de gestión de mantenimiento orientada a la eficiencia energética y optimización operativa en cuatro bombas de inyección de agua residual de campo jazmín, con el fin de mejorar su confiabilidad y disponibilidad.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Diagnosticar el estado actual de las bombas en términos de desempeño operativo, consumo energético y confiabilidad, mediante el análisis de sus curvas características frente al punto óptimo de operación hidráulica y energética.

Identificar los principales modos de falla que impactan la eficiencia energética y la disponibilidad de las bombas.

Proponer estrategias de mantenimiento basados en condición que integren criterios de eficiencia energética.

## **1.4 Justificación**

El mantenimiento tradicional en equipos de bombeo en campo jazmín se ha enfocado en la corrección de fallas y en estrategias preventivas poco integradas al consumo energético. Dado el alto costo de la energía eléctrica en los procesos industriales y la relevancia de garantizar la continuidad operacional, se hace necesario un cambio de enfoque hacia un mantenimiento fundamentado en eficiencia energética y optimización operativa.

La investigación no se limitará a un diagnóstico convencional, sino que integrará el análisis de curvas características hidráulicas, desempeño energético y confiabilidad operacional en un modelo de gestión de mantenimiento orientado a la eficiencia. Esta visión multidimensional permite generar un marco metodológico que combina conceptos de gestión de activos (NTC-ISO 55001) y eficiencia energética (NTC-ISO 50001), ofreciendo un conocimiento práctico y aplicable que supera los enfoques tradicionales basados únicamente en mantenimientos correctivos o preventivos. (ICONTE, 2014;2019).

El desarrollo de este proyecto se fundamenta en que las prácticas actuales de mantenimiento en el campo jazmín han demostrado ser insuficientes para garantizar la confiabilidad y sostenibilidad de las bombas de inyección. La ausencia de indicadores energéticos y de desempeño operativo en la gestión de mantenimiento limita la capacidad de la organización para optimizar sus recursos y reducir sus costos. Por ello, es necesario desarrollar un modelo que permita anticipar fallas, optimizar el punto de operación y asegurar un uso más eficiente de la energía.

El proyecto aportará beneficios tanto técnicos como estratégicos:

- Reducirá los costos operativos mediante la disminución del consumo eléctrico.
- Mejorará la confiabilidad y disponibilidad de las bombas, asegurando la continuidad del proceso de inyección.
- Contribuirá a los objetivos corporativos de sostenibilidad al reducir la huella ambiental del proceso.
- Servirá como modelo replicable para otras operaciones industriales que empleen bombas centrífugas, extendiendo su impacto más allá del campo jazmín.

La viabilidad del proyecto se sustenta en la disponibilidad de recursos técnicos, humanos y operativos presentes en el campo Jazmín. Se cuenta con acceso a información histórica de operación, registros de consumo eléctrico y datos de mantenimiento de las bombas de inyección, los cuales permitirán realizar un análisis energético y operativo. Asimismo, el proyecto dispone del apoyo institucional de la empresa operadora y del área de mantenimiento, que facilitarán el acceso a equipos, personal técnico y herramientas de diagnóstico. El desarrollo del estudio se estima en un periodo de tres meses, tiempo en el cual se llevará a cabo la recopilación de datos, el análisis de desempeño y la formulación del plan de mantenimiento basado en eficiencia energética. Estos factores garantizan la factibilidad técnica y organizacional del proyecto, asegurando su ejecución dentro de los parámetros establecidos y su aplicabilidad en el entorno operativo real del campo Jazmín.

## **1.5 Delimitaciones**

### ***1.5.1 Geográfica.***

El estudio se desarrollará en campo jazmín ubicado en el municipio de puerto Boyacá, Boyacá de Colombia.

### ***1.5.2 Temporal.***

El proyecto se desarrollará en un periodo de tres meses, el cual incluirá una etapa de recopilación de datos, una de diagnóstico y otra de diseño y validación.

### ***1.5.3 Conceptual.***

El alcance se limita a la formulación y diseño de un plan de mantenimiento orientado a la eficiencia energética y optimización operativa basado en análisis de curvas características e indicadores energéticos, sin ejecutar físicamente las mejoras.

### ***1.5.4 Operativa.***

La propuesta se enfocará en cuatro bombas de inyección de agua residual, sin incluir equipos auxiliares (válvulas, tuberías, tanques).

El desarrollo del Capítulo I permitió estructurar de manera clara y coherente los fundamentos del proyecto, definiendo el contexto, el problema de investigación, los objetivos y el alcance del estudio relacionado con el sistema de bombas de inyección de agua residual del campo Jazmín. La formulación del problema evidenció la existencia de brechas en la gestión del mantenimiento, particularmente en la integración de criterios de eficiencia energética, confiabilidad operacional y gestión de activos físicos.

Los objetivos planteados orientan el proyecto hacia el análisis técnico del desempeño operativo y energético del sistema, así como hacia la formulación de una propuesta de mejora basada en principios de mantenimiento por condición y optimización del uso de la energía. La justificación del estudio resalta la pertinencia del proyecto desde el punto de vista operativo, económico y académico, al abordar una problemática real con impacto directo en la sostenibilidad y eficiencia del proceso de inyección.

Las delimitaciones establecidas permitieron acotar el estudio de manera precisa, garantizando la viabilidad del análisis y la coherencia entre los objetivos planteados y los

resultados esperados. En conjunto, este capítulo proporciona el marco inicial necesario para el desarrollo del proyecto y permite dar paso al Capítulo II, en el cual se presenta el marco teórico y conceptual que sustenta el análisis técnico y metodológico del estudio.

## Capítulo 2. Marco referencial

El presente capítulo tiene como propósito establecer el marco referencial que sustenta teórica y contextualmente la investigación. Para ello, se estructura en cuatro secciones principales: el marco histórico, que permite comprender la evolución del fenómeno objeto de estudio; el marco contextual, que delimita el entorno y las condiciones actuales relacionadas con la problemática; el marco conceptual, que define y aclara los conceptos clave utilizados a lo largo del estudio; y el marco teórico, que integra las principales teorías, modelos y enfoques que fundamentan el análisis de la investigación. Este capítulo proporciona, por tanto, la base necesaria para interpretar los hallazgos y desarrollar los análisis posteriores, asegurando coherencia y rigor científico en todo el trabajo.

**Tabla 1.**

*Marco de referencia del proyecto*

| Marco                   | Propósito                                         | Aspectos principales que aborda                                                                              | Aporte al proyecto                                                                |
|-------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Marco histórico</b>  | Mostrar la evolución del mantenimiento industrial | Evolución del mantenimiento correctivo, preventivo, TPM, RCM y mantenimiento basado en eficiencia energética | Fundamenta la necesidad de migrar a un modelo moderno de mantenimiento energético |
| <b>Marco contextual</b> | Ubicar el estudio en su entorno real              | Campo Jazmín, Ecopetrol, bombas de inyección, consumo energético, normativa ambiental, impacto regional      | Justifica la importancia técnica, ambiental y social del proyecto                 |
| <b>Marco conceptual</b> | Definir los conceptos clave                       | Mantenimiento, eficiencia energética, confiabilidad, BEP, CBM, gestión de activos                            | Establece el lenguaje técnico y los fundamentos del estudio                       |
| <b>Marco teórico</b>    | Sustentar científicamente la investigación        | RCM, CBM, ISO 50001, ISO 55001, sostenibilidad, antecedentes internacionales y nacionales                    | Da soporte teórico-metodológico al modelo de mantenimiento propuesto              |

| <b>Marco</b>                           | <b>Propósito</b>                     | <b>Aspectos principales que aborda</b>                                                          | <b>Aporte al proyecto</b>                                           |
|----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Marco legal</b>                     | Establecer el soporte normativo      | Ley 697 de 2001, ISO 50001, ISO 55001, API 610, RETIE, Resolución 631 de 2015, Ley 1715 de 2014 | Garantiza que la investigación cumpla requisitos legales y técnicos |
| <b>Conexión marco teórico–problema</b> | Articular teoría y problemática real | Integración de confiabilidad, eficiencia energética y gestión de activos                        | Justifica científicamente la solución propuesta al problema         |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas.

Con el fin de estructurar de manera ordenada los fundamentos que sustentan la investigación, en la **Tabla 1**, se presenta un resumen integrador de los diferentes marcos de referencia desarrollados, los cuales permiten analizar el problema desde una perspectiva histórica, contextual, conceptual, teórica y legal, asegurando coherencia metodológica y rigor científico.

## 2.1 Marco Histórico

El mantenimiento industrial ha evolucionado de un enfoque reactivo hacia modelos estratégicos centrados en la gestión de activos y la eficiencia energética. Durante las primeras décadas del siglo XX, el mantenimiento se limitaba a la reparación tras la falla (“run to failure”). Según Márquez (2007), esta etapa se caracterizó por la ausencia de planificación y la dependencia total de la disponibilidad de repuestos y personal técnico.

Con el auge de la producción en masa posterior a la Segunda Guerra Mundial, emergieron los modelos de mantenimiento preventivo, orientados a reducir la frecuencia de fallas mediante inspecciones periódicas (Smith & Hinchcliffe, 2004). No obstante, su aplicación

generó sobrecostos por reemplazos innecesarios y no consideró la eficiencia energética de los equipos.

En los años ochenta, Japón desarrolló el mantenimiento productivo total (TPM), integrando la mejora continua, la participación del operario y la fiabilidad operativa (Nakajima, 1988). Posteriormente, el enfoque evolucionó hacia el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), sistematizado por Nowlan y Heap (1978) en la industria aeronáutica y adoptado globalmente como base para la ISO 55001:2014 de gestión de activos.

En la última década, la transición energética y la digitalización industrial (Industria 4.0) introdujeron la necesidad de un mantenimiento sustentado en eficiencia energética, sensórica avanzada y análisis de datos (Márquez et al., 2019). Este enfoque —denominado Energy-Based Maintenance (EBM)— vincula la confiabilidad operacional con el desempeño energético, permitiendo optimizar simultáneamente disponibilidad y consumo (Sahoo et al., 2020).

En el contexto colombiano, la adopción de modelos basados en eficiencia energética se ha intensificado a partir de la Ley 697 de 2001, que promueve el uso racional de la energía, y con la reglamentación técnica RETIE y RETILAP para instalaciones industriales. Sin embargo, en campos petroleros como Puerto Boyacá, los programas de mantenimiento aún privilegian la disponibilidad sobre la eficiencia, evidenciando un rezago frente a las tendencias internacionales (UPME, 2020).

## **2.2 Marco Contextual**

El campo Jazmín, localizado en el municipio de Puerto Boyacá (Boyacá, Colombia), forma parte del activo Nare administrado por Ecopetrol S.A. Este campo cuenta con

infraestructura para la inyección de agua residual tratada, esencial para mantener la presión en los yacimientos y garantizar la sostenibilidad ambiental.

Las cuatro bombas de inyección de agua residual analizadas son equipos críticos, cuyo funcionamiento continuo es indispensable para cumplir las metas de producción y las normas de vertimiento (Resolución 631 de 2015, Min Ambiente). Estas bombas operan bajo condiciones de alta carga hidráulica, variabilidad de caudales y exposición a sólidos en suspensión, lo cual incrementa el riesgo de cavitación, desgaste mecánico y pérdida de eficiencia energética (García & Ríos, 2021).

El consumo energético asociado a los sistemas de bombeo en Ecopetrol representa más del 25 % del gasto eléctrico total en campos maduros (UPME, 2020). Por ello, el mantenimiento no puede concebirse solo como una función correctiva, sino como una estrategia de gestión integral del desempeño energético. La ausencia de indicadores de eficiencia y confiabilidad limita la toma de decisiones técnicas y financieras.

Desde un enfoque socioeconómico, Puerto Boyacá es un municipio con fuerte dependencia del sector petrolero, por lo cual las prácticas industriales sostenibles tienen repercusiones directas en el empleo, la calidad ambiental y la competitividad regional. La implementación de modelos de mantenimiento basados en eficiencia energética contribuye no solo a la reducción de costos corporativos, sino también al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y 12).

## **2.3 Marco Conceptual**

A continuación, se definen los conceptos fundamentales que sustentan la investigación:

**Mantenimiento:** Según la ISO 14224:2016, el mantenimiento es la “combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión destinadas a mantener o restaurar un ítem en un estado en el que pueda cumplir la función requerida”.

Márquez (2007) amplía el concepto al señalar que el mantenimiento debe integrarse a la estrategia corporativa mediante indicadores de desempeño, costos del ciclo de vida y gestión del riesgo.

**Eficiencia energética:** La ISO 50001:2018 define la eficiencia energética como la “relación entre el rendimiento, los servicios, los bienes o la energía obtenida y la energía utilizada”. En el contexto industrial, la eficiencia energética se expresa mediante indicadores de consumo específico (kWh/m<sup>3</sup> bombeado) y de desempeño (Energy Performance Indicators, EnPIs).

**Confiabilidad:** De acuerdo con Moubray (1997), la confiabilidad es la “probabilidad de que un componente o sistema realice una función requerida bajo condiciones específicas durante un período determinado”. En bombas centrífugas, la confiabilidad depende del mantenimiento, las condiciones de operación y el control de vibraciones.

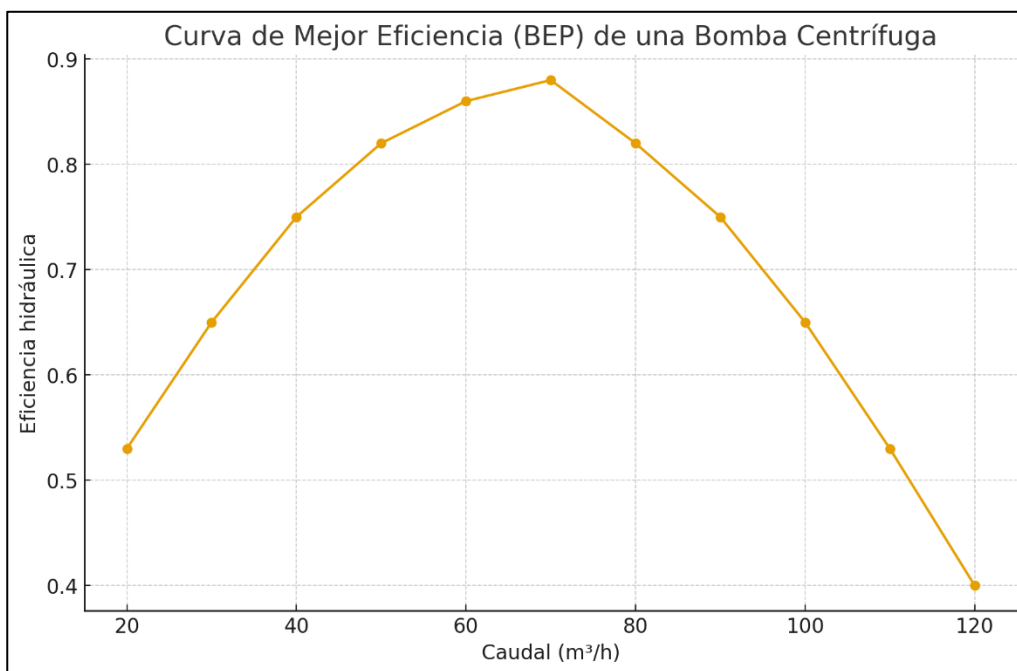
**Modelo de mantenimiento basado en eficiencia energética:** Este modelo integra la filosofía RCM con la gestión energética, priorizando las actividades de mantenimiento que impactan directamente el consumo eléctrico y la disponibilidad de los equipos (Sahoo et al., 2020). Involucra monitoreo continuo de variables eléctricas, hidráulicas y mecánicas, análisis de tendencias y toma de decisiones basadas en datos (data-driven maintenance).

**Curva de mejor eficiencia (BEP):** El **Best Efficiency Point (BEP)** representa el punto donde la bomba opera con máxima eficiencia hidráulica y mínima vibración. Desviaciones

respecto al BEP generan pérdidas energéticas, mayor desgaste y riesgo de falla (Valderrama García, 2022).

**Figura 1.**

*Curva de mejor eficiencia BEP de una bomba centrífuga.*



**Fuente:** Elaboración propia en Excel

**Descripción figura 1:** Muestra la curva característica de eficiencia hidráulica de una bomba centrífuga, donde se identifica el Punto de Mejor Eficiencia (BEP) alrededor de un caudal de 70 m³/h. En este punto la bomba alcanza su máximo rendimiento energético y presenta menores niveles de vibración. La operación por fuera del BEP, tanto a caudales inferiores como superiores, incrementa las pérdidas energéticas, el desgaste mecánico y el riesgo de falla del equipo (Valderrama García, 2022).

**Gestión de activos:** La **ISO 55001:2014** establece un marco sistemático para equilibrar costo, riesgo y desempeño a lo largo del ciclo de vida del activo. En este estudio, el mantenimiento energético se concibe como parte de la gestión de activos físicos de Ecopetrol.

## 2.4 Marco Teórico

La presente investigación se apoya en cuatro ejes teóricos interdependientes:

**a) Teoría de la confiabilidad operacional (RCM):** Desarrollada por Nowlan y Heap (1978), el Reliability Centered Maintenance plantea que la función del mantenimiento no es evitar todas las fallas, sino gestionar su impacto sobre la misión operativa. Según Smith y Hinchcliffe (2004), el RCM se basa en la identificación de funciones críticas, modos de falla y consecuencias, priorizando las tareas que previenen fallas funcionales. En este estudio, el RCM se complementa con indicadores energéticos, extendiendo su aplicación más allá de la disponibilidad hacia la eficiencia.

**b) Teoría del mantenimiento basado en condición (CBM):** El Condition Based Maintenance se sustenta en el monitoreo de variables físicas y energéticas para detectar desviaciones del comportamiento normal del equipo (Jardine et al., 2006). En las bombas del campo Jazmín, las variables clave incluyen presión de descarga, caudal, consumo eléctrico y vibraciones. Su integración permite transitar de un mantenimiento correctivo a uno predictivo-energético.

**c) Teoría de la gestión energética industrial:** Derivada de la ISO 50001, esta teoría concibe la energía como un activo estratégico susceptible de gestión continua mediante un ciclo PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar). Según Capehart et al. (2020), la aplicación de esta

norma en sistemas de bombeo puede reducir el consumo entre 10 y 20 % sin afectar la producción, mediante control de velocidad, balance hidráulico y mantenimiento eficiente.

**d) Teoría de la sostenibilidad operativa:** Basada en el marco de la Triple Cuenta (Elkington, 1997), esta teoría sostiene que la sostenibilidad industrial requiere equilibrio entre rentabilidad, impacto ambiental y bienestar social. En el caso de Ecopetrol, la mejora de la eficiencia energética en bombas contribuye simultáneamente a la competitividad económica y a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Antecedentes internacionales:** Estudios de la International Energy Agency (IEA, 2021) demuestran que el 60 % de las bombas industriales operan fuera de su punto óptimo de eficiencia. En India, Sahoo et al. (2020) desarrollaron un modelo de mantenimiento energético en sistemas de bombeo de refinería, logrando una reducción del 18 % en consumo eléctrico. En Europa, Márquez et al. (2019) evidencian que la integración de mantenimiento y gestión energética puede extender la vida útil de activos hasta en un 25 %.

**Antecedentes nacionales:** En Colombia, investigaciones de López Quintero et al. (2021) y Valderrama García (2022) han abordado la optimización energética en bombas industriales, resaltando la falta de integración entre mantenimiento y gestión energética. La UPME (2020) señala que el sector hidrocarburos tiene un potencial de ahorro energético del 15 % mediante mantenimiento eficiente, pero carece de metodologías aplicadas a equipos específicos.

**Antecedentes locales:** En campo Jazmín, los registros de Ecopetrol evidencian fallas recurrentes por desbalance hidráulico, vibraciones excesivas y sobreconsumo energético, sin contar con una línea base energética documentada. No existen modelos de mantenimiento basados en eficiencia energética implementados localmente, lo que constituye un vacío técnico y científico.

### **Vacíos de investigación:**

- A.** Escasa literatura aplicada a la integración entre mantenimiento y eficiencia energética en bombas de inyección de agua residual en el sector petrolero colombiano.
- B.** Ausencia de metodologías de monitoreo energético-operativo combinadas con confiabilidad.
- C.** Limitada incorporación de indicadores energéticos (EnPIs) en los sistemas de gestión de mantenimiento (SGM).
- D.** Carencia de estudios que analicen el impacto energético del mantenimiento predictivo en entornos de alta criticidad operacional.

## **2.5 Marco Legal**

El proyecto se sustenta en el marco normativo nacional e internacional que regula el mantenimiento industrial y la eficiencia energética:

- **Ley 697 de 2001:** Promueve el uso racional y eficiente de la energía y fomenta la gestión energética empresarial en Colombia.
- **Decreto 2143 de 2015:** Reglamenta la creación de sistemas de gestión energética conforme a la ISO 50001.
- **Resolución 631 de 2015 (Min Ambiente):** Regula los límites de vertimiento de aguas residuales, aplicable a los procesos de inyección de agua en campos petroleros.
- **NTC-ISO 50001:2018:** Establece los requisitos para sistemas de gestión energética, incorporando indicadores de desempeño.
- **NTC-ISO 55001:2014:** Define los lineamientos para la gestión de activos, incluyendo mantenimiento estratégico.

- **RETIE (Resolución 90708 de 2013):** Normativa técnica para seguridad eléctrica en instalaciones industriales.
- **API Standard 610 (2019):** Norma internacional para bombas centrífugas utilizadas en la industria petrolera.
- **Ley 1715 de 2014:** Promueve la integración de medidas de eficiencia y sostenibilidad energética en procesos industriales.

### ***2.6.1 conexión del marco teórico con el problema de investigación.***

El problema planteado la ausencia de un modelo de mantenimiento que optimice el consumo energético y mejore la confiabilidad de las bombas de campo Jazmín se sustenta en la confluencia de tres dominios teóricos:

- A. RCM y CBM aportan el enfoque técnico de confiabilidad y prevención de fallas.
- B. ISO 50001 introduce la dimensión energética y de mejora continua.
- C. Gestión de activos (ISO 55001) integra las dos anteriores dentro de un marco estratégico de sostenibilidad operativa.

El vacío de aplicación de estos modelos integrados en el contexto colombiano justifica la necesidad de un modelo híbrido de mantenimiento energético-confiable, diseñado con base en datos reales de operación y con potencial de replicabilidad en otros activos de Ecopetrol.

En síntesis, el marco referencial constituye el fundamento esencial que permite comprender el contexto histórico, conceptual y teórico de la investigación. La revisión histórica evidencia la evolución y antecedentes del fenómeno, mientras que el análisis contextual sitúa la problemática en el entorno actual. La clarificación de los conceptos clave asegura una

terminología precisa, y la exposición de las teorías y modelos relevantes aporta el soporte teórico necesario para el desarrollo del análisis y la interpretación de los resultados. Así, este capítulo consolida los elementos indispensables que orientan y fortalecen la argumentación del estudio en los capítulos siguientes.

### **Capítulo 3. Diseño metodológico**

El presente capítulo describe de manera detallada el diseño metodológico adoptado para la investigación, con el fin de garantizar la validez, confiabilidad del estudio. Se aborda, en primer lugar, el tipo de investigación y el enfoque metodológico seleccionado, explicando su pertinencia en relación con los objetivos planteados. Posteriormente, se presenta la definición de la población y la muestra, incluyendo criterios de selección y procedimientos aplicados, con el propósito de delimitar el universo de estudio y asegurar representatividad. Este capítulo proporciona, por tanto, la guía metodológica que orienta la recolección, análisis e interpretación de la información.

#### **3.1 Tipo de investigación**

El presente estudio se enmarca en un enfoque mixto, que combina herramientas cuantitativas para el análisis técnico-operativo y energético de las bombas con un componente cualitativo orientado a comprender las prácticas de mantenimiento, la toma de decisiones y las percepciones del personal operativo.

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2022), el enfoque mixto permite integrar la medición objetiva de variables con la interpretación contextual de los fenómenos organizacionales, generando un conocimiento más completo y aplicable.

El nivel de investigación es descriptivo-explicativo. Es descriptivo porque caracteriza el desempeño energético y operativo actual de las cuatro bombas de inyección; y explicativo porque busca determinar cómo un modelo de mantenimiento basado en eficiencia energética puede reducir el consumo eléctrico y mejorar la confiabilidad.

Metodológicamente, el proyecto adopta una estrategia de estudio de caso instrumental, según la tipología de Stake (1995), al centrarse en un sistema específico el conjunto de bombas de campo Jazmín para generar un modelo aplicable a otros activos industriales con características similares.

## **3.2 Población y muestra**

### ***3.2.1 Población.***

La población objeto del estudio está compuesta por los equipos y actores técnicos vinculados al proceso de inyección de agua residual en campo Jazmín, administrado por Ecopetrol S.A.

Se identifican dos unidades de análisis:

- **Unidad técnica:** Las cuatro bombas centrífugas de inyección de agua residual, con sus respectivos motores eléctricos, instrumentación y registros de operación.
- **Unidad humana:** El personal técnico y de mantenimiento (mecánico, eléctrico e instrumentación) encargado de la operación, supervisión y análisis de fallas de las bombas.

En total, la población humana estimada es de 10 personas, distribuidas entre ingenieros de mantenimiento, supervisores, operadores de campo y analistas de confiabilidad.

### ***3.2.2. Muestra***

La muestra se selecciona de forma intencional no probabilística, con base en criterios de experiencia y relevancia técnica (Hernández et al., 2022).

- **Muestra técnica:** Las cuatro bombas representan el 100 % de los equipos críticos del sistema de inyección, por lo que se aborda una muestra censal.

- **Muestra humana:** Se seleccionarán 10 participantes clave, integrando:
  - 2 ingenieros de mantenimiento (mecánico y eléctrico).
  - 2 supervisores de operación.
  - 4 técnicos de mantenimiento.
  - 2 operadores de bombas.

Esta selección permite obtener información técnica y empírica sobre el desempeño de los equipos, los modos de falla y las prácticas actuales de mantenimiento.

### **3.3 Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos**

La investigación se desarrolló mediante un enfoque metodológico mixto estructurado en tres fases complementarias. En la primera fase se efectuó un diagnóstico energético–operativo del sistema de bombas, a partir del análisis de registros históricos de presión, caudal, potencia eléctrica y consumo energético, mediciones directas en campo mediante caudalímetro ultrasónico y revisión de reportes de mantenimiento. Estos datos fueron procesados mediante análisis estadístico descriptivo, cálculo de curvas características y determinación del punto de mejor eficiencia (BEP), así como la estimación de indicadores de desempeño energético (EnPIs) y de confiabilidad operacional (MTBF y MTTR). En la segunda fase se identificaron los principales modos de falla mediante entrevistas al personal técnico, observación de rutinas operativas y análisis documental de procedimientos internos, aplicando codificación temática, triangulación de información y evaluación de brechas frente a los lineamientos de las normas ISO 50001 e ISO 55001. La tercera fase se orientó a la formulación de un modelo de mantenimiento basado en condición, integrando estrategias predictivas, indicadores energéticos y procedimientos de control, validado mediante análisis comparativo de escenarios.

El análisis de la información se realizó mediante una triangulación metodológica que integró resultados cuantitativos y cualitativos, utilizando herramientas estadísticas como Excel y Minitab para el cálculo de eficiencia hidráulica, consumo específico, confiabilidad, disponibilidad y análisis de contenido temático para la interpretación de percepciones técnicas. El proyecto se ejecutó bajo una estructura organizacional compacta conformada por dos investigadores y un asesor académico, con apoyo institucional de la universidad y de la empresa operadora, garantizando acceso a recursos técnicos, académicos y logísticos. La viabilidad financiera se sustentó en el uso de recursos existentes, con costos limitados a materiales, desplazamientos y procesamiento de información, lo que aseguró la factibilidad técnica, económica y organizacional del estudio dentro de un horizonte de ejecución de nueve semanas.

El diseño metodológico establece un marco estructurado para el análisis energético–operativo del sistema de bombeo, mediante un enfoque mixto de nivel descriptivo–explicativo y una estrategia de estudio de caso instrumental. Este enfoque integra la medición objetiva del desempeño técnico con el análisis contextual de las prácticas de mantenimiento y gestión de activos, reforzando la validez de los resultados.

La delimitación de población y muestra, junto con la selección de instrumentos y técnicas analíticas, asegura datos pertinentes y confiables. La triangulación de información cuantitativa y cualitativa, alineada con estándares ISO 50001 e ISO 55001, sustenta el desarrollo de un modelo de mantenimiento basado en condición y eficiencia energética, orientado a su posterior implementación y validación.

## Capítulo 4. Resultados

### 4.1 Fase 1. Diagnóstico energético–operativo del sistema de bombas.

El diagnóstico energético–operativo permitió establecer una visión integral del comportamiento real de las cuatro bombas de inyección de agua residual, considerando la interacción entre variables hidráulicas, consumo eléctrico y confiabilidad operacional. El análisis evidenció que el sistema opera bajo un esquema orientado prioritariamente a la continuidad del proceso, con un consumo energético por cada bomba de 251,775 kW/mes.

El análisis de eficiencia volumétrica del sistema de inyección de agua residual (SIAR) de campo Jazmín se fundamentó en la ejecución de pruebas técnicas individuales y de sistema sobre las bombas P-105 A, B, C y D, bajo condiciones controladas de frecuencia, presión y caudal. Las pruebas permitieron caracterizar el comportamiento real del sistema frente a las condiciones de diseño, identificar desviaciones operativas y establecer la eficiencia volumétrica efectiva del proceso de inyección.

En condiciones normales de operación, el sistema registraba en el SCADA un caudal total de 60.816 BLSD operando a 52 Hz y 840 psi con cuatro bombas en servicio. Sin embargo, al contrastar estos valores con las mediciones obtenidas mediante un medidor externo no intrusivo (Proasem), se determinó que el volumen real inyectado era de 53.716 BLSD, lo que representa una sobreestimación promedio de 7.099 BLSD en los registros del sistema de control. Esta diferencia evidencia una distorsión significativa en la información base utilizada para la toma de decisiones operativas y energéticas.

El diagnóstico realizado del estudio sobre el sistema de bombas de inyección de agua residual en el Campo Jazmín se centra en la evaluación integral de tres aspectos fundamentales: desempeño operativo, consumo energético y confiabilidad operativa de las bombas involucradas.

A continuación, se detallan los hallazgos principales de este análisis:

**Desempeño operativo:** En términos de desempeño hidráulico y volumétrico, se ha observado que las bombas operan fuera de su punto de mejor eficiencia (BEP), lo que implica un rendimiento subóptimo. Las desviaciones respecto a las curvas características de diseño de las bombas han evidenciado pérdidas energéticas significativas y un mayor desgaste de los componentes internos, lo que afecta directamente la eficiencia operativa del sistema de bombeo.

**Consumo energético:** El sistema de bombeo presenta un consumo energético mensual de 251,775 kW por bomba, lo que refleja una elevada demanda de energía. Este valor resulta especialmente preocupante cuando se comparan los registros operativos con las condiciones ideales de operación, revelando un desajuste considerable entre el caudal teórico y el caudal real medido. Tal desajuste pone de manifiesto un uso ineficiente de la energía, ya que las bombas no están funcionando dentro de sus parámetros óptimos de operación, lo que implica una mayor carga energética y costos operativos innecesarios.

**Confiabilidad operativa:** En cuanto a la confiabilidad, se ha identificado una falta de precisión en los sistemas de medición del caudal, específicamente entre los registros del sistema SCADA y las mediciones externas obtenidas mediante caudalímetros ultrasónicos. Las variaciones entre el caudal registrado y el caudal real medido son notorias, con diferencias que oscilan entre el 5% y el 16%, lo que evidencia una deficiencia en la trazabilidad de los datos

operativos. Esta falta de confiabilidad en los datos contribuye a decisiones operativas imprecisas y reduce la capacidad de anticipar fallas o realizar ajustes proactivos.

Las bombas operan fuera de sus puntos óptimos de eficiencia hidráulica y energética, lo que contribuye a un consumo elevado de energía y una confiabilidad operativa comprometida. Estos hallazgos resaltan la necesidad urgente de implementar un modelo de mantenimiento basado en condiciones que no solo optimice el consumo energético, sino que también mejore la fiabilidad operativa del sistema.

#### 4.2 Resultados por bomba: Eficiencia volumétrica individual

Durante la visita técnica realizada el 2 febrero del 2026 al sistema de inyección de agua residual de campo Jazmín, se verificó que el sistema se encontraba operando con cuatro bombas principales en servicio (A, B, C y D), bajo una frecuencia promedio de 52 Hz, una presión de descarga de 840 psi y un caudal total reportado de 60.816 BLSD. Esta configuración correspondía al esquema operativo habitual del sistema en condiciones de alta demanda de inyección.

**Tabla 2.**

*Antecedentes Datos operacionales sistema de agua de inyección de agua residual de campo*

*Jazmín*

| Operación de bombas -A-B-C-D |               |              |               |                           |
|------------------------------|---------------|--------------|---------------|---------------------------|
| Equipo                       | Frecuencia Hz | Caudal (BBH) | Caudal (BLSD) | Presión de descarga (PSI) |
| <b>Bomba A</b>               | 52            | 634,2        | 15.220,80     | 840                       |
| <b>Bomba B</b>               | 52            | 632,9        | 15.189,60     | 840                       |
| <b>Bomba C</b>               | 53            | 633          | 15.192,00     | 840                       |
| <b>Bomba D</b>               | 52            | 633,9        | 15.213,60     | 840                       |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas.

El análisis de los datos operacionales individuales evidenció una distribución de caudal relativamente homogénea entre las cuatro bombas, con valores cercanos a 15.200 BLSD por equipo. No obstante, se identificó una limitación en la confiabilidad de la información correspondiente a la bomba C, cuyo caudal fue estimado mediante promedio debido a la ausencia temporal de señal en el sistema SCADA. Esta situación puso de manifiesto debilidades en la instrumentación y en la trazabilidad de los datos operativos, lo que afectaba la precisión de los indicadores de desempeño y reforzaba la necesidad de mediciones externas independientes para validar el comportamiento real del sistema.

**Tabla 3.**

*Datos operacionales sistema de agua de inyección de agua residual del campo Jazmín, dato de volumen inyectado actualizado con los valores de Proasem.*

| <b>Operación de bombas -A-B-C-D</b> |                      |                     |                      |                                  |
|-------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|
| <b>Equipo</b>                       | <b>Frecuencia Hz</b> | <b>Caudal (BBH)</b> | <b>Caudal (BLSD)</b> | <b>Presión de descarga (PSI)</b> |
| <b>Bomba A</b>                      | 52                   | 634,2               | 11.695               | 840                              |
| <b>Bomba B</b>                      | 52                   | 632,9               | 13.435               | 840                              |
| <b>Bomba C</b>                      | 53                   | 633                 | 13.000               | 840                              |
| <b>Bomba D</b>                      | 52                   | 633,9               | 15.586               | 840                              |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos en medición

Con las pruebas realizadas se verifica el caudal de inyección respecto a la medida del FIT medidor no intrusivo, se tiene una diferencia de 7.100 BLS de lo que se registra en el sistema

scada. 4 bombas en operación a 52Hz de frecuencia, presión de descarga de 840 psi y un caudal total de 53.716 BLSD.

#### **4.3 Instrumentos de recolección de información**

Para el desarrollo del diagnóstico energético–operativo se emplearon los siguientes instrumentos, seleccionados de acuerdo con la naturaleza del estudio de caso y la disponibilidad de información en el entorno operativo:

**a) Registro histórico de operación:** Se analizaron los registros históricos de operación del sistema de bombeo, los cuales incluyen variables clave como presión de descarga, caudal inyectado. Esta información permitió caracterizar el comportamiento operativo del sistema a lo largo del tiempo, identificar patrones de variabilidad y establecer una línea base de desempeño energético.

El análisis de estos registros facilitó la evaluación del consumo energético específico del sistema y su relación con las condiciones reales de operación, constituyéndose en un insumo fundamental para la identificación de desviaciones operativas y potenciales ineficiencias energéticas, en concordancia con los lineamientos de la norma ISO 50001.

**b) Mediciones en sitio:** Como complemento a la información histórica, se realizaron mediciones directas en sitio mediante caudalímetros ultrasónicos portátiles, con el fin de validar los valores de caudal registrados y obtener datos representativos de la operación real de las bombas. Estas mediciones permitieron contrastar los parámetros operativos reales con los valores teóricos de diseño y con las curvas características del fabricante.

Las mediciones en sitio aportaron información clave para evaluar el régimen hidráulico de operación de las bombas y su cercanía al punto de mejor eficiencia, así como para identificar

posibles desbalances operativos derivados de ajustes empíricos, variabilidad del proceso o condiciones cambiantes del sistema de inyección.

Las mediciones de caudal realizadas en sitio mediante caudalímetros ultrasónicos permitieron validar los valores registrados en los sistemas de operación y confirmar la existencia de desviaciones entre el caudal real y el caudal nominal de diseño. Estas mediciones evidenciaron que, en determinadas condiciones operativas, las bombas trabajan en rangos de caudal que no corresponden a su zona de máxima eficiencia.

La información obtenida en campo permitió corroborar que las desviaciones operativas no son eventos aislados, sino una condición recurrente del sistema de inyección. Este hallazgo refuerza la hipótesis de que la operación del sistema no se encuentra alineada de manera consistente con los parámetros óptimos definidos por el fabricante, lo cual impacta negativamente tanto la eficiencia energética como la confiabilidad de los equipos.

## Figura 2.

Registro fotográfico de apoyo técnico a la medición de caudal bombas.



**Fuente:** Fotografía de autor

**Descripción figura 2:** Las mediciones de caudal se realizaron mediante sensor ultrasónico no intrusivo instalado sobre la tubería de descarga del sistema de inyección, lo que permitió obtener valores reales de flujo sin intervenir físicamente la línea ni alterar las condiciones hidráulicas del proceso. Esta técnica se seleccionó por su alta precisión, rapidez de instalación y capacidad de medición en tuberías de gran diámetro, garantizando la confiabilidad de los datos utilizados para la validación del desempeño volumétrico del sistema.

En el marco del análisis de desempeño de las bombas del sistema de inyección de agua residual, el desarrollo del presente concepto técnico se orientó a la formulación de una estrategia de optimización operativa del sistema, fundamentada en la evaluación real de la eficiencia hidráulica, volumétrica y energética de los equipos críticos. El objetivo principal de esta fase consistió en identificar las condiciones reales de operación de las bombas frente a los parámetros de diseño establecidos por el fabricante, con el fin de determinar desviaciones operativas, pérdidas energéticas y oportunidades de mejora en la configuración del sistema.

Para la ejecución de las pruebas de eficiencia, se estableció una coordinación entre el área de Mantenimiento y el área de Producción, lo que permitió garantizar condiciones controladas de operación, disponibilidad de información técnica y acompañamiento operativo durante las mediciones. Como resultado de esta articulación, el Departamento de Producción emitió el documento titulado *“Procedimiento pruebas de eficiencia bombas P-105 A / B / C / D de inyección de agua residual campos Jazmín–Girasol–Abarco”*, el cual definió el protocolo técnico para la ejecución de las pruebas, los criterios de seguridad operacional y los parámetros de medición requeridos.

El procedimiento experimental consistió en la reducción controlada del nivel del tanque TK-150 hasta su nivel mínimo operativo, seguido del apagado total de las bombas del sistema.

Posteriormente, cada bomba fue puesta en operación de manera individual, iniciando a una frecuencia de 44 Hz e incrementando progresivamente en pasos de 2 Hz hasta alcanzar 60 Hz. En cada punto de operación se registraron de forma simultánea el caudal medido por el sensor ultrasónico externo Proasem, la presión de descarga del sistema y el caudal reportado por el sistema SCADA, garantizando la obtención de información redundante y verificable.

Los datos obtenidos fueron contrastados con las curvas características suministradas por el fabricante, permitiendo evaluar la posición real de cada bomba frente a su punto de mejor eficiencia (BEP), así como identificar desviaciones entre el caudal teórico, el caudal registrado internamente y el caudal real medido externamente. Las pruebas individuales se iniciaron formalmente el 10 de febrero, constituyéndose en la base empírica del diagnóstico energético–operativo del sistema y en el insumo principal para la formulación de escenarios de optimización orientados a mejorar la eficiencia energética, la confiabilidad operacional y la sostenibilidad técnica del sistema de inyección.

#### **4.3.1 Pruebas bomba P 105-A**

**Tabla 3.**

**Datos operacionales prueba bomba P 105 A.**

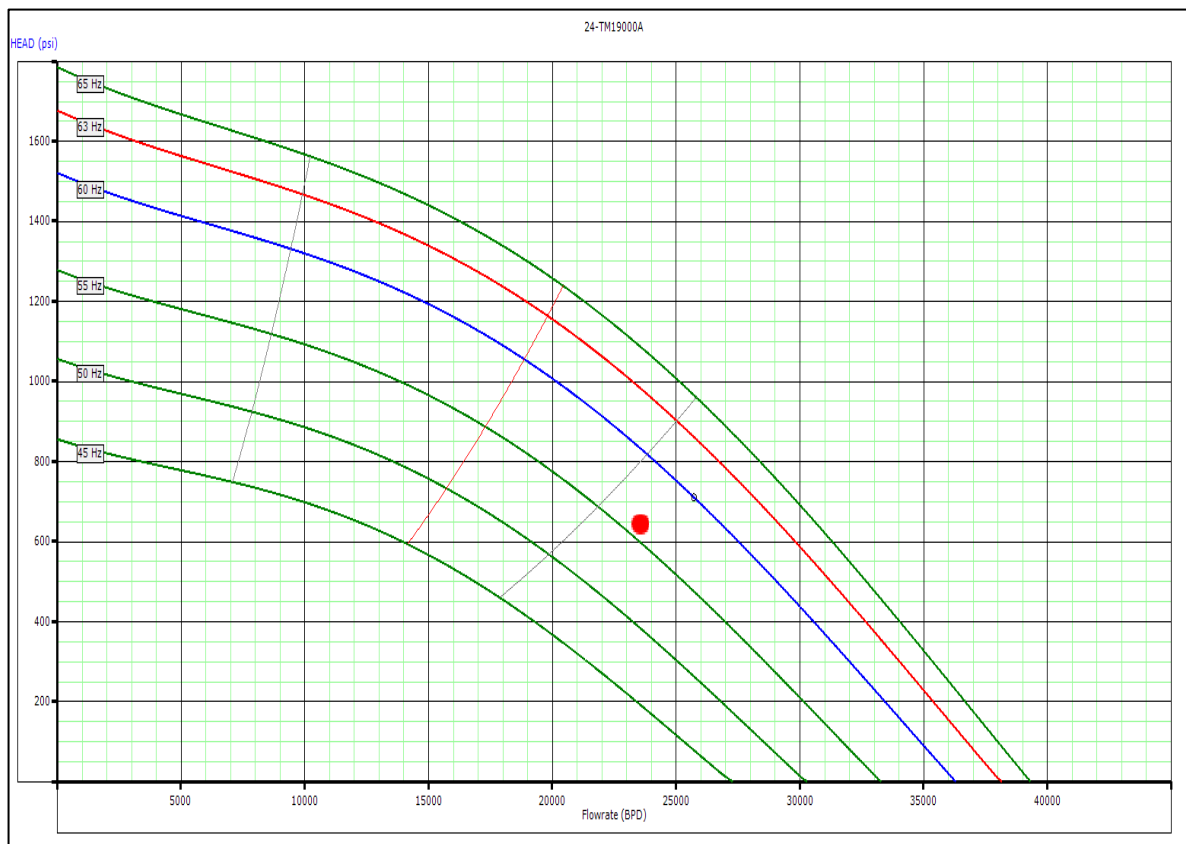
| <b>PRUEBAS BOMBA P 105 A</b> |                                                  |               |                                                  |               |                 |                              |                                     |
|------------------------------|--------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------|---------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Frecuencia</b>            | <b>Promedio de FIT descarga bombas (platina)</b> |               | <b>Promedio de FIT descarga bombas (teórico)</b> |               | <b>Promedio</b> | <b>FIT medidor intrusivo</b> | <b>Promedio de Presión descarga</b> |
| <b>(HZ)</b>                  | <b>(BPH)</b>                                     | <b>(BLSD)</b> | <b>(BPH)</b>                                     | <b>(BLSD)</b> | <b>(BPH)</b>    | <b>(BLSD)</b>                | <b>(psi)</b>                        |
| <b>44</b>                    | 551                                              | 13.232        | 604                                              | 14.504        | 468             | 11.224                       | 674                                 |

|           |       |        |       |        |     |        |     |
|-----------|-------|--------|-------|--------|-----|--------|-----|
| <b>46</b> | 598   | 14.360 | 675   | 16.200 | 530 | 12.728 | 702 |
| <b>48</b> | 661   | 15.864 | 722   | 17.328 | 578 | 13.872 | 703 |
| <b>50</b> | 751   | 18.016 | 800   | 19.192 | 670 | 16.088 | 709 |
| <b>52</b> | 822   | 19.728 | 880   | 21.128 | 734 | 17.624 | 707 |
| <b>54</b> | 895   | 21.480 | 953   | 22.880 | 781 | 18.752 | 708 |
| <b>56</b> | 954   | 22.888 | 1.022 | 24.536 | 870 | 20.872 | 705 |
| <b>58</b> | 1.002 | 24.040 | 1.054 | 25.304 | 926 | 22.232 | 705 |
| <b>60</b> | 1.090 | 26.168 | 1.153 | 27.664 | 984 | 23.616 | 712 |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

**Figura 3.**

*Simulación operativa BAKER bomba P 105 A.*



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software Beaker

**Descripción tabla 3 y figura 3:** Los resultados evidenciaron un incremento progresivo del caudal en función del aumento de la frecuencia, tanto en los valores teóricos como en los valores reales medidos. Sin embargo, se identificaron diferencias sistemáticas entre el caudal teórico y el caudal real registrado por el medidor intrusivo, siendo este último inferior en todos los puntos de operación. A modo de ejemplo, a 52 Hz la bomba presentó un caudal teórico de 880 BPH (21.128 BLSD), mientras que el caudal real medido fue de 734 BPH (17.624 BLSD), lo que representa una desviación aproximada del 16,6 %, asociada a pérdidas hidráulicas internas, desgaste de componentes y condiciones reales de operación no ideales.

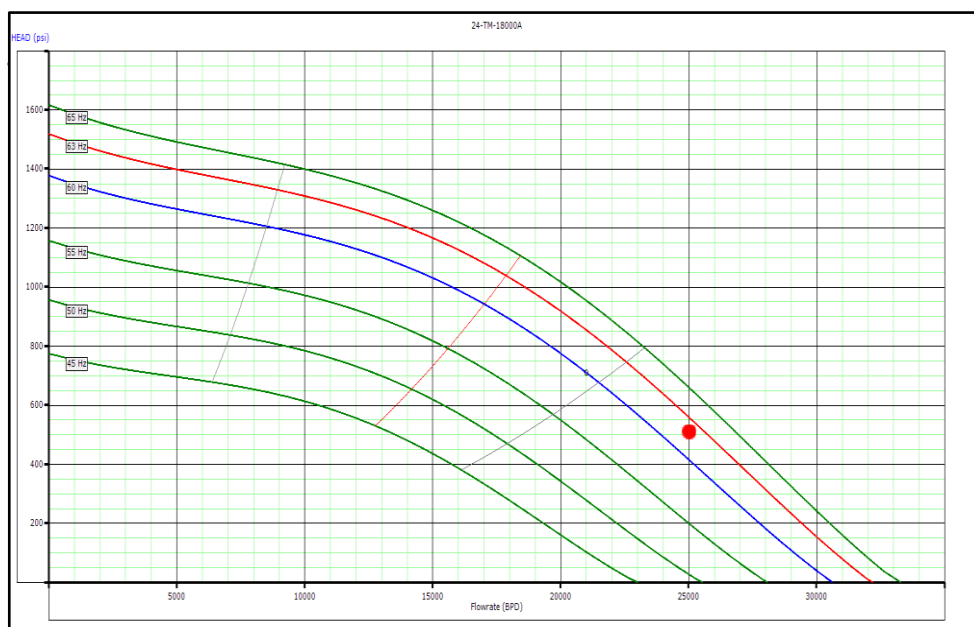
En términos de presión de descarga, la bomba mostró un comportamiento relativamente estable, con valores comprendidos entre 674 psi y 712 psi a lo largo del rango de frecuencias evaluado. Esta estabilidad indica que el sistema hidráulico se encontraba operando bajo una carga prácticamente constante, lo que permitió atribuir las variaciones de caudal principalmente a factores internos de la bomba y no a cambios significativos en la resistencia del sistema.

La simulación operativa desarrollada mediante el software Baker permitió contrastar los resultados experimentales con el modelo teórico de desempeño del equipo, confirmando que la bomba P-105 A operaba por debajo de su punto de mejor eficiencia (BEP) en la mayoría de los escenarios evaluados. Este hallazgo evidenció un potencial de optimización operativa mediante ajustes de frecuencia, mantenimiento basado en condición y realineación del régimen de operación, con el fin de reducir pérdidas energéticas, mejorar la eficiencia volumétrica y aumentar la confiabilidad del sistema de inyección de agua residual.

#### **4.3.2 Pruebas bomba P 105-B**

**Tabla 4.***Datos operacionales bomba P 105-B*

| PRUEBAS BOMBA P 105 B |                                                 |        |                                                 |        |          |                                                  |                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------|--------|----------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Frecuencia            | Promedio de FIT<br>descarga bombas<br>(platina) |        | Promedio de FIT<br>descarga bombas<br>(teórico) |        | Promedio | Promedio<br>de FIT<br>medidor<br>no<br>intrusivo | Promedio<br>de<br>Presión<br>descarga |
| (HZ)                  | (BPH)                                           | (BLSD) | (BPH)                                           | (BLSD) | (BPH)    | (BLSD)                                           | (psi)                                 |
| 44                    | 672                                             | 16.136 | 679                                             | 16.288 | 614      | 14.736                                           | 633                                   |
| 46                    | 700                                             | 16.792 | 707                                             | 16.960 | 640      | 15.352                                           | 644                                   |
| 48                    | 750                                             | 18.008 | 758                                             | 18.192 | 699      | 16.776                                           | 671                                   |
| 50                    | 804                                             | 19.296 | 811                                             | 19.456 | 736      | 17.664                                           | 699                                   |
| 52                    | 852                                             | 20.440 | 859                                             | 20.608 | 785      | 18.848                                           | 729                                   |
| 54                    | 900                                             | 21.608 | 910                                             | 21.832 | 830      | 19.928                                           | 760                                   |
| 56                    | 1.005                                           | 24.112 | 1.015                                           | 24.352 | 921      | 22.104                                           | 720                                   |
| 58                    | 1.083                                           | 25.984 | 1.091                                           | 26.184 | 997      | 23.920                                           | 701                                   |
| 60                    | 1.149                                           | 27.576 | 1.165                                           | 27.960 | 1.044    | 25.056                                           | 701                                   |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición**Figura 4.***Simulación operativa realizada por Baker bomba P 105-B***Fuente:** Elaboración propia a partir de software Beaker

**Descripción de tabla 4 y figura 4:** Los resultados presentados evidencian una relación directamente proporcional entre la frecuencia de operación y el caudal del sistema, manteniendo una tendencia aproximadamente lineal dentro del rango evaluado. Este comportamiento es consistente con los principios de afinidad de bombas centrífugas, donde el caudal varía de manera casi lineal con la velocidad de rotación. Sin embargo, el análisis comparativo entre el caudal teórico y el caudal real medido revela discrepancias sistemáticas, siendo este último inferior en todos los casos. Esta desviación refleja la influencia de pérdidas volumétricas internas, tales como recirculación, deslizamiento y holguras mecánicas, así como factores externos asociados a las condiciones hidráulicas del sistema (fricción en tuberías, accesorios y variaciones en la viscosidad del fluido).

A modo de ejemplo representativo, a una frecuencia de 56 Hz el caudal teórico estimado fue de 1.015 BPH (24.352 BLSD), mientras que el caudal real alcanzó únicamente 921 BPH (22.104 BLSD), lo que equivale a una desviación aproximada del 9,3 %. Este diferencial no solo evidencia ineficiencias operativas, sino que también sugiere posibles condiciones de desgaste o desajuste en los componentes hidráulicos de la bomba.

En relación con la presión de descarga, la bomba mostró un comportamiento no estrictamente lineal. Se observó un incremento progresivo desde 633 psi hasta un valor máximo cercano a 760 psi al alcanzar los 54 Hz, seguido de una leve disminución en frecuencias superiores. Este patrón sugiere una modificación en la carga dinámica del sistema, atribuible probablemente a la interacción hidráulica entre bombas operando en paralelo, así como a cambios en la resistencia de la red de inyección (efecto de contrapresión, pérdidas por fricción y variaciones en el régimen de flujo).

Por otra parte, la simulación operativa realizada mediante el software Baker permitió contrastar las condiciones reales de operación con las curvas características del fabricante. Los resultados indican que la bomba P-105 B operó en múltiples puntos alejados de su zona de máxima eficiencia (Best Efficiency Point, BEP), lo que implica un funcionamiento subóptimo desde el punto de vista energético y mecánico. Esta condición puede acelerar fenómenos de desgaste, incrementar el consumo energético y reducir la vida útil del equipo.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la necesidad de implementar un modelo de mantenimiento basado en condición, complementado con criterios de eficiencia energética, que permita optimizar la operación del sistema, reducir pérdidas y garantizar un desempeño más estable y confiable en el tiempo

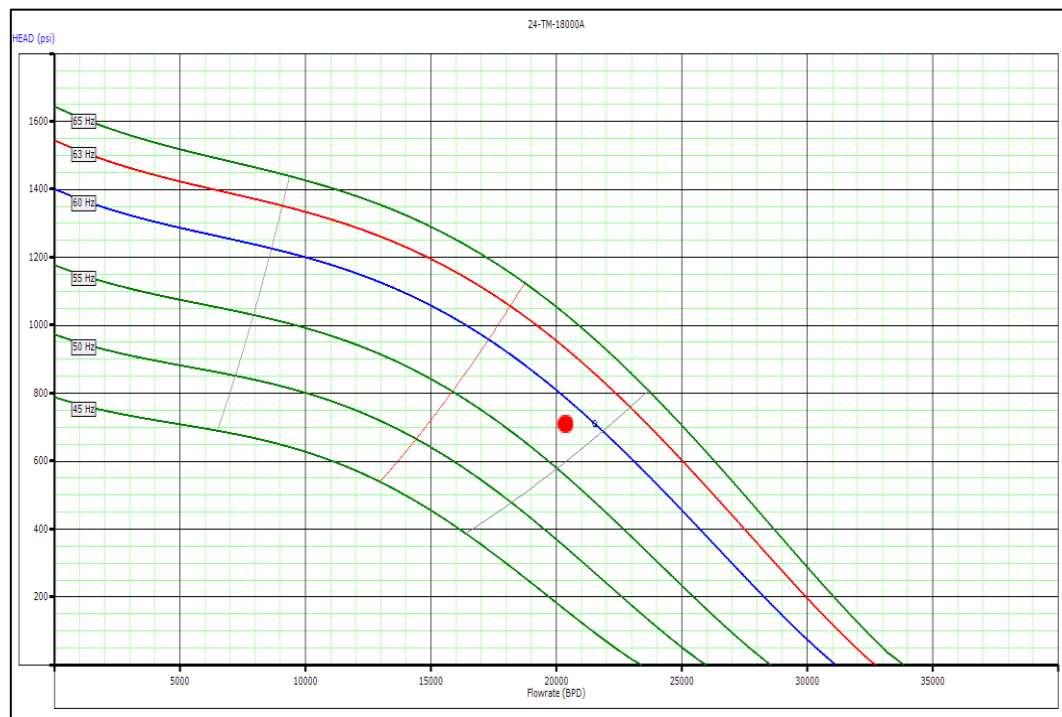
#### 4.3.3 Pruebas bomba P 105-C

**Tabla 5.**

*Datos operacionales prueba bomba P 105 C.*

| PRUEBAS BOMBA P 105 C |                                                 |        |                                                 |        |                                            |        |                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------|--------|---------------------------------------|
| FRECUENCIA            | Promedio de FIT<br>descarga bombas<br>(platina) |        | Promedio de FIT<br>descarga bombas<br>(teórico) |        | Promedio de FIT<br>medidor no<br>intrusivo |        | Promedio<br>de<br>Presión<br>descarga |
| (HZ)                  | (BPH) (BLSD)                                    |        | (BPH) (BLSD)                                    |        | (BPH) (BLSD)                               |        | (psi)                                 |
| 44                    | 573                                             | 13.760 | 680                                             | 16.320 | 538                                        | 12.904 | 669                                   |
| 46                    | 616                                             | 14.784 | 713                                             | 17.112 | 583                                        | 13.984 | 705                                   |
| 48                    | 661                                             | 15.872 | 741                                             | 17.784 | 619                                        | 14.864 | 741                                   |
| 50                    | 742                                             | 17.800 | 820                                             | 19.680 | 670                                        | 16.072 | 770                                   |
| 52                    | 852                                             | 20.456 | 942                                             | 22.616 | 789                                        | 18.928 | 723                                   |
| 54                    | 915                                             | 21.952 | 720                                             | 17.272 | 870                                        | 20.880 | 715                                   |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

**Figura 5.***Simulación realizada por BAKER***Fuente:** Elaboración propia a partir de software Beaker

**Descripción de tabla 5 y figura 5:** Los resultados evidenciaron un incremento progresivo del caudal conforme aumentó la frecuencia de operación, manteniéndose una tendencia lineal entre las variables analizadas. No obstante, se observaron diferencias consistentes entre el caudal teórico y el caudal real medido, siendo este último inferior en todos los escenarios evaluados. Por ejemplo, a 52 Hz el caudal teórico fue de 942 BPH (22.616 BLSD), mientras que el caudal real registrado fue de 789 BPH (18.928 BLSD), lo que representó una desviación aproximada del 16,24 %, asociada a pérdidas volumétricas internas y condiciones hidráulicas propias del sistema, no fue posible aumentar la frecuencia superior a 54 Hz por restricción en el variador de frecuencia.

En cuanto a la presión de descarga, la bomba presentó valores variables entre 669 psi y 770 psi, con un comportamiento ascendente hasta los 50 Hz, seguido de una ligera reducción en las frecuencias superiores. Esta variación indicó la existencia de cambios en la carga hidráulica del sistema, posiblemente relacionados con la interacción entre las bombas operando en paralelo y la respuesta dinámica de la red de inyección.

La simulación operativa desarrollada mediante el software Baker permitió validar el perfil de operación de la bomba frente a las curvas características del fabricante, evidenciando que la bomba P-105C operó en varios puntos fuera de su rango óptimo de eficiencia lo que reafirmó la necesidad de implementar un modelo de mantenimiento basado en condición y eficiencia energética

#### 4.3.4 Pruebas bomba P 105-D

**Tabla 6.**

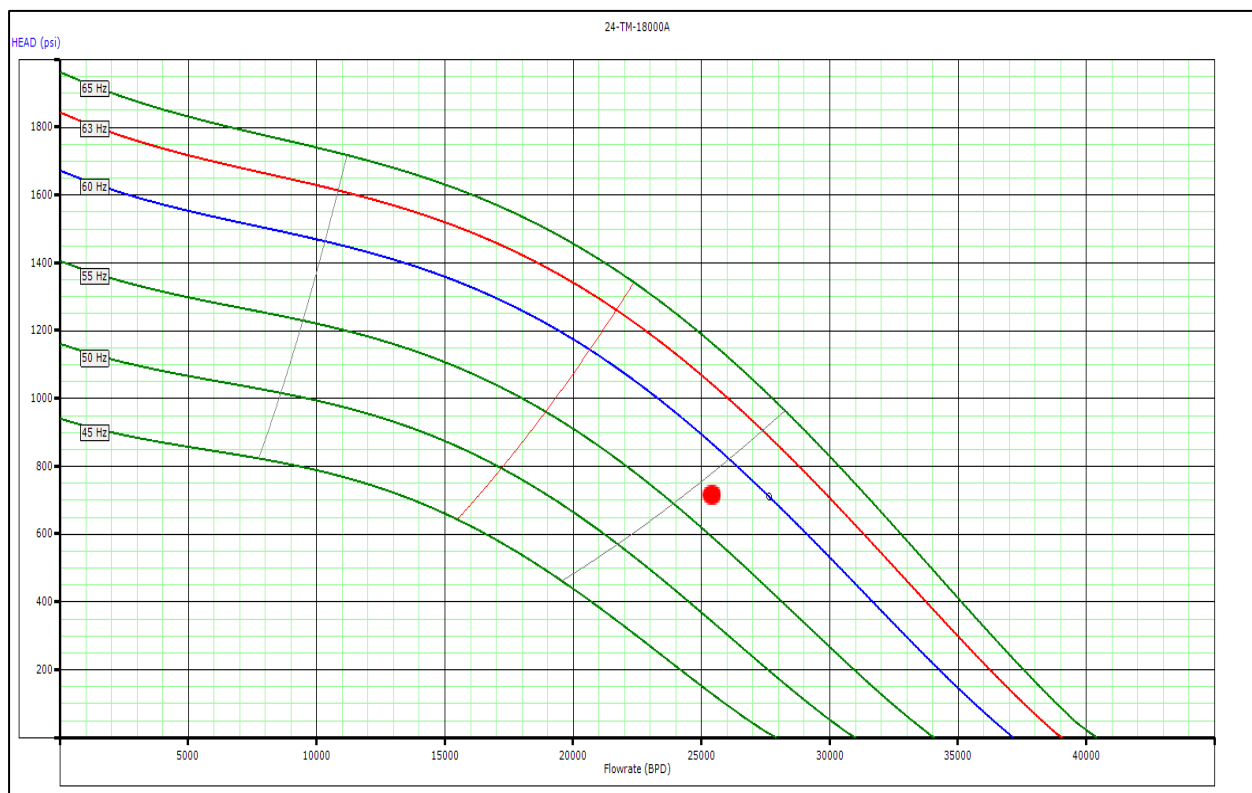
*Datos operacionales prueba bomba P 105 D.*

| <b>PRUEBAS BOMBA P 105 D</b> |                                                          |               |                                                          |               |                                                     |               |                                             |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------|
| <b>Frecuencia</b>            | <b>Promedio de FIT<br/>descarga bombas<br/>(platina)</b> |               | <b>Promedio de FIT<br/>descarga bombas<br/>(teórico)</b> |               | <b>Promedio de FIT<br/>medidor no<br/>intrusivo</b> |               | <b>Promedio de<br/>Presión<br/>descarga</b> |
| <b>(HZ)</b>                  | <b>(BPH) (BLSD)</b>                                      |               | <b>(BPH) (BLSD)</b>                                      |               | <b>(BPH) (BLSD)</b>                                 |               | <b>(psi)</b>                                |
| <b>44</b>                    | 616                                                      | 14.776        | 620                                                      | 14.880        | 583                                                 | 14.000        | <b>548</b>                                  |
| <b>46</b>                    | 651                                                      | 15.624        | 671                                                      | 16.112        | 631                                                 | 15.144        | <b>672</b>                                  |
| <b>48</b>                    | 699                                                      | 16.776        | 751                                                      | 18.024        | 713                                                 | 17.112        | <b>675</b>                                  |
| <b>50</b>                    | 750                                                      | 17.992        | 823                                                      | 19.752        | 767                                                 | 18.416        | <b>681</b>                                  |
| <b>52</b>                    | 799                                                      | 19.168        | 902                                                      | 21.648        | 847                                                 | 20.328        | <b>680</b>                                  |
| <b>54</b>                    | 850                                                      | 20.400        | 976                                                      | 23.416        | 923                                                 | 22.144        | <b>674</b>                                  |
| <b>56</b>                    | 902                                                      | 21.648        | 1.045                                                    | 25.088        | 978                                                 | 23.472        | <b>666</b>                                  |
| <b>58</b>                    | 922                                                      | 22.120        | 1.112                                                    | 26.688        | 1.036                                               | 24.856        | <b>671</b>                                  |
| <b>60</b>                    | <b>953</b>                                               | <b>22.872</b> | <b>1.128</b>                                             | <b>27.064</b> | <b>1.070</b>                                        | <b>25.672</b> | <b>749</b>                                  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

**Figura 6.**

*Simulación realizada por BAKER P 105 D.*



**Fuente:** Elaboración propia a partir de software Beaker

**Descripción tabla 6 y figura 6:** Los resultados evidenciaron un incremento progresivo del caudal conforme aumentó la frecuencia de operación, manteniéndose una tendencia lineal entre las variables analizadas. No obstante, se observaron diferencias consistentes entre el caudal teórico y el caudal real medido, siendo este último inferior en todos los escenarios evaluados. Por ejemplo, a 54 Hz el caudal teórico fue de 976 BPH (23.416 BLSD), mientras que el caudal real registrado fue de 923 BPH (22.144 BLSD), lo que representó una desviación aproximada del 5,43%, asociada a pérdidas volumétricas internas y condiciones hidráulicas propias del sistema.

El comportamiento de la presión de descarga se mantuvo relativamente estable entre 548 psi y 749 psi, mostrando una tendencia ascendente conforme aumentó la frecuencia de

operación, lo cual indicó que el sistema respondió de manera consistente al incremento de energía suministrada al equipo. Este patrón confirmó que la bomba operó dentro de un régimen hidráulico normal, sin presencia de inestabilidades severas asociadas a cavitación o recirculación interna.

La simulación operativa realizada mediante el software Baker permitió contrastar los datos reales con el modelo teórico del fabricante, evidenciando desviaciones relevantes en el caudal efectivo, especialmente en los rangos superiores de frecuencia. Estos resultados sustentaron la necesidad de ajustar los parámetros de operación y establecer una línea base energética realista, con el fin de optimizar el desempeño del sistema de inyección y mejorar la confiabilidad de las decisiones de mantenimiento y control operativo.

Con las pruebas realizadas se verificó el caudal real de inyección a partir de la medición externa suministrada por Proasem, evidenciándose que, en promedio, la diferencia frente a los valores registrados en el sistema SCADA fue inferior a 7.100 BLSD. Esta variación se consideró aceptable dentro de los márgenes operativos del sistema, teniendo en cuenta las condiciones reales de campo, las pérdidas hidráulicas propias del proceso y las tolerancias asociadas a los instrumentos de medición.

Así mismo, las diferencias de volumen registradas entre el promedio del FIT de descarga en platina, el caudal teórico del fabricante y el promedio del FIT medido mediante sensor no intrusivo se analizaron de manera comparativa para cada frecuencia de operación. En cada punto se registraron tres mediciones independientes con el fin de reducir la incertidumbre y obtener un valor promedio más representativo, lo que permitió mejorar la confiabilidad de los datos y sustentar técnicamente los resultados del diagnóstico hidráulico y energético del sistema.

**Tabla 7.***Volumen registrado bomba P 105-A*

| <b>PRUEBAS BOMBA P 105 A</b> |                                                          |              |                                                          |              |                                                             |                                                 |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Frecuencia</b>            | <b>Promedio de FIT<br/>descarga bombas<br/>(platina)</b> |              | <b>Promedio de FIT<br/>descarga bombas<br/>(teórico)</b> |              | <b>Promedio<br/>de FIT<br/>medidor<br/>no<br/>intrusivo</b> | <b>Promedio<br/>de<br/>Presión<br/>descarga</b> |
| <b>(HZ)</b>                  | <b>(BLSD)<br/>DIFERENCIA</b>                             |              | <b>(BLSD)<br/>DIFERENCIA</b>                             |              | <b>(BLSD)</b>                                               | <b>(psi)</b>                                    |
| <b>44</b>                    | 13.232                                                   | 2.008        | 14.504                                                   | 3.280        | 11.224                                                      | <b>674</b>                                      |
| <b>46</b>                    | 14.360                                                   | 1.632        | 16.200                                                   | 3.472        | 12.728                                                      | <b>702</b>                                      |
| <b>48</b>                    | 15.864                                                   | 1.992        | 17.328                                                   | 3.456        | 13.872                                                      | <b>703</b>                                      |
| <b>50</b>                    | 18.016                                                   | 1.928        | 19.192                                                   | 3.104        | 16.088                                                      | <b>709</b>                                      |
| <b>52</b>                    | 19.728                                                   | 2.104        | 21.128                                                   | 3.504        | 17.624                                                      | <b>707</b>                                      |
| <b>54</b>                    | 21.480                                                   | 2.728        | 22.880                                                   | 4.128        | 18.752                                                      | <b>708</b>                                      |
| <b>56</b>                    | 22.888                                                   | 2.016        | 24.536                                                   | 3.664        | 20.872                                                      | <b>705</b>                                      |
| <b>58</b>                    | 24.040                                                   | 1.808        | 25.304                                                   | 3.072        | 22.232                                                      | <b>705</b>                                      |
| <b>60</b>                    | <b>26.168</b>                                            | <b>2.552</b> | <b>27.664</b>                                            | <b>4.048</b> | <b>23.616</b>                                               | <b>712</b>                                      |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

**Descripción tabla 7:** El análisis de los resultados obtenidos para la bomba P 105 A evidenció diferencias sistemáticas entre los valores de caudal medidos en campo y los caudales estimados tanto por el instrumento instalado en platina como por el valor teórico del fabricante. En todos los puntos de operación evaluados (44 a 60 Hz), el caudal registrado por el medidor no intrusivo fue inferior al reportado por el sistema, lo que indicó una sobreestimación del volumen de inyección por parte de los instrumentos internos del proceso.

En promedio, la diferencia entre el caudal real medido y el valor reportado por el FIT de descarga en platina fue de 2.085 BLSD, mientras que la diferencia frente al valor teórico fue de 3.525 BLSD. Este comportamiento reflejó una desviación mayor respecto al modelo teórico del

fabricante, lo cual es consistente con condiciones reales de operación como pérdidas hidráulicas, desgaste interno de componentes y variaciones en la eficiencia volumétrica de la bomba.

**Tabla 8.**

*Registros de volumen bomba P 105 B.*

| <b>PRUEBAS BOMBA P 105 B</b> |                                                          |              |                                                          |              |                                                             |                                             |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Frecuencia</b>            | <b>Promedio de FIT<br/>descarga bombas<br/>(platina)</b> |              | <b>Promedio de FIT<br/>descarga bombas<br/>(teórico)</b> |              | <b>Promedio<br/>de FIT<br/>medidor<br/>no<br/>intrusivo</b> | <b>Promedio de<br/>Presión<br/>descarga</b> |
| <b>(HZ)</b>                  | <b>(BLSD) Diferencia</b>                                 |              | <b>(BLSD) Diferencia</b>                                 |              | <b>(BLSD)</b>                                               | <b>(psi)</b>                                |
| <b>44</b>                    | 16.136                                                   | 1.400        | 16.288                                                   | 1.552        | 14.736                                                      | <b>633</b>                                  |
| <b>46</b>                    | 16.792                                                   | 1.440        | 16.960                                                   | 1.608        | 15.352                                                      | <b>644</b>                                  |
| <b>48</b>                    | 18.008                                                   | 1.232        | 18.192                                                   | 1.416        | 16.776                                                      | <b>671</b>                                  |
| <b>50</b>                    | 19.296                                                   | 1.632        | 19.456                                                   | 1.792        | 17.664                                                      | <b>699</b>                                  |
| <b>52</b>                    | 20.440                                                   | 1.592        | 20.608                                                   | 1.760        | 18.848                                                      | <b>729</b>                                  |
| <b>54</b>                    | 21.608                                                   | 1.680        | 21.832                                                   | 1.904        | 19.928                                                      | <b>760</b>                                  |
| <b>56</b>                    | 24.112                                                   | 2.008        | 24.352                                                   | 2.248        | 22.104                                                      | <b>720</b>                                  |
| <b>58</b>                    | 25.984                                                   | 2.064        | 26.184                                                   | 2.264        | 23.920                                                      | <b>701</b>                                  |
| <b>60</b>                    | <b>27.576</b>                                            | <b>2.520</b> | <b>27.960</b>                                            | <b>2.904</b> | <b>25.056</b>                                               | <b>701</b>                                  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

**Descripción tabla nro. 8.** El análisis de los registros de volumen para la bomba P 105 B evidenció una mayor coherencia entre los caudales reportados por los instrumentos internos del sistema y los valores obtenidos mediante el medidor no intrusivo, en comparación con lo observado en la bomba P 105 A. En todos los puntos de operación evaluados entre 44 y 60 Hz, las diferencias de volumen se mantuvieron relativamente estables y dentro de rangos aceptables, lo que indicó un comportamiento hidráulico más consistente y un mejor estado operativo del equipo. En promedio, la diferencia entre el caudal medido y el valor reportado por el FIT de

descarga en platina fue de 1.730 BLSD, mientras que la diferencia frente al valor teórico fue de 1.939 BLSD. Estas desviaciones resultaron significativamente menores que las identificadas en la bomba P 105 A.

**Tabla 9.**

*Registros de volumen bomba P 105 C.*

| PRUEBAS BOMBA P 105 C |                                                 |            |                                                 |            |                                               |                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|
| Frecuencia            | Promedio de FIT<br>descarga bombas<br>(platina) |            | Promedio de FIT<br>descarga bombas<br>(teórico) |            | Promedio de<br>FIT<br>medidor no<br>intrusivo | Promedio<br>de<br>Presión<br>descarga |
| (HZ)                  | (BLSD)                                          | DIFERENCIA | (BLSD)                                          | DIFERENCIA | (BLSD)                                        | (psi)                                 |
| 44                    | 13.760                                          | 856        | 16.320                                          | 3.416      | 12.904                                        | 669                                   |
| 46                    | 14.784                                          | 800        | 17.112                                          | 3.128      | 13.984                                        | 705                                   |
| 48                    | 15.872                                          | 1.008      | 17.784                                          | 2.920      | 14.864                                        | 741                                   |
| 50                    | 17.800                                          | 1.728      | 19.680                                          | 3.608      | 16.072                                        | 770                                   |
| 52                    | 20.456                                          | 1.528      | 22.616                                          | 3.688      | 18.928                                        | 723                                   |
| 54                    | 21.952                                          | 1.072      | 17.272                                          | 3.608      | 20.880                                        | 715                                   |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

**Descripción de la tabla nro 9.** En el análisis se observó que el caudal reportado por el FIT de descarga en platina presentó diferencias moderadas frente a la medición no intrusiva, con una desviación promedio de 1.165 BLSD, lo que indicó una sobreestimación sistemática del volumen real de inyección, en comparación con el valor teórico del fabricante arrojó una diferencia promedio de 2.192 BLSD, un hallazgo relevante se presentó a 54 Hz, donde el caudal teórico (17.272 BLSD) resultó inferior al caudal real medido (20.880 BLSD), generando una diferencia negativa de -3.608 BLSD. Este comportamiento atípico indicó inconsistencias en el

modelo teórico aplicado o posibles errores de parametrización en las curvas del fabricante, lo que afectó la confiabilidad del valor de referencia en ese punto específico de operación.

En términos operativos, los resultados permitieron concluir que la bomba P 105 C presentó un desempeño menos estable en comparación con las bombas A y B, con mayores variaciones en su eficiencia volumétrica y una menor correspondencia entre el desempeño real y el teórico.

**Tabla 10.**

*Registros de volumen bomba P 105 D.*

| <b>PRUEBAS BOMBA P 105 D</b> |                                                          |              |                                                          |              |                                                             |                                             |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Frecuencia</b>            | <b>Promedio de FIT<br/>descarga bombas<br/>(platina)</b> |              | <b>Promedio de FIT<br/>descarga bombas<br/>(teórico)</b> |              | <b>Promedio<br/>de FIT<br/>medidor<br/>no<br/>intrusivo</b> | <b>Promedio<br/>de Presión<br/>descarga</b> |
| <b>(HZ)</b>                  | <b>(BLSD)<br/>Diferencia</b>                             |              | <b>(BLSD)<br/>Diferencia</b>                             |              | <b>(BLSD)</b>                                               | <b>(psi)</b>                                |
| <b>44</b>                    | 14.776                                                   | 776          | 14.880                                                   | 880          | 14.000                                                      | <b>548</b>                                  |
| <b>46</b>                    | 15.624                                                   | 480          | 16.112                                                   | 968          | 15.144                                                      | <b>672</b>                                  |
| <b>48</b>                    | 16.776                                                   | 336          | 18.024                                                   | 912          | 17.112                                                      | <b>675</b>                                  |
| <b>50</b>                    | 17.992                                                   | 424          | 19.752                                                   | 1.336        | 18.416                                                      | <b>681</b>                                  |
| <b>52</b>                    | 19.168                                                   | 1.160        | 21.648                                                   | 1.320        | 20.328                                                      | <b>680</b>                                  |
| <b>54</b>                    | 20.400                                                   | 1.744        | 23.416                                                   | 1.272        | 22.144                                                      | <b>674</b>                                  |
| <b>56</b>                    | 21.648                                                   | 1.824        | 25.088                                                   | 1.616        | 23.472                                                      | <b>666</b>                                  |
| <b>58</b>                    | 22.120                                                   | 2.736        | 26.688                                                   | 1.832        | 24.856                                                      | <b>671</b>                                  |
| <b>60</b>                    | <b>22.872</b>                                            | <b>2.800</b> | <b>27.064</b>                                            | <b>1.392</b> | <b>25.672</b>                                               | <b>749</b>                                  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

**Descripción de tabla nro 10.** En el análisis se observó que el caudal reportado por el FIT de descarga en platina presentó diferencias moderadas frente a la medición no intrusiva, con una

desviación promedio de 1.364 BLSD, mientras el valor teórico del fabricante arrojó una diferencia promedio de 1.281 BLSD.

A nivel global del sistema SIAR, operando con cuatro bombas a una frecuencia promedio de 52 Hz y una presión de descarga de 840 psi, el caudal total registrado por SCADA fue de 60.816 BLSD, mientras que el caudal real medido por Proasem fue de 53.717 BLSD. Esto representó una sobreestimación total de -7.099 BLSD, equivalente a una desviación aproximada del 11,7 %, lo que constituye un error operativo relevante desde el punto de vista de la gestión energética, la planificación de producción y la confiabilidad de los indicadores de desempeño.

En la siguiente tabla se establecen las diferencias en las mediciones de caudal del sistema Scada con respecto a las mediciones realizadas

**Tabla 11.**

*Registros caudales en las pruebas de eficiencia de las bombas.*

| <b>Frecuencia<br/>(Hz)</b> | <b>Frecuencia<br/>(Hz)</b> | <b>Caudal<br/>scada fit<br/>descarga<br/>bombas<br/>(teórico)<br/>(blsd)</b> | <b>Caudal<br/>Proasem<br/>(blsd)</b> | <b>Diferencia<br/>en<br/>medición</b> |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>BOMBA A</b>             | 52                         | 15.221                                                                       | 11.695                               | <b>-3.525</b>                         |
| <b>BOMBA B</b>             | 52                         | 15.190                                                                       | 13.435                               | <b>-1.754</b>                         |
| <b>BOMBA C</b>             | 52                         | 15.192                                                                       | 13.000                               | <b>-2.192</b>                         |
| <b>BOMBA D</b>             | 52                         | 15.214                                                                       | 15.586                               | <b>372</b>                            |
| <b>SIAR</b>                | <b>52</b>                  | <b>60.816</b>                                                                | <b>53.717</b>                        | <b>-7.099</b>                         |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

Los datos obtenidos durante las pruebas a una frecuencia constante de 52 Hz permiten evaluar el desempeño hidráulico del sistema bajo condiciones operativas estables, con cuatro bombas en funcionamiento simultáneo, una presión de descarga de 840 psi y un caudal total medido de 53.716 BLSD.

#### 4.3.5 Pruebas del sistema @ 54Hz (Bombas B – C – D)

Se realiza la prueba de eficiencia del sistema a una frecuencia de 54 Hz, obteniendo los siguientes datos registrados en el medidor externo (FIT medidor no intrusivo).

**Tabla 12.**

*Registros caudales en las pruebas de eficiencia de las bombas.*

| <b>PRUEBAS BOMBAS B - C - D</b> |                         |                          |                                      |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| <b>FRECUENCIA<br/>54 (HZ)</b>   | <b>CAUDAL<br/>(BBH)</b> | <b>CAUDAL<br/>(BLSD)</b> | <b>PRESION DE<br/>DESCARGA (PSI)</b> |
| <b>BOMBA B</b>                  | 759,65                  | 18.231,60                | 850                                  |
| <b>BOMBA C</b>                  | 729,15                  | 17.499,60                | 850                                  |
| <b>BOMBA D</b>                  | 779,27                  | 18.702,48                | 850                                  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

El análisis de las pruebas realizadas a una frecuencia de operación de 54 Hz para las bombas B, C y D evidenció un comportamiento relativamente homogéneo en términos de presión de descarga, la cual se mantuvo constante en 850 psi para los tres equipos, lo que indicó condiciones hidráulicas estables y comparables durante la ejecución de las mediciones. Esta uniformidad permitió realizar una evaluación directa del desempeño volumétrico individual sin la interferencia de variaciones significativas en las condiciones de carga del sistema.

En términos de caudal, la bomba D presentó el mayor volumen de inyección con 18.702,48 BLSD, seguida de la bomba B con 18.231,60 BLSD y la bomba C con 17.499,60 BLSD. El volumen total de inyección registrado para el sistema a 54 Hz fue de 54.434 BLSD, resultado consistente con la suma de los caudales individuales de las tres bombas evaluadas. Este valor permitió validar la coherencia de los datos operativos y evidenció una capacidad efectiva de inyección acorde con las condiciones de diseño del sistema.

#### **4.3.6 Pruebas del sistema @ 56Hz (Bombas B – C – D)**

Se realiza la prueba de eficiencia del sistema a una frecuencia de 56 Hz, en la bomba P 105 C personal de mantenimiento realiza modificación en los parámetros del variador obteniendo los siguientes datos registrados en el medidor externo (FIT medidor no intrusivo)

**Tabla 13.**

*Registros caudales en las pruebas de eficiencia de las bombas.*

| <b>PRUEBAS BOMBAS B - C - D</b> |                         |                          |                                          |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| <b>FRECUENCIA 56<br/>(HZ)</b>   | <b>CAUDAL<br/>(BBH)</b> | <b>CAUDAL<br/>(BLSD)</b> | <b>PRESION DE<br/>DESCARGA<br/>(PSI)</b> |
| <b>BOMBA B</b>                  | 797,1                   | 19.130,40                | <b>880</b>                               |
| <b>BOMBA C</b>                  | 769,45                  | 18.466,80                | <b>880</b>                               |
| <b>BOMBA D</b>                  | 836,6                   | 20.078,40                | <b>880</b>                               |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

El análisis de las pruebas de eficiencia realizadas a una frecuencia de operación de 56 Hz para las bombas B, C y D evidenció un incremento consistente tanto en el caudal de inyección como en la presión de descarga del sistema, la cual se estabilizó en 880 psi. Este comportamiento confirmó la relación directa entre el aumento de la velocidad de rotación de los equipos y la capacidad volumétrica del sistema, bajo condiciones hidráulicas controladas.

En términos de desempeño individual, la bomba D presentó el mayor caudal con 20.078,40 BLSD, seguida de la bomba B con 19.130,40 BLSD y la bomba C con 18.466,80 BLSD. Esta distribución reflejó diferencias en la eficiencia volumétrica de los equipos, asociadas al estado mecánico interno, características hidráulicas particulares y respuesta operativa frente al incremento de carga.

El volumen total de inyección del sistema a 56 Hz fue de 57.676 BLSD, valor coherente con la suma de los caudales individuales medidos externamente. Este resultado permitió validar la confiabilidad del sistema de medición no intrusivo y evidenció una mejora progresiva del rendimiento global del sistema frente a la condición registrada a 54 Hz, donde el volumen total fue de 54.434 BLSD.

Desde una perspectiva operativa y energética, los resultados indicaron que la operación a 56 Hz permitió maximizar la capacidad de inyección sin generar desviaciones críticas en la presión del sistema, lo que posicionó este rango de frecuencia como un punto técnicamente viable para la optimización del proceso.

#### ***4.3.7 Optimización operativa del sistema de agua de inyección de agua residual***

Al realizar las diferentes pruebas en el sistema se tiene los diferentes escenarios de operación, al operar el sistema con 3 bombas a 54 Hz y a 56 Hz, se tiene una optimización en la

operación.

**Tabla 14.**

*Escenarios de operación SIAR.*

| <b>ESCENARIOS DE OPERACIÓN BOMBAS A - B - C - D</b> |                                          |                                              |                                              |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>SISTEMA<br/>SIAR</b>                             | <b>52 Hz @ 840 Psi<br/>CAUDAL (BLSD)</b> | <b>54 Hz @ 850 Psi<br/>CAUDAL<br/>(BLSD)</b> | <b>56 Hz @ 880 Psi<br/>CAUDAL<br/>(BLSD)</b> |
| <b>BOMBA A</b>                                      | 11.695                                   |                                              |                                              |
| <b>BOMBA B</b>                                      | 13.435                                   | 18.231,60                                    | <b>19.130</b>                                |
| <b>BOMBA C</b>                                      | 13.000                                   | 17.499,60                                    | <b>18.467</b>                                |
| <b>BOMBA D</b>                                      | 15.586                                   | 18.702,48                                    | <b>20.078</b>                                |
| <b>SISTEMA<br/>SIAR</b>                             | <b>53.717</b>                            | <b>54.434</b>                                | <b>57.676</b>                                |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la medición

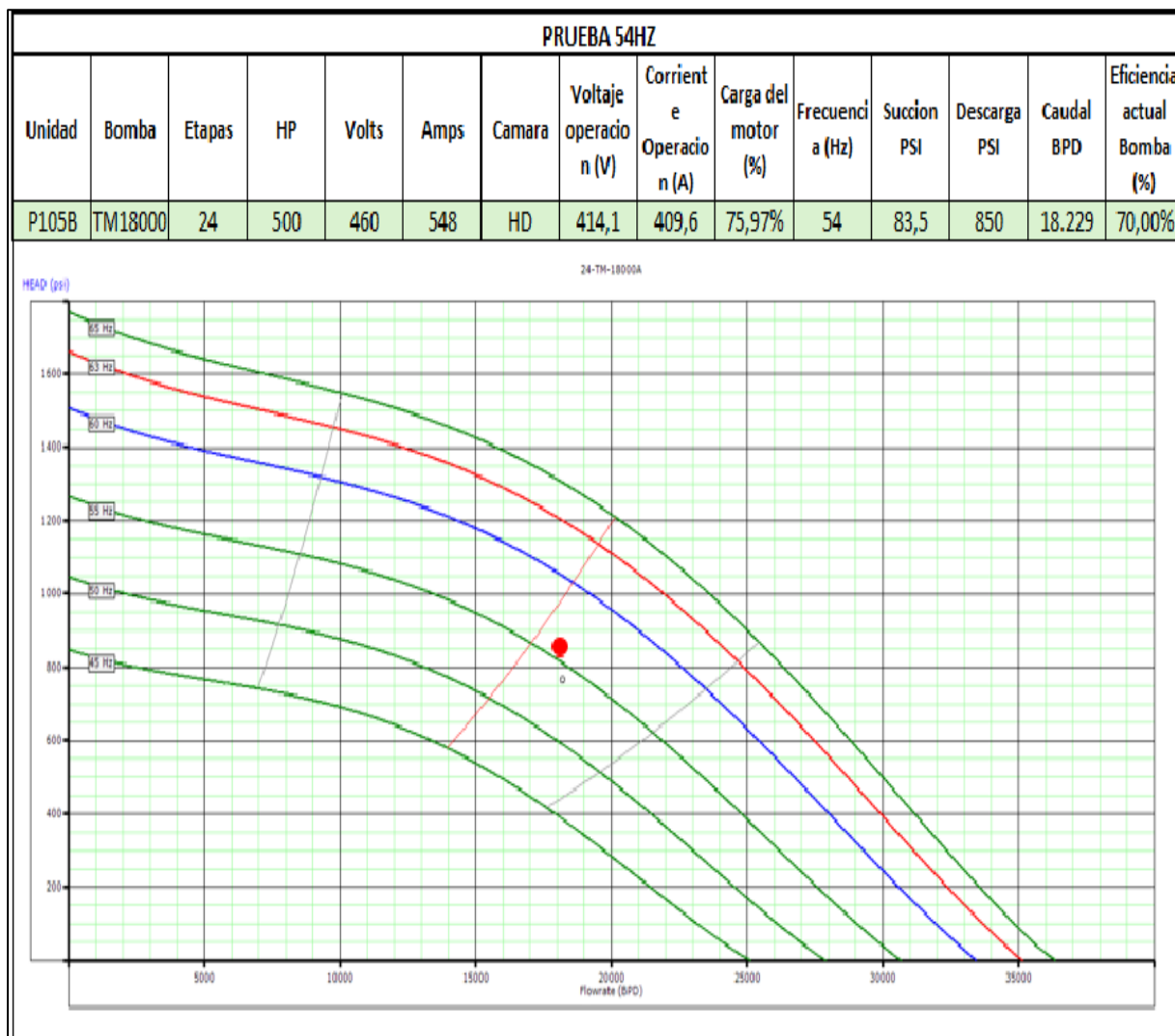
El análisis de los diferentes escenarios de operación del sistema de inyección de agua residual (SIAR) permitió identificar condiciones operativas con mayor eficiencia hidráulica y mejor aprovechamiento de la capacidad instalada.

Desde una perspectiva de optimización operativa, los resultados permitieron concluir que la operación del sistema con tres bombas a frecuencias entre 54 y 56 Hz resultó más eficiente que la operación tradicional con cuatro bombas a 52 Hz. Esta estrategia no solo incrementó el volumen real de inyección, sino que también ofreció ventajas potenciales en términos de reducción de consumo energético global, disminución del desgaste mecánico, simplificación del mantenimiento y mejora en la confiabilidad del sistema de inyección.

#### 4.4 Curvas del sistema 54 Hz @ 850 Psi.

**Figura 7.**

*Simulación operativa Baker bomba P 105 B.*

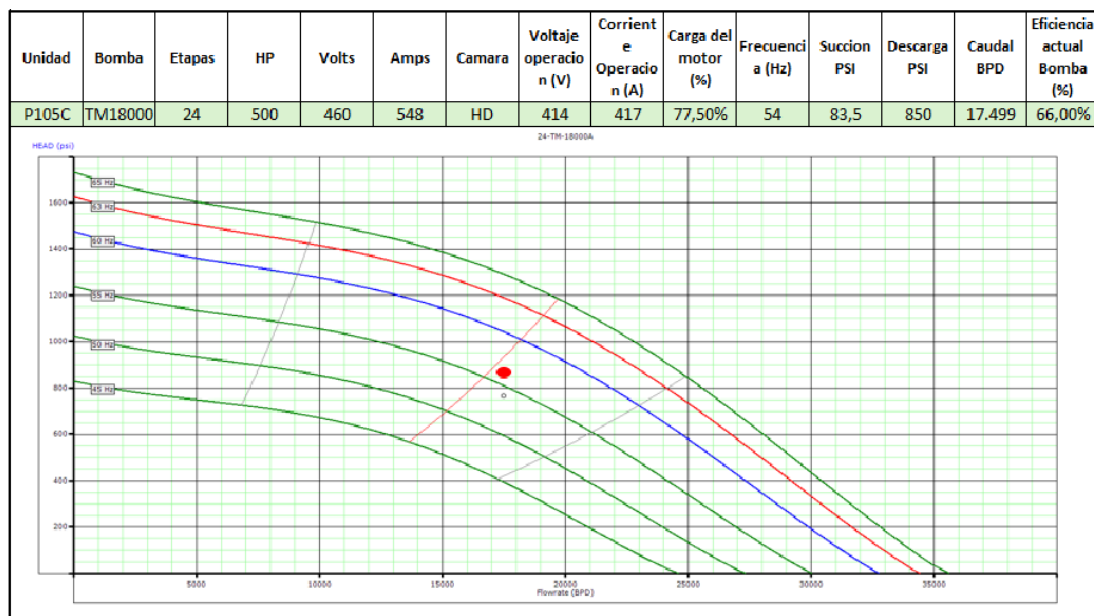


**Fuente:** Elaboración simulación operativa en Baker bomba P 105-B

#### 4.5 Pruebas bomba P 105-C

**Figura 8.**

*Simulación operativa BAKER bomba p 105 c*

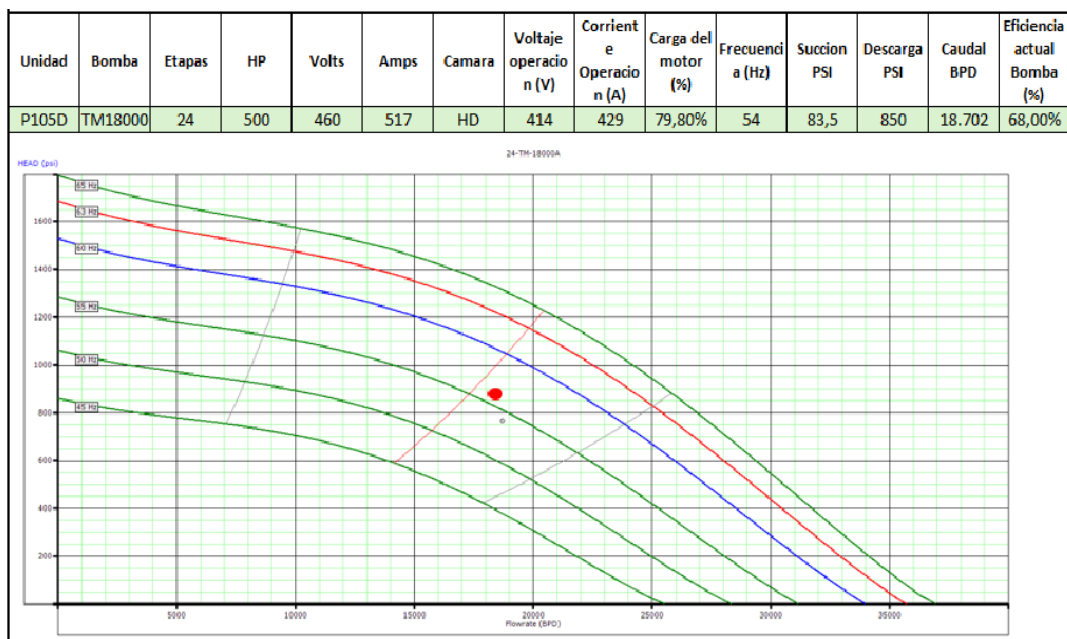


**Fuente:** Elaboración simulación operativa en Baker bomba P 105-C

#### 4.6 Pruebas bomba P 105-D

**Figura 9.**

*Simulación operativa Baker bomba P 105 D*



**Fuente:** Elaboración simulación operativa en Baker bomba P 105-D

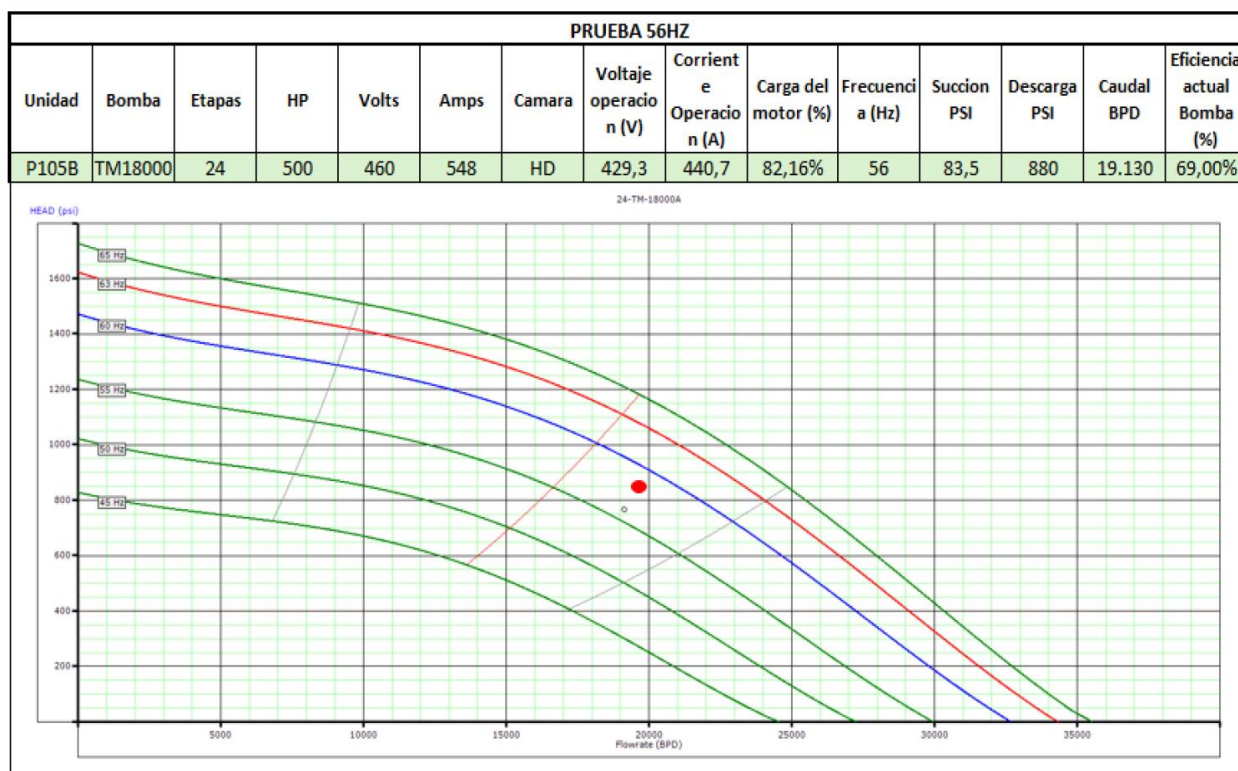
El análisis de la simulación operativa realizadas en el software Baker para las bombas P 105 B, C y D evidenció que el punto de operación del equipo se ubicó dentro del cono de eficiencia establecido por el fabricante. Este comportamiento indicó que, bajo las condiciones evaluadas, las bombas operaron próximas a su punto de mejor eficiencia (BEP), presentando un desempeño hidráulico estable y coherente con sus parámetros de diseño.

#### 4.7 Curvas del sistema 56 Hz @880 Psi

##### 4.7.1 Pruebas bomba P 105 B

**Figura 10.**

*Simulación operativa baker bomba p 105 b.*

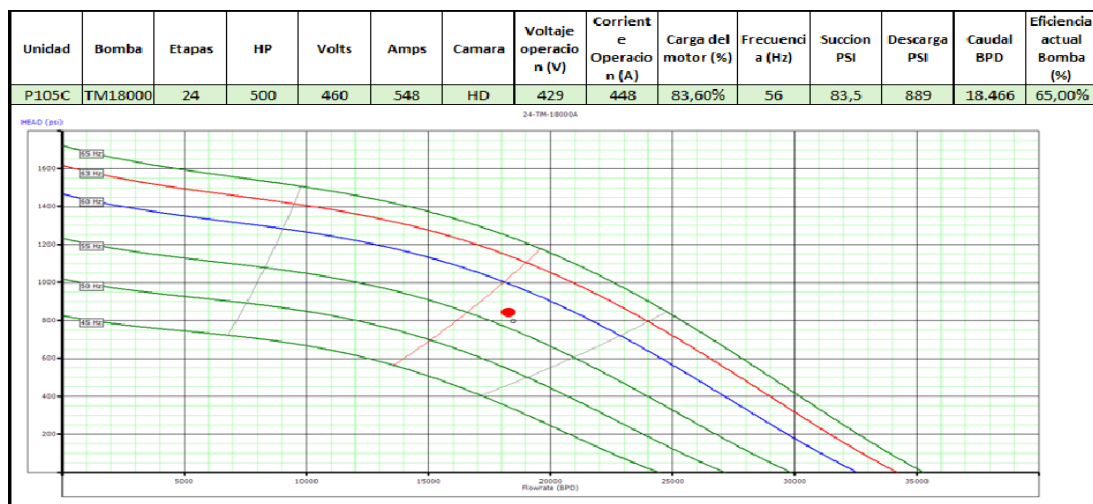


**Fuente:** Elaboración simulación operativa en Baker bomba P 105-B

#### 4.7.2 Pruebas bomba P 105 C

**Figura 11.**

*Simulación operativa Baker bomba P 105 C.*

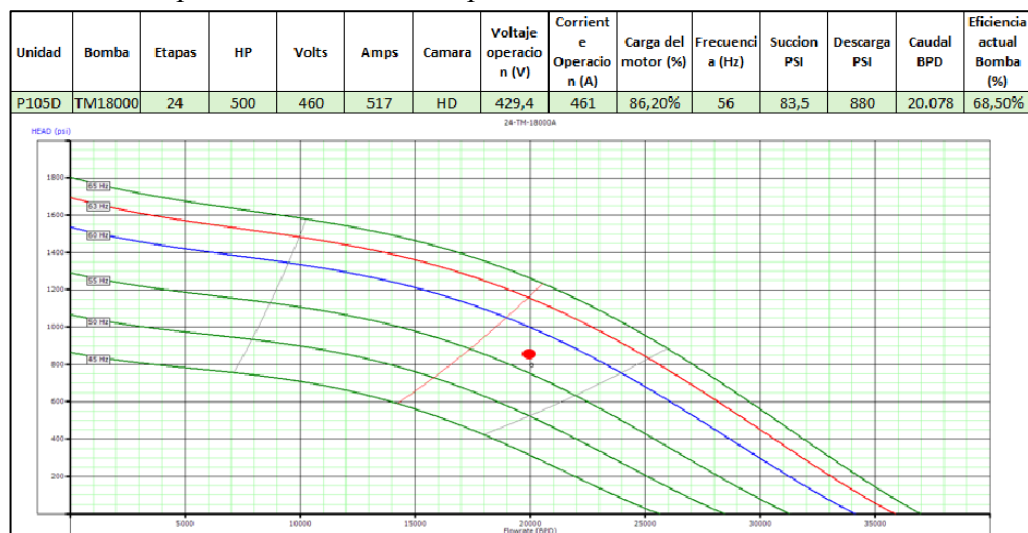


**Fuente:** Elaboración simulación operativa en Baker bomba P 105-C

#### 4.7.3 Pruebas bomba P 105 D

**Figura 12.**

*Simulación operativa baker bomba p 105 d*



**Fuente:** Elaboración simulación operativa en Baker bomba P 105-D

El análisis de la simulación operativa realizada en el software Baker para las bombas P 105 B, C y D permitió validar su comportamiento hidráulico bajo las condiciones reales de operación del sistema de inyección de agua residual. Las curvas obtenidas mostraron que el punto de operación del equipo se mantuvo dentro del cono de eficiencia definido por el fabricante, lo que indicó que las bombas operaron en un rango óptimo de desempeño.

#### **4.8 Resultados del análisis del sistema en escenarios optimizados**

Las pruebas del sistema operando con tres bombas (B, C y D) a frecuencias de 54 Hz y 56 Hz permitieron identificar escenarios de operación más eficientes desde el punto de vista energético y volumétrico. A 54 Hz y 850 psi, el sistema alcanzó un volumen de inyección de 54.434 BLSD, mientras que a 56 Hz y 880 psi se obtuvo un caudal de 57.676 BLSD, manteniendo las bombas dentro del cono óptimo de eficiencia.

Estos resultados demuestran que es técnicamente viable operar el sistema con tres bombas principales y una bomba de respaldo, sin afectar la integridad mecánica de los equipos ni la capacidad de inyección requerida. Adicionalmente, esta configuración reduce el número de equipos en operación continua, disminuyendo el consumo energético, el desgaste mecánico y la probabilidad de fallas.

#### **4.9 Resultados del análisis económico y energético**

El análisis costo–beneficio evidenció que la optimización operativa del sistema permite apagar una bomba principal de 500 HP y una bomba booster de 60 HP, generando un ahorro energético mensual aproximado de COP \$134.550.977 y un ahorro anual de COP \$1.614.611.724.

Adicionalmente, el análisis de históricos de mantenimiento extraídos del sistema SAP mostró que el costo promedio anual de mantenimiento preventivo del sistema es de COP \$70.088.295, mientras que los costos correctivos superan los COP \$436 millones acumulados en el periodo 2023–2025. La reducción de horas de operación de los equipos críticos implica una disminución directa de estos costos, fortaleciendo la sostenibilidad financiera del sistema.

En términos globales, el beneficio económico anual estimado de la optimización operativa del SIAR asciende a COP \$1.684.700.019, integrando ahorros energéticos y de mantenimiento.

#### **4.10 Desempeño hidráulico frente al punto de mejor eficiencia (BEP)**

El análisis de las curvas características de las bombas, contrastadas con los datos reales de operación, permitió identificar un patrón común en los cuatro equipos: la operación se encuentra estructuralmente desplazada del punto de mejor eficiencia hidráulica (BEP).

En condiciones reales, las bombas operan de manera frecuente a caudales inferiores o superiores al rango óptimo definido por el fabricante, lo cual genera:

- Incremento de pérdidas hidráulicas internas.
- Aumento de vibraciones y esfuerzos mecánicos.
- Reducción progresiva de la eficiencia volumétrica.
- Mayor susceptibilidad a fenómenos de cavitación y recirculación interna.

Este comportamiento confirma que el sistema no cuenta con un mecanismo de control operativo orientado a mantener los equipos dentro de su zona de máxima eficiencia, sino que privilegia la capacidad de respuesta inmediata ante las exigencias del proceso, aun cuando ello implique un deterioro gradual del desempeño energético y mecánico.

La operación prolongada fuera del BEP configura un escenario de desgaste acelerado de componentes críticos como impulsores, sellos mecánicos y rodamientos, lo cual impacta directamente en la confiabilidad y en la frecuencia de intervenciones de mantenimiento.

#### **4.11 Análisis del consumo energético e indicadores de desempeño (EnPIs)**

El análisis del consumo energético permitió establecer una línea base de desempeño del sistema, a partir de indicadores de consumo específico ( $\text{kWh/m}^3$  inyectado) y de potencia demandada en función del caudal real de operación.

Los resultados evidencian que el sistema presenta un consumo energético superior al esperado para equipos de características similares, lo cual se explica por la combinación de los siguientes factores:

- Operación fuera del punto de mejor eficiencia.
- Desalineación progresiva entre motor y bomba.
- Degradación de componentes hidráulicos.
- Ausencia de estrategias de control de carga y balance hidráulico.

Desde el enfoque de la norma ISO 50001, se identificó que no existen indicadores formales de desempeño energético integrados al sistema de gestión de mantenimiento, lo cual limita la capacidad de la organización para evaluar tendencias de consumo, comparar escenarios operativos y establecer metas de mejora energética.

El consumo energético del sistema se gestiona de forma reactiva, sin un análisis sistemático de las causas estructurales del sobreconsumo, lo que impide la implementación de una gestión energética basada en datos y evidencia técnica.

#### **4.12 Brechas frente a estándares técnicos y normativos**

Al contrastar las prácticas actuales de operación y mantenimiento con los lineamientos de las normas ISO 50001, ISO 55001 y API 610, se identificaron brechas estructurales en los siguientes aspectos:

- Ausencia de indicadores energéticos formales integrados al sistema de mantenimiento.
- Inexistencia de líneas base energéticas documentadas.
- Falta de control sistemático del punto de operación hidráulica.
- Escasa utilización de herramientas de monitoreo por condición.
- Predominio de mantenimiento correctivo sobre estrategias predictivas.

Estas brechas evidencian que el sistema de bombeo se encuentra en un nivel de madurez bajo en términos de gestión energética y de activos, con una orientación operativa centrada en la disponibilidad inmediata del servicio, pero con escasa consideración del costo del ciclo de vida de los equipos.

#### **4.13 Síntesis de hallazgos críticos del diagnóstico**

De manera consolidada, el diagnóstico permitió establecer los siguientes hallazgos críticos:

- A. El sistema opera estructuralmente fuera del punto de mejor eficiencia, lo que genera un patrón crónico de sobreconsumo energético.
- B. Existe una relación directa entre ineficiencia hidráulica y degradación acelerada de componentes mecánicos.

C. El mantenimiento se gestiona bajo un enfoque reactivo, con limitada incorporación de criterios de eficiencia energética.

D. No se dispone de indicadores de desempeño energético ni de confiabilidad integrados a la toma de decisiones.

E. Las prácticas actuales presentan brechas significativas frente a los estándares internacionales de gestión energética y de activos.

En conjunto, estos hallazgos confirman que el sistema de bombeo de campo Jazmín presenta un desempeño energético y operacional subóptimo, derivado no solo de condiciones técnicas de los equipos, sino de un modelo de gestión de mantenimiento que no integra de manera sistemática la eficiencia energética como variable estratégica de desempeño.

#### **4.14 Técnicas de análisis aplicadas**

##### ***4.14.1 Análisis estadístico descriptivo***

Se aplicaron técnicas estadísticas descriptivas para caracterizar el comportamiento de las variables operativas y energéticas, incluyendo:

- Valores promedio.
- Desviación estándar.
- Tendencias temporales.
- Correlaciones entre variables hidráulicas (caudal, presión) y eléctricas (potencia, consumo energético).

Este análisis permitió identificar relaciones entre la variabilidad operativa y el incremento del consumo energético, así como posibles asociaciones entre desviaciones operativas y fallas recurrentes.

#### ***4.14.2 Análisis de curvas características y punto de mejor eficiencia (BEP)***

A partir de la información técnica del fabricante y de los datos reales de operación, se construyeron las curvas características de las bombas y se identificó el punto de mejor eficiencia (BEP). Posteriormente, se compararon las condiciones reales de operación con este punto óptimo, evaluando la magnitud y frecuencia de las desviaciones.

Este análisis permitió determinar si las bombas operan de manera sistemática dentro de su zona de máxima eficiencia o si presentan desplazamientos recurrentes que afectan su desempeño energético y mecánico.

#### ***4.14.3 Determinación de indicadores de desempeño energético (EnPIs)***

De acuerdo con la norma ISO 50006:2014, se definieron indicadores de desempeño energético (EnPIs) orientados a evaluar la eficiencia del sistema de bombeo, tales como:

- Consumo energético específico (kWh/m<sup>3</sup> de agua inyectada).
- Relación potencia demandada vs caudal entregado.
- Consumo energético por hora de operación.

Estos indicadores permitieron establecer una línea base energética del sistema y evidenciar oportunidades de mejora asociadas a la optimización de la operación hidráulica.

#### ***4.14.4 Estimación de indicadores de confiabilidad operacional***

A partir de los registros de mantenimiento, se estimaron indicadores básicos de confiabilidad operacional, tales como:

- Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF).
- Tiempo Medio de Reparación (MTTR).

Aunque el estudio no tuvo como alcance la modelación estadística avanzada de confiabilidad, estos indicadores permitieron evaluar de manera comparativa el desempeño de los equipos y su relación con las condiciones reales de operación.

#### **4.15 Resultados del análisis energético**

El análisis del consumo energético, a partir de los registros de potencia eléctrica, factor de carga y consumo acumulado de energía (kWh), permitió identificar que las bombas presentan un consumo energético sensible a las condiciones de operación. En particular, se observó que los periodos de mayor variabilidad operativa coinciden con incrementos en el consumo energético específico del sistema.

La operación fuera del BEP se traduce en una menor eficiencia hidráulica, lo cual obliga a los motores eléctricos a demandar mayor potencia para cumplir con los requerimientos del proceso. Este fenómeno incrementa el consumo energético sin generar un beneficio proporcional en términos de caudal o presión efectiva, constituyéndose en una fuente de ineficiencia energética.

Desde el enfoque de la norma ISO 50001, este comportamiento evidencia la ausencia de indicadores energéticos (EnPIs) que permitan monitorear de manera sistemática la relación entre energía consumida y volumen de agua inyectada. La falta de estos indicadores limita la

capacidad de identificar pérdidas energéticas y de implementar acciones correctivas orientadas a la optimización del desempeño energético del sistema.

En este contexto, la integración de EnPIs con indicadores de mantenimiento basados en condición resulta crítica para la gestión operativa del sistema, ya que permite correlacionar variables energéticas con el estado funcional de los equipos. El seguimiento conjunto de parámetros como potencia específica (kWh/BLSD), eficiencia hidráulica estimada, factor de carga y comportamiento de vibraciones o temperatura, posibilita la identificación de desviaciones incipientes asociadas a fenómenos como cavitación, recirculación interna, desalineación o desgaste de componentes hidráulicos. Estas variaciones, aunque inicialmente sutiles, generan firmas energéticas características que pueden ser detectadas mediante análisis de tendencia y control estadístico.

De esta manera, los indicadores energéticos no solo cuantifican el desempeño, sino que actúan como variables precursoras de falla, permitiendo anticipar degradaciones funcionales antes de que se manifiesten en eventos críticos. Esto habilita la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, en las cuales las intervenciones se programan con base en umbrales de desempeño y no en frecuencias fijas, optimizando la confiabilidad, reduciendo paradas no programadas y minimizando el costo energético asociado a la operación ineficiente del sistema.

#### **4.16 Resultados del diagnóstico del estado actual de las bombas de inyección**

El diagnóstico del estado actual de las bombas de inyección de agua residual del campo Jazmín se realizó a partir del análisis detallado de los registros históricos de mantenimiento extraídos del sistema de gestión (SAP PM), complementados con la revisión documental del

instructivo operacional SIAR y la caracterización funcional de los equipos que conforman el sistema de bombeo.

Las bombas objeto de estudio corresponden a bombas centrífugas de inyección, asociadas a motores eléctricos de potencia media–alta y a componentes auxiliares críticos como cámaras de empuje, acoplamientos, sistemas de sellado y lubricación. Estos equipos operan de manera continua y constituyen un elemento esencial para garantizar la disposición adecuada del agua residual producida durante la operación del campo.

El análisis de las órdenes de trabajo evidenció que las bombas presentan una alta frecuencia de intervenciones técnicas, principalmente asociadas a actividades de análisis de condición rotativo, inspecciones mecánicas, ajustes y correcciones sobre componentes dinámicos. Esta recurrencia de actividades de mantenimiento indica que los equipos operan bajo condiciones severas, con altos niveles de exigencia mecánica y operacional.

Desde el punto de vista operativo, se identificó que las bombas trabajan en escenarios de variabilidad de caudal y presión, propios de los procesos de inyección de agua residual. Esta variabilidad, cuando no es adecuadamente controlada, puede generar desviaciones del punto de mejor eficiencia (BEP), incrementando las pérdidas hidráulicas y el esfuerzo mecánico sobre los componentes internos de la bomba.

El diagnóstico también permitió evidenciar que los principales componentes intervenidos corresponden a motores eléctricos, bombas centrífugas y cámaras de empuje, lo cual sugiere la presencia de fenómenos como desalineación, vibraciones excesivas, desgaste prematuro de sellos y posibles condiciones de cavitación. Estas condiciones son coherentes con sistemas de bombeo que operan fuera de sus parámetros óptimos de diseño.

Adicionalmente, se observó que, si bien se realizan actividades de monitoreo y análisis de condición, estas se ejecutan de forma reactiva o como respuesta a desviaciones ya manifestadas, y no como parte de un esquema integrado de diagnóstico continuo orientado a la optimización del desempeño operativo y energético.

Desde la perspectiva de la gestión de activos, el estado actual de las bombas refleja una gestión centrada en la disponibilidad inmediata del equipo, priorizando la continuidad del proceso sobre la eficiencia operativa y el costo del ciclo de vida. Esta situación limita la capacidad de la organización para anticipar fallas, optimizar la operación hidráulica y reducir el impacto energético del sistema de bombeo.

#### **4.17 Resultados del análisis de confiabilidad operacional**

A partir del análisis de las órdenes de mantenimiento registradas, se evidenció una recurrencia de intervenciones sobre los mismos equipos en periodos relativamente cortos, lo cual permite inferir un desempeño de confiabilidad inferior al esperado para bombas centrífugas diseñadas para operación continua. Este comportamiento indica que, pese a la ejecución de actividades de mantenimiento, los equipos no están alcanzando niveles adecuados de estabilidad operacional ni de vida útil esperada.

La repetitividad de actividades de mantenimiento en bombas y motores eléctricos sugiere que las fallas no están siendo abordadas desde sus causas raíz, sino que se gestionan principalmente mediante acciones correctivas o preventivas tradicionales. Este enfoque reactivo-preventivo limita la mejora sostenida de la confiabilidad del sistema y genera impactos negativos tanto en la disponibilidad operativa como en la continuidad del proceso de inyección de agua residual, incrementando la probabilidad de paradas no programadas y sobre costos asociados.

Desde una perspectiva de gestión de activos físicos, estos resultados evidencian una oportunidad clara para la aplicación de estrategias de mantenimiento basadas en condición (Condition Based Maintenance – CBM), orientadas a la detección temprana de fallas potenciales, la anticipación de fallas funcionales y la reducción de la frecuencia de intervenciones no planificadas. La implementación efectiva de este enfoque permitiría migrar desde un modelo centrado en la reacción ante la falla hacia uno orientado a la prevención y optimización del desempeño del activo a lo largo de su ciclo de vida.

El análisis de confiabilidad operacional de las bombas de inyección de agua residual del campo Jazmín se desarrolló con un enfoque integral, combinando principios de la ingeniería de confiabilidad, la gestión de activos físicos y el análisis del comportamiento operativo real de los equipos. Este análisis se sustentó principalmente en la información histórica de órdenes de mantenimiento, registros de inspección, análisis de condición rotativo y en la revisión de los lineamientos operativos establecidos en el instructivo SIAR.

El análisis de los registros históricos evidenció un patrón de fallas repetitivas concentradas principalmente en componentes rotativos y mecánicos críticos, tales como rodamientos, sellos mecánicos, ejes, acoplamientos y cámaras de empuje. Este comportamiento es consistente con lo descrito en la literatura técnica sobre maquinaria rotativa, donde se establece que la recurrencia de fallas en los mismos componentes es indicativa de una confiabilidad limitada y de una gestión del mantenimiento enfocada en la corrección de síntomas más que en la eliminación de causas raíz (Moubray, 1997).

Desde la óptica del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), este escenario refleja que las fallas funcionales no están siendo precedidas de acciones preventivas o predictivas suficientemente oportunas, a pesar de la existencia de actividades de monitoreo.

Conceptualmente, el comportamiento observado puede representarse mediante el siguiente esquema de degradación:

Falla potencial detectada → Anomalía operativa persistente → Degradación progresiva del componente → Falla funcional → Intervención correctiva

Este esquema pone en evidencia que la detección temprana de fallas potenciales no siempre se traduce en decisiones de mantenimiento efectivas, lo cual reduce el impacto positivo del mantenimiento basado en condición (CBM) y prolonga la operación del equipo en condiciones subóptimas.

En términos de indicadores de confiabilidad, la alta frecuencia de intervenciones sugiere valores reducidos del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y una mayor tasa de ocurrencia de fallas correctivas. Aunque el estudio no cuantifica directamente estos indicadores, la recurrencia observada constituye un indicador cualitativo robusto de desempeño inferior al esperado para equipos diseñados para operación continua. De acuerdo con la norma ISO 55000 (2014), este tipo de comportamiento evidencia una gestión de activos orientada a restablecer la función, pero no a optimizar el desempeño ni el costo del ciclo de vida del activo.

Adicionalmente, la confiabilidad operacional de las bombas se ve fuertemente influenciada por las condiciones reales de operación. La literatura especializada señala que la operación de bombas centrífugas fuera del punto de mejor eficiencia (BEP) incrementa las cargas dinámicas, las vibraciones y los esfuerzos térmicos, acelerando los mecanismos de falla como cavitación, fatiga mecánica y desgaste prematuro de componentes (Bloch & Geitner, 2012).

#### 4.18 Resultados integrados del diagnóstico energético – operativo

De manera integrada, los resultados de la Fase 1 evidencian que el sistema de bombas de inyección de agua residual del campo Jazmín presenta:

- Desviaciones recurrentes entre la operación real y las condiciones óptimas de diseño.
- Ineficiencias energéticas asociadas a la operación fuera del BEP.
- Ausencia de indicadores energéticos que permitan una gestión sistemática del consumo de energía e impactos directos de las condiciones operativas sobre la confiabilidad y la frecuencia de fallas.

Estos resultados confirman que la eficiencia energética, la confiabilidad operacional y el mantenimiento del sistema se encuentran estrechamente interrelacionados, y que la mejora del desempeño del sistema de bombeo requiere un enfoque integrado que articule operación, energía y mantenimiento.

#### 4.19 Resultados del análisis de costos de mantenimiento

**Tabla 7.**

*Escenarios de operación SIAR*

| <b>ESCENARIOS DE OPERACIÓN BOMBAS A - B - C - D</b> |                                      |                                      |                                      |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>SISTEMA SIAR</b>                                 | <b>52 Hz @ 840 Psi CAUDAL (BLSD)</b> | <b>54 Hz @ 850 Psi CAUDAL (BLSD)</b> | <b>56 Hz @ 880 Psi CAUDAL (BLSD)</b> |
| <b>BOMBA A</b>                                      | 11.695                               |                                      |                                      |
| <b>BOMBA B</b>                                      | 13.435                               | 18.231,60                            | <b>19.130</b>                        |
| <b>BOMBA C</b>                                      | 13.000                               | 17.499,60                            | <b>18.467</b>                        |
| <b>BOMBA D</b>                                      | 15.586                               | 18.702,48                            | <b>20.078</b>                        |
| <b>SISTEMA SIAR</b>                                 | <b>53.717</b>                        | <b>54.434</b>                        | <b>57.676</b>                        |

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 8.***Beneficio económico optimización operativa.*

| <b>BOMBA</b>                         | <b>HP</b> | <b>KW/h</b> | <b>KW - Mes</b> | <b>\$ KW - Mes</b>    | <b>\$ KW - Año</b>      |
|--------------------------------------|-----------|-------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>BOMBA BOOSTER</b>                 | 60        | 33.57       | 24.170          | \$ 11.785.487         | <b>\$ 141.425.844</b>   |
| <b>BOMBA PRINCIPAL</b>               | 500       | 279.75      | 251.775         | \$ 122.765.490        | <b>\$ 1.473.185.880</b> |
| <b>Ahorro eficiencia energética.</b> |           |             |                 | <b>\$ 134.550.977</b> | <b>\$ 1.614.611.724</b> |

*Fuente:* Elaboración propia.

El análisis de los costos reales asociados a las órdenes de trabajo permitió establecer que las actividades de mantenimiento representan un impacto económico recurrente y estructural para la operación del campo Jazmín. Si bien los costos individuales de cada intervención varían en función del tipo de actividad, nivel de complejidad técnica y recursos requeridos, la alta frecuencia de intervenciones sobre los mismos equipos genera un incremento significativo en el costo total del ciclo de vida de los activos, evidenciando ineficiencias en el modelo de gestión actual.

En este contexto, los resultados de las pruebas operativas permitieron definir una nueva configuración del sistema SIAR, consistente en la operación con tres bombas principales dentro del rango de frecuencia entre 54 Hz y 56 Hz, manteniendo una bomba adicional como respaldo. Esta estrategia permitió prescindir de una bomba principal equipada con motor de 500 HP y una bomba booster con motor de 60 HP, sin afectar la capacidad de inyección del sistema, lo que representó una optimización energética significativa y una reducción directa de la carga eléctrica instalada.

La evaluación económica de esta optimización, considerando un costo unitario de energía de COP \$487,6 por kWh, evidenció un ahorro mensual estimado de COP \$134.550.977 y un ahorro anual de COP \$1.614.611.724, derivados exclusivamente de la reducción en el consumo energético de los motores fuera de operación. Este beneficio económico se consolidó como uno de los principales resultados del proyecto, al demostrar que es posible incrementar el desempeño operativo del sistema con una menor demanda energética. Adicionalmente, el análisis de los costos históricos de mantenimiento, extraídos del sistema SAP para el periodo 2023–2025, mostró que el costo promedio anual de mantenimiento preventivo ascendió a COP \$2.158.917, mientras que el costo de mantenimiento correctivo alcanzó en promedio COP \$67.929.378. Estos valores reflejaron una alta proporción de gasto asociada a intervenciones reactivas.

**Tabla 9.**

*Costos de mantenimiento SIAR.*

| Costos<br>mantenimiento<br>sistema de<br>inyección | Mantenimiento preventivo |                      |                     | Mantenimiento correctivo |                       |                       |
|----------------------------------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                    | 2023                     | 2024                 | 2025                | 2023                     | 2024                  | 2025                  |
| <b>JAZ-MJAZ-<br/>REIN-AGUI-<br/>UBOMINY105A</b>    | \$ 3.314.529             | \$ 2.081.858         | \$ 1.165.914        | \$ 4.699.145             | \$ 131.019.005        | \$ 110.883.855        |
| <b>JAZ-MJAZ-<br/>REIN-AGUI-<br/>UBOMINY105B</b>    | \$ 2.283.510             | \$ 1.429.422         | \$ 1.165.914        | \$ 1.960.929             | \$ 84.140.129         | \$ 104.991.532        |
| <b>JAZ-MJAZ-<br/>REIN-AGUI-<br/>UBOMINY105C</b>    | \$ 2.375.432             | \$ 4.246.348         | \$ 938.222          | \$ 1.715.536             | \$ 23.902.396         | \$ 200.942.064        |
| <b>JAZ-MJAZ-<br/>REIN-AGUI-<br/>UBOMINY105D</b>    | \$ 2.085.674             | \$ 3.979.133         | \$ 841.050          | \$ 2.444.912             | \$ 38.968.857         | \$ 19.484.174         |
| <b>Costos COP</b>                                  | <b>\$ 10.059.145</b>     | <b>\$ 11.736.761</b> | <b>\$ 4.111.100</b> | <b>\$ 100.820.522</b>    | <b>\$ 278.030.387</b> | <b>\$ 436.301.625</b> |

*Fuente:* Elaboración propia

#### ***4.19.1 Beneficio económico Optimización operativa del sistema de agua de inyección de agua residual***

El beneficio económico total de la Optimización operativa del sistema de agua de inyección de agua residual se calcula con el ahorro energético y el ahorro en costos de mantenimiento.

**Tabla 10.**

*Beneficio económico Optimización operativa del sistema de agua de inyección de agua residual*

| <b>Optimización operativa</b> | <b>Ahorro eficiencia energética anual</b> | <b>Ahorro costo mantenimiento anual</b> | <b>Beneficio económico Optimización operativa anual</b> |
|-------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                               | <b>\$ 1.614.611.724</b>                   | <b>\$ 70.088.295</b>                    | <b>\$ 1.684.700.019</b>                                 |

**Fuente:** Elaboración propia

El beneficio económico total derivado de la optimización operativa del sistema de agua de inyección de agua residual se determinó a partir de la integración de dos componentes fundamentales: el ahorro en consumo energético y la reducción de los costos asociados al mantenimiento de los equipos. Esta metodología permitió establecer una valoración económica integral del impacto de las mejoras operativas implementadas, considerando tanto los costos directos de operación como los costos de sostenimiento del sistema.

En conjunto, la optimización operativa del sistema de agua de inyección de agua residual genera un beneficio económico anual total de COP \$1.684.700.019, equivalente a aproximadamente MMCOP \$1,68 por año. Este resultado validó la viabilidad financiera del modelo propuesto y demostró que la implementación de estrategias de operación basadas en

eficiencia energética y confiabilidad constituye una alternativa económicamente sostenible para la gestión de activos industriales de alta criticidad.

#### **4.20 Resultados de la Fase 2: Análisis de fallas críticas y su impacto en la eficiencia energética**

La Fase 2 tuvo como propósito identificar y analizar los modos de falla que afectan la eficiencia energética y la disponibilidad operativa del sistema de bombeo, mediante la integración de información cualitativa (entrevistas semiestructuradas y observación en campo) y documental (procedimientos internos). El análisis se desarrolló a partir de técnicas de codificación temática, triangulación de fuentes y contraste con los lineamientos de las normas ISO 50001 e ISO 55001, garantizando consistencia metodológica y validez en los hallazgos.

##### ***4.20.1 Identificación de modos de falla críticos***

El proceso de análisis permitió identificar un conjunto de modos de falla recurrentes con incidencia directa en el desempeño energético y operativo de las bombas. Estos modos de falla se agrupan en categorías mecánicas, hidráulicas, eléctricas y operacionales:

- **Desalineación mecánica y desgaste de componentes:** asociada a prácticas de montaje deficientes y falta de control en intervenciones, generando pérdidas mecánicas y aumento en la potencia demandada.
- **Operación fuera del punto de mejor eficiencia (BEP):** originada por variaciones en las condiciones del proceso y ausencia de ajustes operativos, lo que induce ineficiencias hidráulicas y sobrecarga energética.

- **Deficiencias en la lubricación:** relacionadas con frecuencias inadecuadas y uso de lubricantes no estandarizados, incrementando la fricción y el deterioro de componentes críticos.
- **Fallas eléctricas en motores:** incluyendo desbalance de fases, variaciones de voltaje y bajo factor de potencia, que elevan el consumo energético sin aportar capacidad hidráulica efectiva.
- **Obstrucciones y pérdidas hidráulicas:** causadas por sedimentos, incrustaciones o cambios en las propiedades del fluido, aumentando la resistencia del sistema.
- **Cavitación:** generada por condiciones de presión inadecuadas en la succión, provocando daños en los componentes internos y pérdida de eficiencia.
- **Fugas en sistemas de sellado:** que reducen la eficiencia volumétrica y generan pérdidas de fluido y energía.
- **Vibraciones excesivas:** asociadas a desbalance, desalineación o fallas en rodamientos, afectando la estabilidad operativa.
- **Deficiencias en mantenimiento y monitoreo:** ausencia de estrategias predictivas basadas en condición que impide la detección temprana de anomalías.
- **Limitaciones en sistemas de control (SCADA):** errores o falta de confiabilidad en la medición de variables críticas, afectando la toma de decisiones operativas.

Estos modos de falla fueron identificados de manera consistente en las entrevistas y validados mediante la observación directa de las condiciones operativas del sistema.

#### ***4.20.2 Impacto de las fallas en la eficiencia energética y la disponibilidad***

A través de un enfoque integrado de mantenimiento basado en condición (CBM) y mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), se realiza un análisis exhaustivo para identificar los modos de falla críticos que impactan directamente la eficiencia energética y la disponibilidad de las bombas. A continuación, se relaciona los principales modos de falla que impactan la eficiencia energética y la disponibilidad:

- **Desbalance hidráulico y mecánico:**

**Causa:** La ineficiencia en el balance hidráulico de las bombas, debido a un mal alineamiento de los componentes o a un desgaste en los impulsores y las bombas, genera pérdidas de rendimiento y aumento en la energía requerida para mantener la operación.

**Impacto:** Aumenta el consumo energético, ya que la bomba debe trabajar en condiciones no óptimas, además de afectar la confiabilidad del sistema, reduciendo la disponibilidad operativa debido a fallas mecánicas recurrentes.

- **Desgaste de componentes clave (impulsores, sellos, rodamientos):**

**Causa:** El desgaste natural de los componentes internos de las bombas, como los impulsores, sellos y rodamientos, puede generar fugas o pérdidas de presión, lo que disminuye la eficiencia operativa.

**Impacto:** La bomba opera con una menor eficiencia hidráulica, lo que incrementa la necesidad de energía para mantener el caudal deseado. Este desgaste también incrementa el riesgo de paradas no programadas, lo que afecta la disponibilidad operativa.

- **Cavitación:**

**Causa:** La cavitación ocurre cuando la presión dentro de la bomba disminuye por debajo de la presión de vapor del líquido, formando burbujas de vapor que colapsan violentamente, dañando las superficies internas de la bomba.

**Impacto:** Este fenómeno no solo reduce la eficiencia energética, sino que también causa daños a largo plazo a los componentes de la bomba, lo que puede llevar a fallas mecánicas graves y, en consecuencia, a una reducción en la disponibilidad de la bomba.

- **Fugas en el sistema de sellado:**

**Causa:** Las fugas en los sellos mecánicos, como los que conectan el eje del motor con la bomba, pueden llevar a pérdidas de fluido, lo que reduce la eficiencia hidráulica y aumenta el consumo energético.

**Impacto:** Las fugas no solo incrementan los costos operativos, sino que también pueden ocasionar paradas no planificadas para reparar o reemplazar los sellos, lo que afecta la disponibilidad de las bombas.

- **Vibraciones excesivas:**

**Causa:** Las vibraciones pueden ser generadas por un desbalance en los impulsores, alineación incorrecta o fallas en los rodamientos. Las vibraciones excesivas también pueden ser causadas por la cavitación o desajustes en el sistema hidráulico.

**Impacto:** Las vibraciones aumentan el desgaste de los componentes de la bomba, reduciendo su vida útil y eficiencia. Además, las vibraciones excesivas pueden provocar paradas imprevistas por fallos mecánicos, lo que afecta negativamente la disponibilidad operativa.

- **Condiciones de operación fuera del Punto de Mejor Eficiencia (BEP):**

**Causa:** Las bombas que operan fuera del BEP, ya sea a caudales demasiado bajos o altos, experimentan un funcionamiento ineficiente, lo que aumenta las pérdidas energéticas y el desgaste de los componentes.

**Impacto:** El funcionamiento fuera del BEP genera un mayor consumo de energía y puede causar daños a largo plazo en las bombas, lo que aumenta el riesgo de fallas operativas y reduce la disponibilidad del sistema.

- **Falta de mantenimiento preventivo y predictivo adecuado:**

**Causa:** La ausencia de un plan de mantenimiento adecuado basado en el monitoreo de variables clave (presión, caudal, consumo energético) impide la detección temprana de anomalías y fallas.

**Impacto:** La falta de mantenimiento adecuado puede permitir que las bombas operen en condiciones subóptimas durante períodos prolongados, lo que no solo incrementa los costos energéticos, sino que también aumenta la probabilidad de fallas inesperadas, reduciendo la disponibilidad y fiabilidad del sistema.

- **Problemas en el sistema de control y automatización (SCADA):**

**Causa:** Las fallas en el sistema de control y automatización, como el SCADA, pueden generar errores en la medición del caudal, presión o consumo energético, lo que afecta la capacidad de operar las bombas de manera eficiente.

**Impacto:** Las mediciones inexactas impiden una correcta toma de decisiones operativas, llevando a operaciones ineficientes y a la posibilidad de intervenciones no necesarias que afectan la disponibilidad del sistema de bombeo.

La identificación de estos modos de falla es esencial para desarrollar estrategias de mantenimiento que minimicen el impacto de estas fallas en la eficiencia energética y la disponibilidad de las bombas. La implementación de un mantenimiento basado en condición, respaldado por un monitoreo continuo de indicadores clave de desempeño energético y operativo, permitirá optimizar el funcionamiento de las bombas, reduciendo costos operativos y mejorando la fiabilidad del sistema de bombeo.

#### ***4.20.3 Implicaciones para la gestión del mantenimiento y la eficiencia energética***

La identificación y caracterización de estos modos de falla constituye la base para la implementación de estrategias avanzadas de mantenimiento. En particular, la integración de indicadores de desempeño energético (EnPIs) con variables de condición (vibración, temperatura, consumo energético específico, eficiencia estimada) permite detectar desviaciones operativas de forma temprana y anticipar fallas antes de su manifestación crítica.

Este enfoque facilita la transición hacia un modelo de mantenimiento predictivo, en el cual las intervenciones se programan en función del estado real de los equipos, optimizando el uso de recursos, reduciendo el consumo energético y mejorando la disponibilidad del sistema.

En consecuencia, los resultados de esta fase evidencian la necesidad de articular la gestión de activos y la gestión energética, con el fin de garantizar una operación más eficiente, confiable y sostenible del sistema de bombeo.

#### ***4.20.4 Resultados del análisis de rutinas de inspección y gestión documental***

La aplicación de la guía de observación permitió identificar que las rutinas de inspección se concentran en variables tradicionales como vibración, temperatura y presión, mientras que los

indicadores energéticos no se monitorean de forma sistemática ni se integran al proceso de toma de decisiones de mantenimiento.

Asimismo, el análisis documental evidenció que los procedimientos internos de Ecopetrol contemplan lineamientos generales sobre confiabilidad y mantenimiento, pero presentan limitada articulación entre la gestión de activos y la gestión energética, lo que dificulta la identificación temprana de pérdidas de eficiencia asociadas a fallas incipientes.

#### ***4.20.5 Síntesis de resultados de la Fase 2***

En conjunto, los resultados de esta fase confirman que las fallas críticas identificadas no solo afectan la disponibilidad de las bombas, sino que generan impactos significativos en la eficiencia energética del sistema. La falta de integración entre las prácticas de mantenimiento y los lineamientos de gestión energética limita la capacidad de la organización para anticipar fallas y optimizar el desempeño energético de los activos. Estos hallazgos constituyen la base para la formulación de estrategias de mejora orientadas a fortalecer la gestión integrada de activos y energía en fases posteriores del proyecto.

**Tabla 11.**

*Modos de falla críticos identificados en bombas y su impacto energético*

| <b>Modo de falla crítico</b>   | <b>Descripción técnica</b>                                                 | <b>Impacto en eficiencia energética</b>                      | <b>Impacto en disponibilidad</b>  |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Desalineación mecánica</b>  | Desajuste entre eje del motor y la bomba por montaje inadecuado o desgaste | Incremento del consumo energético por fricción y vibraciones | Aumento de paradas correctivas    |
| <b>Operación fuera del BEP</b> | Funcionamiento por debajo o por encima del punto de máxima eficiencia      | Sobrecarga del motor y pérdida de eficiencia hidráulica      | Reducción de vida útil del equipo |

| <b>Modo de falla crítico</b>     | <b>Descripción técnica</b>                            | <b>Impacto en eficiencia energética</b>         | <b>Impacto en disponibilidad</b> |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Lubricación deficiente</b>    | Frecuencia inadecuada o lubricante no estandarizado   | Mayor resistencia mecánica y consumo de energía | Fallas prematuras en rodamientos |
| <b>Fallas eléctricas</b>         | Desequilibrio de fases y variaciones de voltaje       | Incremento de pérdidas eléctricas               | Paradas no programadas           |
| <b>Obstrucciones hidráulicas</b> | Sedimentos e incrustaciones en tuberías y componentes | Aumento de la potencia requerida                | Disminución del caudal efectivo  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

Como se observa en la **Tabla nro. 11**, los modos de falla críticos identificados presentan una relación directa entre las condiciones mecánicas, eléctricas y operativas de las bombas y su desempeño energético. La desalineación mecánica y la lubricación deficiente incrementan la fricción interna del sistema, lo que exige mayores requerimientos de potencia para mantener el régimen de operación. Asimismo, la operación fuera del punto de máxima eficiencia (BEP) constituye uno de los factores con mayor impacto energético, al generar sobrecargas hidráulicas y mecánicas que reducen la eficiencia global del conjunto bomba–motor. De igual forma, las fallas eléctricas y las obstrucciones hidráulicas reflejadas en la tabla contribuyen a pérdidas energéticas adicionales y a una disminución de la disponibilidad operativa, evidenciando la interdependencia entre confiabilidad y eficiencia energética.

**Tabla 12.**

*Resultados de entrevistas semiestructuradas – Categorización temática*

| <b>Categoría</b>                  | <b>Subcategoría</b> | <b>Evidencia recurrente</b>                        |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Prácticas de mantenimiento</b> | Enfoque correctivo  | Predomina la corrección posterior a la falla       |
| <b>Gestión energética</b>         | Bajo monitoreo      | No se utilizan indicadores energéticos específicos |

| <b>Categoría</b>               | <b>Subcategoría</b>         | <b>Evidencia recurrente</b>                     |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Confiabilidad operativa</b> | Prioridad en disponibilidad | Se privilegia mantener operación continua       |
| <b>Capacitación técnica</b>    | Conocimiento empírico       | Escasa formación en eficiencia energética       |
| <b>Gestión documental</b>      | Procedimientos generales    | Falta integración entre energía y mantenimiento |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

De acuerdo con los resultados consolidados en la **tabla N.º 12**, las entrevistas semiestructuradas evidencian un predominio de prácticas de mantenimiento con enfoque correctivo, orientadas principalmente a la restitución inmediata de la operación del equipo. Este esquema reactivo prioriza la continuidad operativa en el corto plazo, pero limita la capacidad del sistema para identificar y gestionar de manera anticipada las pérdidas de eficiencia energética asociadas a fallas incipientes.

En términos técnicos, este enfoque implica que las intervenciones se ejecutan una vez que la falla ha alcanzado un nivel funcionalmente evidente, momento en el cual ya se han generado desviaciones significativas en variables clave como consumo energético específico, eficiencia hidráulica y condiciones mecánicas del equipo. Como resultado, no se aprovecha el potencial de detección temprana que ofrecen parámetros operativos sensibles a la degradación progresiva, tales como incrementos en la potencia absorbida, variaciones en vibración o desviaciones en la relación caudal–presión.

Tal como se aprecia en la categorización temática, la gestión energética presenta un bajo nivel de madurez organizacional, evidenciado en la ausencia de indicadores de desempeño energético (EnPIs) formalmente definidos y en la falta de integración entre variables energéticas y de mantenimiento. Esta condición impide establecer líneas base energéticas, realizar análisis de

tendencia y definir umbrales operativos que permitan una gestión proactiva del desempeño del sistema.

Asimismo, se identificó que la capacitación técnica del personal está predominantemente basada en conocimiento empírico y experiencia operativa, con limitada incorporación de herramientas analíticas y criterios normativos orientados a la eficiencia energética. Esta brecha técnica reduce la capacidad de interpretar indicadores avanzados y de implementar estrategias de mantenimiento basado en condición o mantenimiento predictivo.

Adicionalmente, la gestión documental fragmentada descrita en la tabla dificulta la trazabilidad entre eventos de falla, acciones de mantenimiento y comportamiento energético del sistema. La ausencia de integración entre bases de datos operativas, históricos de mantenimiento y registros energéticos restringe la posibilidad de realizar análisis causa-raíz robustos, así como de correlacionar el impacto de las intervenciones sobre la eficiencia del sistema.

En conjunto, estas limitaciones configuran un entorno operativo con baja capacidad de anticipación y optimización, lo que se traduce en mayores costos energéticos, incremento en la frecuencia de fallas y una menor confiabilidad del sistema. Este diagnóstico refuerza la necesidad de evolucionar hacia un modelo de gestión integrado, basado en indicadores, monitoreo continuo y toma de decisiones sustentada en datos, alineado con principios de mantenimiento basado en condición y gestión energética eficiente.

### **Tabla 13.**

*Resultados de la guía de observación en campo*

| Aspecto observado | Situación encontrada | Implicación energética |
|-------------------|----------------------|------------------------|
|-------------------|----------------------|------------------------|

|                                       |                                      |                                               |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Rutinas de inspección</b>          | Enfocadas en vibración y temperatura | No se detectan pérdidas energéticas tempranas |
| <b>Control de parámetros</b>          | Registro manual no sistemático       | Información limitada para análisis energético |
| <b>Seguimiento post-mantenimiento</b> | No se evalúa desempeño energético    | No se valida mejora en eficiencia             |
| <b>Gestión documental</b>             | Procedimientos dispersos             | Dificulta trazabilidad energética             |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

Según lo evidenciado en la **Tabla 13**, la observación directa de las rutinas de inspección muestra que el monitoreo operativo se concentra en variables tradicionales de confiabilidad, como vibración y temperatura, sin incorporar parámetros energéticos relevantes. Esta limitación impide detectar de manera temprana desviaciones en el desempeño energético de las bombas. Asimismo, la tabla pone en evidencia la ausencia de un seguimiento post-mantenimiento orientado a evaluar mejoras en eficiencia energética, lo que reduce la efectividad de las intervenciones realizadas y restringe la implementación de un enfoque preventivo basado en el desempeño energético del sistema.

**Tabla 14.**

*Triangulación de resultados (entrevistas – observación – documentos)*

| <b>Fuente</b>              | <b>Hallazgo principal</b>               | <b>Coincidencia</b> |
|----------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| <b>Entrevistas</b>         | Falta análisis energético de fallas     | Alta                |
| <b>Observación</b>         | Ausencia de indicadores energéticos     | Alta                |
| <b>Documentos</b>          | Lineamientos generales no integrados    | Media               |
| <b>Resultado integrado</b> | Gestión reactiva sin enfoque energético | Alta                |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

La **Tabla 14** permite identificar una alta convergencia entre los hallazgos obtenidos a través de entrevistas, observación en campo y análisis documental. La coincidencia de resultados confirma que la gestión de las bombas se caracteriza por un enfoque reactivo, con una limitada consideración del impacto energético de las fallas. Esta triangulación refuerza la validez de los resultados y evidencia que las debilidades identificadas no corresponden a percepciones individuales, sino a un patrón estructural en las prácticas de mantenimiento y gestión energética de la organización.

**Tabla 15.**

*Brechas frente a ISO 50001 (Gestión de la Energía)*

| <b>Requisito ISO 50001</b>       | <b>Práctica actual</b>   | <b>Brecha identificada</b>             |
|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|
| <b>Indicadores energéticos</b>   | No definidos para bombas | Falta medición específica              |
| <b>Seguimiento del desempeño</b> | No sistemático           | No se evalúa mejora post-mantenimiento |
| <b>Mejora continua</b>           | Enfoque reactivo         | Ausencia de análisis energético        |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

Tal como se presenta en la **Tabla 15**, las prácticas actuales presentan brechas significativas frente a los requisitos de la norma ISO 50001. La ausencia de indicadores energéticos específicos para bombas dificulta el establecimiento de líneas base y la evaluación del desempeño energético. Asimismo, la falta de seguimiento sistemático posterior a las actividades de mantenimiento impide la aplicación efectiva del ciclo de mejora continua (PHVA), limitando la capacidad de la organización para identificar, controlar y reducir las pérdidas energéticas asociadas a fallas operativas.

**Tabla 16.***Brechas frente a ISO 55001 (Gestión de Activos)*

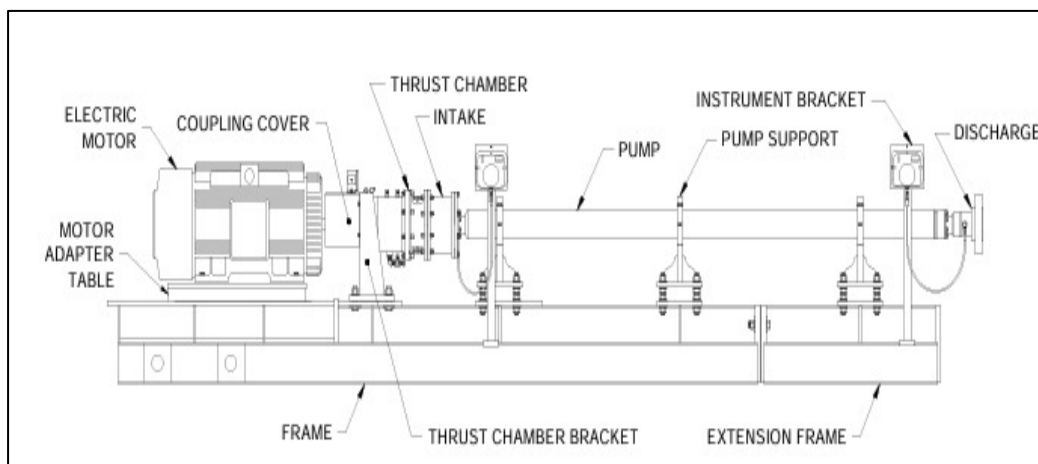
| <b>Requisito ISO 55001</b>                | <b>Práctica actual</b> | <b>Brecha identificada</b>                |
|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Gestión del ciclo de vida</b>          | Enfoque operativo      | No integra eficiencia energética          |
| <b>Toma de decisiones basada en datos</b> | Información parcial    | No incluye variables energéticas          |
| <b>Integración de sistemas</b>            | Mantenimiento aislado  | Falta articulación con gestión energética |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 16, la gestión de activos se encuentra orientada principalmente a asegurar la disponibilidad operativa, sin integrar de manera explícita la eficiencia energética como criterio transversal a lo largo del ciclo de vida del activo. La tabla evidencia que la toma de decisiones se apoya en información técnica parcial, sin considerar variables energéticas que permitan optimizar el desempeño global y los costos asociados. Esta falta de integración entre la gestión de activos y la gestión energética contraviene los principios establecidos por la norma ISO 55001 y limita la optimización sostenible de las bombas

#### **4.21 Resultados de la Fase 3**

Es de suma importancia contemplar los componentes del sistema para identificar las partes principales de los equipos de bombeo que serán objeto de intervención en estos planes de mantenimiento.

**Figura 13.***Componentes del sistema de bombeo***Fuente:** Imagen tomada de Dossier instalación de equipos (2021)**Figura 14.***Listado de partes y accesorios del sistema de bombeo*

| Recommended Part List TOSHIBA 500HP 3F4500K140670         |                                           |                                                                                      |     |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Item                                                      | Description                               | Qty                                                                                  |     |
| 1                                                         | BEARING OS (OUT SIDE) NU313C3 W/INS       | 1                                                                                    |     |
| 2                                                         | BEARING LS (LOAD SIDE) 6313C3 INSULATED   | 1                                                                                    |     |
| Recommended Part List GENERAL ELECTRIC 500HP 5KS511XAA138 |                                           |                                                                                      |     |
| Item                                                      | Description                               | Qty                                                                                  |     |
| 1                                                         | BEARING 6315ZC3 VL0241                    | 2                                                                                    |     |
| Recommended Spare Parts List TM19000-24                   |                                           |  |     |
| Item                                                      | Description                               | Part N°                                                                              | Qty |
| 1                                                         | SEAL, MECH SPS 1.5" JC 1648 SGL SC/CA VIT | 179323                                                                               | 2   |
| 2                                                         | OIL, ISO 68 SHELL OMALA RL 5GA            | 159957                                                                               | 3   |
| 3                                                         | GREASE, MOTOR ALVANIA RL2 (LITHIUM)       | 159417                                                                               | 18  |
| 4                                                         | GREASE, FALK LTG 140Z GRID/GEAR CPLG      | 128906                                                                               | 18  |
| 5                                                         | KIT, CPLG FLEX 1080T20 2 3/8x 2 3/8       | 189655                                                                               | 6   |
| 6                                                         | COUPLING, PUMP/SEAL TR7 INC 1.19 X 1.5    | 159644                                                                               | 4   |
| 7                                                         | SHAFT, STUB SPS 14.25.1.5 SPLN JC8B1 N50  | 179848                                                                               | 6   |
| 8                                                         | CHAMBER, THRUST SPS ASSY HDTC 1/2" STD    | 199067                                                                               | 1   |
| 9                                                         | PUMP, SPS TM9.5" 19000A 24STG AR 3SS EHS  | 177313                                                                               | 1   |
| 10                                                        | O'RING, HSN 75 DURO #258                  | 702258                                                                               | 12  |
| 11                                                        | O'RING, HSN 75 DURO #241 (FS)             | 702241                                                                               | 12  |
| 12                                                        | O'RING, HSN 75 DURO #237 (FS)             | 702237                                                                               | 12  |
| 13                                                        | SHIM, KIT ACCUSHIM SET C 4X4 (FULL)       | 128288                                                                               | 7   |
| 14                                                        | SCREW, ADJ SFT 1.0.1.18 3/8-24UMF-2A 304S | 123267                                                                               | 6   |
| 15                                                        | SHIM, .830 X 3/8 X .030 SST               | 2646450006                                                                           | 20  |
| 16                                                        | KIT, SPS SEAL FLUSH PLAN 31 3SS           | 165241                                                                               | 1   |

**Fuente:** Listado de partes y accesorios del sistema de bombeo. Woo Group (2021)

Como resultado del desarrollo del proyecto se establece un plan de mantenimiento basado en condición con una periodicidad de tres meses contemplando un seguimiento anual para evaluar condiciones de intervención en tiempos definidos de acuerdo con los resultados obtenidos de los diferentes análisis realizados en el periodo estipulado. Estos análisis definen un tiempo promedio para intervenir los equipos de manera preventiva los cuales se les relacionará sus ítems mantenibles.

**Tabla 17.**

*Planes de mantenimiento CBM*

| <b>Denominación de la ubicación técnica</b>    | <b>Equipo</b> | <b>Denominación de objeto técnico</b> | <b>Plan mant. preventivo</b> | <b>Descripción posición de mantenimiento</b> | <b>Pto.tbjo. responsable</b> | <b>Frecuencia de intervención</b> |
|------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A</b> | 1132449<br>6  | Motor Eléctrico P-105A                | 1253130                      | Análisis Condición Rotativo Motor Electr     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A</b> | 1132449<br>6  | Motor Eléctrico P-105A                |                              | Análisis Condición Termografía               | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A</b> | 1132447<br>4  | Camara de empuje P-105A               | 1253130                      | Análisis Condición Rotativo Camara Empuj     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A</b> | 1132447<br>4  | Camara de empuje P-105A               | 1253131                      | Análisis Condición Lubricante Camara Emp     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A</b> | 1132447<br>2  | Bomba Centrífuga P-105A               | 1253130                      | Análisis Condición Rotativo Bomba Centri     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |

| <b>Denominación de la ubicación técnica</b>    | <b>Equipo</b> | <b>Denominación de objeto técnico</b> | <b>Plan mant. preventivo</b> | <b>Descripción posición de mantenimiento</b>      | <b>Pto.tbjo. responsable</b> | <b>Frecuencia de intervención</b> |
|------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A</b> | 1132447<br>3  | Unidad de Lubricación P-105A          |                              | Análisis<br>Condición<br>Rotativo Motor<br>Electr | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A</b> | 1132447<br>3  | Unidad de Lubricación P-105A          |                              | Análisis<br>Condición<br>Termografía              | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B</b> | 1132452<br>1  | Motor Eléctrico P-105B                | 1253132                      | Análisis<br>Condición<br>Rotativo Motor<br>Electr | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B</b> | 1132452<br>1  | Motor Eléctrico P-105B                |                              | Análisis<br>Condición<br>Termografía              | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B</b> | 1132449<br>9  | Camara de empuje P-105B               | 1253132                      | Análisis<br>Condición<br>Rotativo Camara<br>Empuj | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B</b> | 1132449<br>9  | Camara de empuje P-105B               | 1253134                      | Análisis<br>Condición<br>Lubricante<br>Camara Emp | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B</b> | 1132449<br>7  | Bomba Centrífuga P-105B               | 1253132                      | Análisis<br>Condición<br>Rotativo Bomba           | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B</b> | 1132449<br>8  | Unidad de Lubricación P-105B          |                              | Análisis<br>Condición<br>Rotativo Motor<br>Electr | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B</b> | 1132449<br>8  | Unidad de Lubricación P-105B          |                              | Análisis<br>Condición<br>Termografía              | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |

| <b>Denominación de la ubicación técnica</b>    | <b>Equipo</b> | <b>Denominación de objeto técnico</b> | <b>Plan mant. preventivo</b> | <b>Descripción posición de mantenimiento</b> | <b>Pto.tbjo. responsable</b> | <b>Frecuencia de intervención</b> |
|------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C</b> | 1132454<br>6  | Motor Eléctrico P-105C                | 1253135                      | Análisis Condición Rotativo Motor Electr     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C</b> | 1132454<br>6  | Motor Eléctrico P-105C                |                              | Análisis Condición Termografía               | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C</b> | 1132452<br>4  | Camara de empuje P-105C               | 1253135                      | Análisis Condición Rotativo Camara Empuj     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C</b> | 1132452<br>4  | Camara de empuje P-105C               | 1253136                      | Análisis Condición Lubricante Camara Emp     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C</b> | 1132452<br>2  | Bomba Centrífuga P-105C               | 1253135                      | Análisis Condición Rotativo Bomba Centri     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C</b> | 1132452<br>3  | Unidad de Lubricación P-105C          |                              | Análisis Condición Rotativo Motor Electr     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C</b> | 1132452<br>3  | Unidad de Lubricación P-105C          |                              | Análisis Condición Termografía               | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D</b> | 1132457<br>0  | Motor Eléctrico P-105D                | 1253138                      | Análisis Condición Rotativo Motor Electr     | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |
| <b>Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D</b> | 1132457<br>0  | Motor Eléctrico P-105D                |                              | Análisis Condición Termografía               | DMCBE<br>NAR                 | Trimestral                        |

| Denominación de la ubicación técnica    | Equipo       | Denominación de objeto técnico | Plan mant. preventivo | Descripción posición de mantenimiento    | Pto.tbjo. responsable | Frecuencia de intervención |
|-----------------------------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D | 1132454<br>9 | Camara de empuje P-105D        | 1253138               | Análisis Condición Rotativo Camara Empuj | DMCBE<br>NAR          | Trimestral                 |
| Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D | 1132454<br>9 | Camara de empuje P-105D        | 1253139               | Análisis Condición Lubricante Camara Emp | DMCBE<br>NAR          | Trimestral                 |
| Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D | 1132454<br>7 | Bomba Centrífuga P-105D        | 1253138               | Análisis Condición Rotativo Bomba Centri | DMCBE<br>NAR          | Trimestral                 |
| Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D | 1132454<br>8 | Unidad de Lubricación P-105D   |                       | Análisis Condición Rotativo Motor Electr | DMCBE<br>NAR          | Trimestral                 |
| Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D | 1132454<br>8 | Unidad de Lubricación P-105D   |                       | Análisis Condición Termografía           | DMCBE<br>NAR          | Trimestral                 |

**Fuente:** Ecopetrol S.A. (s.f.), *Planes de mantenimiento basado en condición (CBM) – Sistema SAP PM.*

A continuación, se presentan las estrategias detalladas para lograr una integración efectiva de los aspectos operativos y energéticos en el mantenimiento de las bombas. Estas acciones se fundamentan en los análisis previos sobre modos de falla críticos, eficiencia energética y gestión de indicadores, y buscan establecer un marco operativo que permita optimizar simultáneamente la disponibilidad del sistema y el consumo de energía. Cada estrategia propuesta se orienta a traducir los hallazgos del diagnóstico en intervenciones concretas, combinando monitoreo en tiempo real, instrumentación avanzada, análisis de datos y

prácticas de mantenimiento basadas en condición, con el fin de anticipar fallas, corregir desviaciones operativas y asegurar que las bombas operen dentro de su Punto de Mejor Eficiencia (BEP). Esta integración sistemática constituye la base para implementar un mantenimiento proactivo, respaldado por indicadores energéticos (EnPIs) y métricas operativas, facilitando la toma de decisiones informada y alineada con las normas ISO 50001 e ISO 55001.

#### ***4.21.1 Implementación de Monitoreo Continuo de Indicadores Energéticos (EnPIs).***

**Estrategia:** Establecer un sistema de monitoreo en tiempo real que registre y analice indicadores energéticos clave, tales como el consumo de energía específico, caudal, presión y potencia absorbida por cada bomba. Este sistema permitirá realizar un seguimiento exhaustivo del comportamiento energético de las bombas en condiciones operativas reales.

**Objetivo:** Detectar variaciones en los parámetros de eficiencia energética antes de que se conviertan en problemas mayores. La monitorización continua de estos indicadores proporcionará una visión clara del desempeño energético y permitirá ajustes operativos para mantener las bombas dentro de su Punto de Mejor Eficiencia (BEP).

#### ***4.21.2 Instalación de Sensores Avanzados para la Medición de Variables Operativas.***

**Estrategia:** Instalar sensores adicionales en los equipos clave para medir variables operativas como vibración, temperatura, presión y caudal. Estos sensores proporcionarán datos precisos sobre el estado real de las bombas y facilitarán la detección temprana de condiciones que puedan afectar la eficiencia energética, como desajustes mecánicos o hidráulicos.

**Objetivo:** Obtener información más precisa sobre el comportamiento de las bombas, lo que permitirá implementar un mantenimiento predictivo y reducir los tiempos de inactividad debido a fallas no detectadas a tiempo.

#### ***4.21.3 Análisis de Datos para la Identificación de Modos de Falla Críticos:***

**Estrategia:** Utilizar herramientas de análisis de datos, como el análisis de tendencias, el análisis estadístico y modelos predictivos, para identificar patrones en los EnPIs y en otros datos operativos que indiquen posibles fallas o pérdidas de eficiencia en el sistema de bombeo.

**Objetivo:** Prevenir fallas antes de que ocurran mediante la identificación temprana de anomalías en el rendimiento de las bombas, lo que permitirá realizar intervenciones correctivas antes de que se conviertan en problemas mayores que afecten tanto la eficiencia energética como la disponibilidad operativa.

#### ***4.21.4 Mantenimiento Predictivo Basado en Condición.***

**Estrategia:** Desarrollar un sistema de mantenimiento predictivo que utilice los datos operativos recogidos por los sensores y los EnPIs para determinar el momento más adecuado para intervenir en el equipo. Las intervenciones se realizarán solo cuando los datos indiquen que los componentes clave (como impulsores, rodamientos y sellos) estén cerca de un umbral de fallo.

**Objetivo:** Minimizar el mantenimiento preventivo innecesario, optimizando tanto los costos de operación como el tiempo de inactividad de las bombas, asegurando que el sistema funcione con la mayor eficiencia energética posible.

#### ***4.21.5 Optimización de las Condiciones Operativas (Ajustes de Frecuencia y Presión).***

**Estrategia:** Ajustar las condiciones de operación de las bombas, tales como la frecuencia de operación y la presión de descarga, en función de los datos obtenidos de los EnPIs y el análisis del comportamiento hidráulico de las bombas. Estos ajustes deben alinearse con el BEP de cada bomba para maximizar la eficiencia energética.

**Objetivo:** Operar las bombas dentro de sus rangos óptimos para reducir las pérdidas energéticas, mejorar la eficiencia volumétrica y minimizar el desgaste de los componentes, lo que también contribuye a prolongar la vida útil de los equipos.

#### ***4.21.6 Capacitación Continua del Personal de Mantenimiento.***

**Estrategia:** Desarrollar programas de formación continua para el personal encargado del mantenimiento, centrados en la interpretación y uso de los EnPIs y el análisis de las variables operativas. Esto asegurará que el personal esté capacitado para identificar rápidamente problemas energéticos y operativos en el sistema de bombeo.

**Objetivo:** Incrementar la capacidad técnica del personal para realizar intervenciones más eficaces basadas en datos reales, mejorando la eficiencia operativa y energética del sistema de bombeo.

#### ***4.21.7 Integración del Sistema de Gestión Energética con el Sistema de Mantenimiento.***

**Estrategia:** Integrar el sistema de gestión de mantenimiento con un sistema de gestión energética, como el que se establece en la ISO 50001. Esta integración permitirá tomar decisiones operativas y de mantenimiento basadas en el análisis de indicadores energéticos y operativos, alineando ambos sistemas para una mayor eficiencia global.

**Objetivo:** Lograr una gestión más coherente y eficiente de los recursos, integrando tanto el mantenimiento predictivo como los objetivos de eficiencia energética, lo que permite optimizar el desempeño de las bombas y reducir costos operativos.

#### ***4.21.8 Implementación de Análisis de Causas Raíz para Fallas Energéticas.***

**Estrategia:** Implementar un sistema de análisis de causas raíz para todas las fallas detectadas en los sistemas de bombeo, especialmente aquellas que impactan la eficiencia energética. Este análisis debe identificar las causas subyacentes de las pérdidas de eficiencia y abordar cada una de ellas de manera sistemática.

**Objetivo:** Resolver los problemas de eficiencia de manera sostenible, evitando que se repitan y asegurando que las bombas operen dentro de sus límites de eficiencia energética más altos.

#### ***4.21.9 Realización de Pruebas Periódicas de Eficiencia Energética.***

**Estrategia:** Establecer un programa de pruebas periódicas de eficiencia energética para evaluar el desempeño real de las bombas bajo diversas condiciones operativas. Estas pruebas deben realizarse con equipos de medición precisos, como caudalímetros ultrasónicos y medidores de potencia.

**Objetivo:** Validar que las bombas operan dentro de los parámetros de diseño y realizar ajustes operativos cuando se identifiquen desviaciones, asegurando que el consumo energético se mantenga dentro de los rangos óptimos.

Las estrategias propuestas no solo optimizan el consumo de energía, sino que también garantizan la disponibilidad y fiabilidad operativa del sistema de bombas. A través de la implementación de un sistema de monitoreo avanzado, el análisis de datos, la formación del personal y la integración de las gestiones de mantenimiento y energética, se logrará un enfoque de mantenimiento proactivo y basado en datos que maximice el rendimiento y minimice los costos operativos. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad de las operaciones, sino que también mejora la competitividad y la rentabilidad del sistema de bombeo en el Campo Jazmín.

Por otra parte, es importante conocer el listado de partes requeridos según fabricante para establecer un stock mínimo de componentes que se requieran para realizar un mantenimiento preventivo programado en busca de optimizar tiempos de intervención.

#### **4.22 Registro Visual y Monitoreo SCADA del Sistema de Inyección de Agua**

**Figura 15.**

*Registro fotográfico del sistema y pantalla SCADA.*

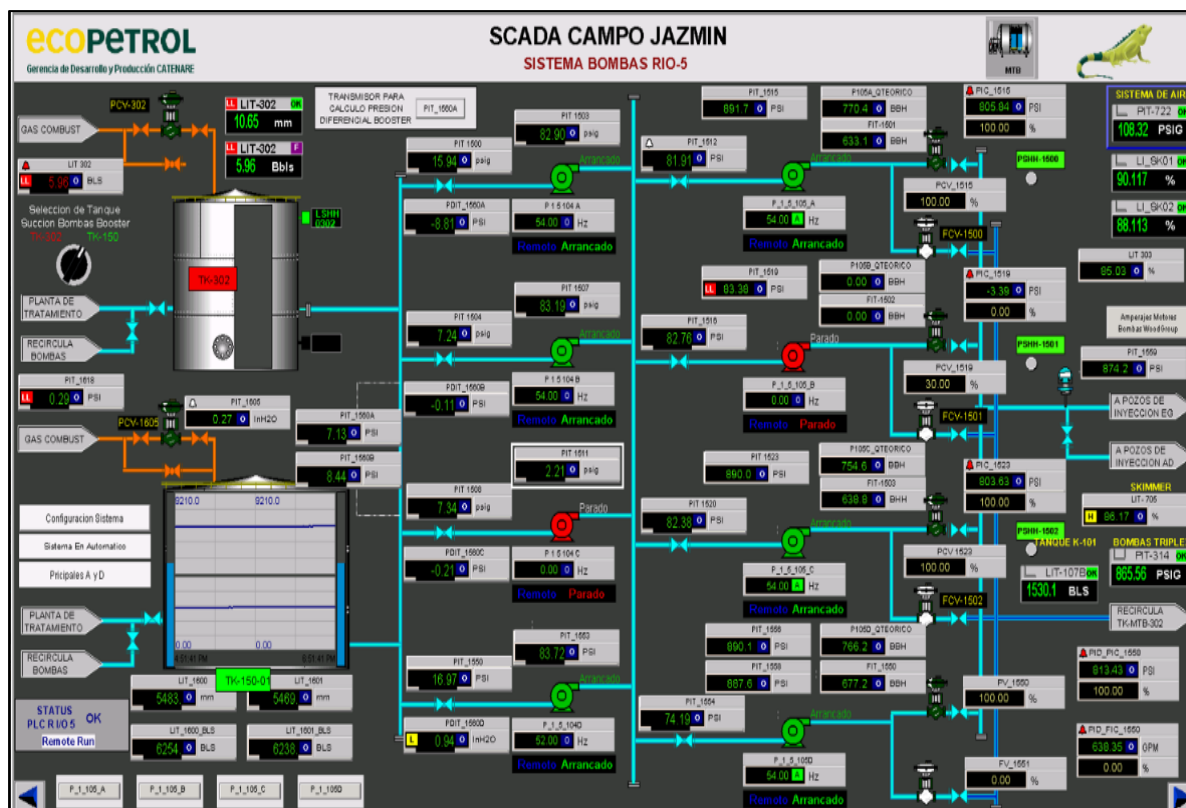


**Fuente:** Autores

Para complementar el análisis operativo y energético del sistema de inyección de agua, se incluye un registro visual que permite documentar el estado físico de los equipos y la interface de control. La figura 15 presenta una vista general del sistema de bombeo de inyección, evidenciando la disposición de los componentes principales, mientras que la pantalla SCADA proporciona información en tiempo real sobre parámetros críticos de operación, como caudal, presión y potencia absorbida. Este registro fotográfico facilita la correlación entre las condiciones observadas en campo y los datos registrados, apoyando la trazabilidad de las operaciones, la verificación del cumplimiento de los procedimientos de mantenimiento y el monitoreo de los indicadores de desempeño energético (EnPIs).

**Figura 16.**

*Registro fotográfico de pantalla SCADA.*



**Fuente:** Captura de pantalla sistema SCADA ECOPETROL

El registro fotográfico del sistema de inyección de agua y las capturas del sistema SCADA proporcionan una visión integral del estado físico y operativo de las bombas. Las imágenes permiten verificar la disposición de los equipos, el acceso para mantenimiento y el estado general de componentes críticos, mientras que la información SCADA ofrece datos en tiempo real sobre caudal, presión y potencia absorbida, facilitando la identificación de desviaciones respecto al comportamiento esperado. Esta integración de evidencia visual y digital permite correlacionar anomalías físicas con variaciones operativas, apoyando la detección temprana de fallas, el análisis de eficiencia energética y la planificación de intervenciones de mantenimiento basadas en condición. En conjunto, ambos registros constituyen herramientas fundamentales para optimizar la confiabilidad del sistema, reducir pérdidas energéticas y fortalecer la gestión operativa y energética del proceso de inyección de agua.

#### **4.23 Taxonomía y caracterización técnica de las bombas de inyección**

La taxonomía y caracterización técnica de los equipos del sistema de inyección de agua son fundamentales para una gestión precisa y eficiente de los activos. Esta estructura jerárquica clasifica las bombas y sus componentes según niveles específicos, facilitando la identificación y el seguimiento detallado de cada unidad dentro del sistema operativo del Campo Jazmín. La correcta catalogación y documentación técnica permiten optimizar el mantenimiento, el control de inventarios y la trazabilidad de intervenciones.

#### **Tabla 18.**

*Taxonomía de la ubicación técnica de los equipos.*

| NIVEL 6            | NIVEL 7                             | NIVEL 8  | NIVEL 9                          | Descripción            | Clase / Und                         | obj téc / Tipo          | Fabricante    | Denominación tipo | No. pieza fabricante | Fabricante No. serie |
|--------------------|-------------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI |                                     |          |                                  | Agua Industrial        | 6041                                |                         |               |                   |                      |                      |
|                    | Und. Bombeo de Inyección de Agua P- |          |                                  |                        |                                     |                         |               |                   |                      |                      |
|                    | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A      |          |                                  |                        | 7010                                |                         |               |                   |                      |                      |
|                    |                                     | 11324472 | Bomba Centrífuga P-105A          | PUCE                   | ROT                                 | WOOD GROUP              | TM9.5" 19000A | TM9.5" 19000A     | 2MOF43474 P EAS 3SS  |                      |
|                    |                                     |          | 11324473 Unidad de Lubricación   | XRXR                   | ROT                                 | WOOD                    | SIN PLACA     |                   |                      | SIN PLACA            |
|                    |                                     |          | 11324474 Camara de empuje P-105A | PRTC                   | ROT                                 | WOOD GROUP              | HD 1/2        | HD 1/2            | 7011J73024 P         |                      |
|                    |                                     | 11324496 |                                  | Motor Eléctrico P-105A | EMIL                                | ELE                     | TOSHIBA       | 3F4500K140        |                      | 100600604            |
|                    | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B      |          |                                  |                        | Und. Bombeo de Inyección de Agua P- |                         | 7010          |                   |                      |                      |
|                    |                                     | 11324497 | Bomba Centrífuga P-105B          | PUCE                   | ROT                                 | GENERAL ELECTRIC        | SM9.0" 18000  | SM9.0" 18000      | 2M4D54335 P AR 3SS   |                      |
|                    |                                     |          | 11324498 Unidad de Lubricación   | XRXR                   | ROT                                 | WOOD                    | SIN PLACA     |                   |                      | SIN PLACA            |
|                    |                                     |          | 11324499 Camara de empuje P-105B | PRTC                   | ROT                                 | GENERAL ELECTRIC        | HD 1/2        | HD 1/2            | 7012F73419 P         |                      |
|                    |                                     | 11324521 |                                  | Motor Eléctrico P-105B | EMIL                                | ELE                     | TOSHIBA       | 3F4500K140        |                      | 100600606            |
|                    | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C      |          |                                  |                        | Inyección de Agua P-105C            |                         | 7010          |                   |                      |                      |
|                    |                                     | 11324522 | Bomba Centrífuga P-105C          | PUCE                   | ROT                                 | GENERAL ELECTRIC        | TM 19000A     | TM 19000A         | 2N2H00933 B AR 3SS   |                      |
|                    |                                     |          | 11324523 Unidad de Lubricación   | XRXR                   | ROT                                 | WOOD                    | SIN PLACA     |                   |                      | SIN PLACA            |
|                    |                                     |          | 11324524 Camara de empuje P-105C | PRTC                   | ROT                                 | GENERAL ELECTRIC        | HDY CAST      | HDY CAST          | 7013L74169 P         |                      |
|                    |                                     | 11324546 |                                  | Motor Eléctrico P-105C | EMIL                                | ELE                     | TOSHIBA       | 3F4500K140        |                      | 100600605            |
|                    | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D      |          |                                  |                        | Und. Bombeo de Inyección de Agua P- |                         | 7010          |                   |                      |                      |
|                    |                                     | 11324547 | Bomba Centrífuga P-105D          | PUCE                   | ROT                                 | WOOD GROUP              | TM9.5" 18000A | TM9.5" 18000A     | 2M3E51954 P AR 3SS   |                      |
|                    |                                     |          | 11324548 Unidad de Lubricación   | XRXR                   | ROT                                 | GENERAL ELECTRIC        | SIN PLACA     |                   |                      | SIN PLACA            |
|                    |                                     |          | 11324549 Camara de empuje P-105D | PRTC                   | ROT                                 | WOOD GROUP              | HD CAST       | HD CAST           | 7013D7377 7P         |                      |
|                    | 11324570                            |          | Motor Eléctrico P-105D           | EMIL                   | ELE                                 | GENERAL EI 5KS511XAA138 |               |                   | FGFT169J00           |                      |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

#### 4.24 Hoja de vida de los equipos

La hoja de vida de las bombas constituye un registro integral y detallado de toda la información técnica, operativa y de mantenimiento asociada a cada unidad. Este documento es una herramienta esencial para el seguimiento del desempeño, la planificación de intervenciones y la gestión eficiente del ciclo de vida del equipo. Contiene datos como especificaciones técnicas, historial de fallas, registros de mantenimiento preventivo y correctivo, condiciones de operación

y resultados de pruebas de eficiencia. Mantener una hoja de vida actualizada permite anticipar fallas, optimizar recursos y garantizar la confiabilidad y eficiencia energética de las bombas dentro del sistema de inyección de agua.

Figura 17.

Hoja de vida bomba centrífuga P-105A

HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET

NO EQUIPO:

11324472

DESCRIPCIÓN:

Bomba Centrífuga P-105A

UBICACIÓN TÉCNICA:

JAZ-MIAZ-REIN-AGUI-UBOMNY105A

DENOMINACIÓN U.T.:

Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A

TAG EQUIPO:

P-105A

CENTRO DE COSTOS:

EQUIPO NIVEL 8

No DE INVENTARIO:

9018124

VICEPRESIDENCIA:

VRC

GERENCIA:

CATENARE

ACTIVO:

Campo Jazmin

PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:

Módulo MTB Jazmin

SISTEMA:

Sistema De Reinyeccion

PRODUCTO:

Agua Industrial

TIPO DE EQUIPO:

M

CRITICIDAD ASP:

N

CENTRO PLANIF DESC

PR PUERTO BOYACÁ

ESTADO DEL EQUIPO:

OP

COD CENTRO PLANIF

1129

CLASE:

PUCE

DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:

Bomba Centrífuga

TIPO DE OBJETO:

ROT

MARCA:

WOOD GROUP

MODELO:

TM9 5" 19000A

TAMAÑO:

TM9 5" 19000A

SERIE:

2MOF43474P EHS 3SS

Wood Group ESP, Inc.

SPS PUMP

1 4 0

UIG WOOD GROUP

PART NO.

355 SPS AP

LATERAL O.

105

SER. NO.

2MOF43474P EHS 3SS

TYPE

TM9.5" 19000A

SHAFT O.D. / MAT'L

1.315

DRING MAT'L

CHRO

STAGES

1

HSG PRESS.

@ 200 F

SERIES

EB2

SERVICE

PSIG

TOSHIBA

PREMIUM EFFICIENCY

EQP. III

3Ø INDUCTION MOTOR

3E4500K140670

ENCL. TTKH

DUTY CONT.

460

MAX SAFE RPM

3570

WT

45.2

US. NUTS

LS. 681463

INSULATED

FRAME

548

SERIAL NO.

100600602

POLE

2

HOM FL EFF

95.8

MIN FL EFF

92.2

PF

89.4

CODE

F

USE POLYUREA BAL E GREASES

60

1

133052

TOSHIBA INTERNATIONAL CORPORATION

HOUSTON, TEXAS, USA

IMA

VELOCIDAD

3.570,00

RPM

TAMAÑO IMPULSOR

6,12

Pulg.

TIPO LUBRICANTE

ACEITE

SISTEMA SELLADO API

API PLAN-31

FABRICANTE

WOOD GROUP

TIPO IMPULSOR

CERRADO

POTENCIA NOMINAL CABALLOS F

385,00

HP

MODELO

TM9 5" 19000A

TIPO FLUIDO

AGUA INYECCION

NUMERO DE TORNILLOS

24,00

UN

DIAMETRO SUCCION

6,00

Pulg.

TIPO DE APOYO RADIAL

Rodamientos

NUMERO DE ETAPAS

UN

DIAMETRO DESCARGA

4,00

Pulg.

TIPO DE APOYO AXIAL

Rodamientos

NUMERO DE CILINDROS

UN

PRESION DE SALIDA

1700,00

PSI

TIPO BOMBA API

API 610 BB4

NPSH

33,36

UN

DELTA DE PRESION

TIPO APOYO

NIVEL RIESGO POR OPERACION

CONSUMO POTENCIA

TIPO ACOPLE

GRID-FALK 1070720

NIVEL RIESGO POR LEGISLACION

TIPO RODAMIENTO

TEMPERATURA DE OPERACION

150,00

°F

FLUJO CAUDAL BPP GM

526,70

G/M

PRESION DE SUCCION

60,00

PSI

PRESION DE DESCARGA

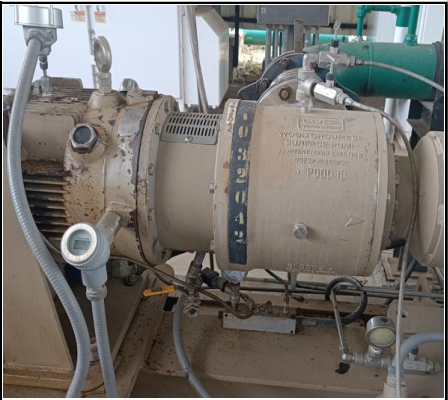
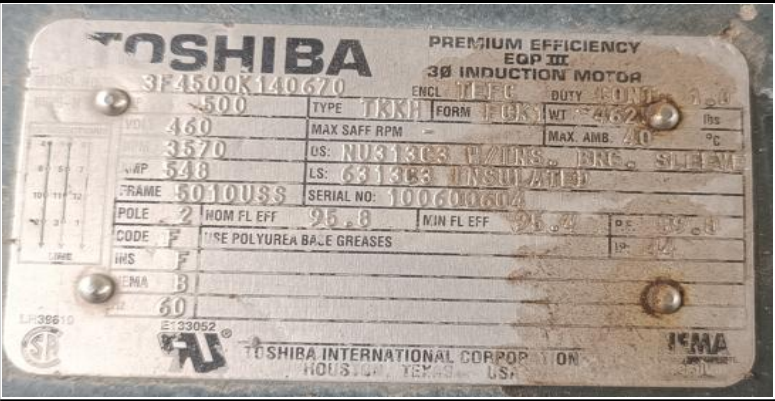
710,00

PSI

**Fuente:** Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 18.

Und. Bombeo de inyección de agua P-105A

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                 |                                         |                    |                         |       |                                                                                      |                        |           |          |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------|----------|--|
| DATOS SAP                                                                           |                                         |                    |                         |       | UBICACIÓN                                                                            |                        |           |          |  |
| No EQUIPO:                                                                          | 11324474                                | DESCRIPCIÓN:       | Camara de empuje P-105A |       | VICEPRESIDENCIA:                                                                     | VRC                    | GERENCIA: | CATENARE |  |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                  | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A          |                    |                         |       | ACTIVO:                                                                              | Campo Jazmin           |           |          |  |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                  | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A |                    |                         |       | PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:                                                               | Módulo MTB Jazmin      |           |          |  |
| TAG EQUIPO:                                                                         | P-105A                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                         |       | SISTEMA:                                                                             | Sistema De Reinyeccion |           |          |  |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                      | 11324472                                | No DE INVENTARIO:  | 9018124                 |       | PRODUCTO:                                                                            | Agua Industrial        |           |          |  |
| CLASIFICACIÓN                                                                       |                                         |                    |                         |       | DATOS DE FABRICACIÓN                                                                 |                        |           |          |  |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                     | M                                       | CRITICIDAD ASP:    | N                       |       | MARCA:                                                                               | WOOD GROUP             |           |          |  |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                  | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: | OP                      |       | MODELO:                                                                              | HD 1/2                 |           |          |  |
| COD CENTRO PLANIF                                                                   | 1129                                    | CLASE:             | PUCE                    |       | TAMAÑO:                                                                              | NO REGISTRA            |           |          |  |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                           | Cámara De Empuje (Embrague Hidráulico)  |                    | TIPO DE OBJETO:         | ROT   | SERIE:                                                                               | 7011J73024P            |           |          |  |
|   |                                         |                    |                         |       |   |                        |           |          |  |
|  |                                         |                    |                         |       |  |                        |           |          |  |
| Característica                                                                      | Valor                                   | Unidad.            | Característica          | Valor | Unidad.                                                                              | Característica         | Valor     | Unidad.  |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION                                                        |                                         |                    |                         |       |                                                                                      |                        |           |          |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION                                                          |                                         |                    |                         |       |                                                                                      |                        |           |          |  |
|                                                                                     |                                         |                    |                         |       |                                                                                      |                        |           |          |  |

Fuente: Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 19.

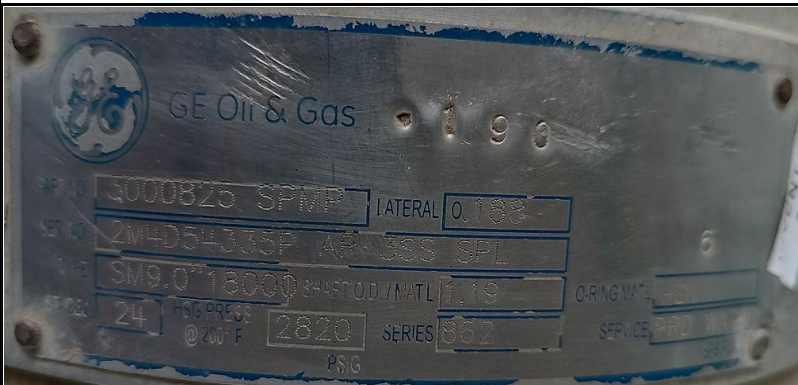
Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                |                                         |                    |                       |       |                                                                                     |                           |           |          |  |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-----------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|----------|--|
| DATOS SAP                                                                          |                                         |                    |                       |       | UBICACIÓN                                                                           |                           |           |          |  |
| No EQUIPO:                                                                         | 11324473                                | DESCRIPCIÓN:       | Unidad de Lubricación |       | VICEPRESIDENCIA:                                                                    | VRC                       | GERENCIA: | CATENARE |  |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                 | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A          |                    |                       |       | ACTIVO:                                                                             | Campo Jazmin              |           |          |  |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A |                    |                       |       | PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:                                                              | Módulo MTB Jazmin         |           |          |  |
| TAG EQUIPO:                                                                        | P-105A                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                       |       | SISTEMA:                                                                            | Sistema De Reinyeccion    |           |          |  |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                     | 11324472                                | No DE INVENTARIO:  | 9018124               |       | PRODUCTO:                                                                           | Agua Industrial           |           |          |  |
| CLASIFICACIÓN                                                                      |                                         |                    |                       |       | DATOS DE FABRICACIÓN                                                                |                           |           |          |  |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                    | M                                       | CRITICIDAD ASP:    | N                     |       | MARCA:                                                                              | THERMAL TRANSFER PRODUCTS |           |          |  |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                 | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: | OP                    |       | MODELO:                                                                             | BOL-30-209004             |           |          |  |
| COD CENTRO PLANIF                                                                  | 1129                                    | CLASE:             | XRXR                  |       | TAMAÑO:                                                                             | NO REGISTRA               |           |          |  |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                          | Miscelaneo Rotativo                     | TIPO DE OBJETO:    | ROT                   |       | SERIE:                                                                              | 799163                    |           |          |  |
|  |                                         |                    |                       |       |  |                           |           |          |  |
| Característica                                                                     | Valor                                   | Unidad.            | Característica        | Valor | Unidad.                                                                             | Característica            | Valor     | Unidad.  |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION                                                       |                                         |                    |                       |       |                                                                                     |                           |           |          |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION                                                         |                                         |                    |                       |       |                                                                                     |                           |           |          |  |
|                                                                                    |                                         |                    |                       |       |                                                                                     |                           |           |          |  |

Fuente: Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 20.

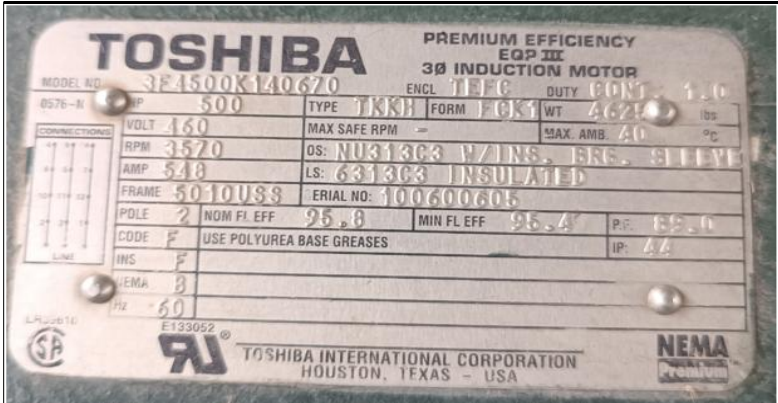
Unidad Bombeo de Inyección de Agua P-105B

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                   |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|------------------------------|-------------|---------|---------------------|------------------|---------|
| DATOS SAP                                                                             |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| No EQUIPO:                                                                            | 11324497                                | DESCRIPCIÓN:       | Bomba Centrífuga P-105B      |             |         |                     |                  |         |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                    | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B          |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                    | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| TAG EQUIPO:                                                                           | P-105B                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                              |             |         |                     |                  |         |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                        |                                         | No DE INVENTARIO:  | 9018128                      |             |         |                     |                  |         |
| CLASIFICACIÓN                                                                         |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                       | M                                       | CRITICIDAD ASP:    | N                            |             |         |                     |                  |         |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                    | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: | OP                           |             |         |                     |                  |         |
| COD CENTRO PLANIF                                                                     | 1129                                    | CLASE:             | PUCE                         |             |         |                     |                  |         |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                             | Bomba Centrífuga                        | TIPO DE OBJETO:    | ROT                          |             |         |                     |                  |         |
| UBICACIÓN                                                                             |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| VICEPRESIDENCIA:                                                                      | VRC                                     | GERENCIA:          | CATENARE                     |             |         |                     |                  |         |
| ACTIVO:                                                                               | Campo Jazmin                            |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:                                                                | Módulo MTB Jazmin                       |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| SISTEMA:                                                                              | Sistema De Reinyeccion                  |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| PRODUCTO:                                                                             | Agua Industrial                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| DATOS DE FABRICACIÓN                                                                  |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| MARCA:                                                                                | GENERAL ELECTRIC                        |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| MODELO:                                                                               | SM9.0" 18000                            |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| TAMAÑO:                                                                               | SM9.0" 18000                            |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| SERIE:                                                                                | 2M4D54335P AR 3SS SPL                   |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
|     |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
|   |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
|    |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
|  |                                         |                    |                              |             |         |                     |                  |         |
| Característica                                                                        | Valor                                   | Unidad.            | Característica               | Valor       | Unidad. | Característica      | Valor            | Unidad. |
| VELOCIDAD                                                                             | 3.570,00                                | RPM                | TAMANO_IMPULSOR              |             |         | FABRICANTE          | GENERAL ELECTRIC |         |
| TIPO_LUBRICANTE                                                                       | ACEITE                                  |                    | SISTEMA_SELLADO_API          | API PLAN-31 |         | MODELO              | SM9.0" 18000     |         |
| TIPO_IMPULSOR                                                                         | CERRADO                                 |                    | POTENCIA_NOMINAL_CABALLOSF   |             |         | DIAMETRO_SUCCION    | 6,00             | Pulg.   |
| TIPO_FLUIDO                                                                           | AGUA INYECCION                          |                    | NUMERO_DE_TORNILLOS          |             |         | DIAMETRO_DESCARGA   | 4,00             | Pulg.   |
| TIPO_DE_APOYO_RADIAL                                                                  | Rodamientos                             |                    | NUMERO_DE_ETAPAS             | 24,00       | UN      | PRESION_DE_SALIDA   |                  |         |
| TIPO_DE_APOYO_AXIAL                                                                   | Rodamientos                             |                    | NUMERO_DE_CILINDROS          |             |         | DELTA_DE_PRESION    |                  |         |
| TIPO_BOMBA_API                                                                        | API 610 BB4                             |                    | NPSH                         |             |         | CONSUMO_POTENCIA    |                  |         |
| TIPO_APOYO                                                                            |                                         |                    | NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION   |             |         | TIPO_RODAMIENTO     |                  |         |
| TIPO_ACOPLE                                                                           | GRID-FALK 1070T20                       |                    | NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION |             |         | PRESION_DE_SUCCION  | 60,00            | PSI     |
| TEMPERATURA_DE_OPERACION                                                              | 150,00                                  | °F                 | FLUJO_CAUDAL_BEP_GM          | 583,33      | G/M     | PRESION_DE_DESCARGA | 710,00           | PSI     |

Fuente: Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 21.

Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                  |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-------------------------|-------|---------|----------------|-------|---------|
| DATOS SAP                                                                            |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
| No EQUIPO:                                                                           | 11324499                                | DESCRIPCIÓN:       | Camara de empuje P-105B |       |         |                |       |         |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                   | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B          |                    |                         |       |         |                |       |         |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                   | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B |                    |                         |       |         |                |       |         |
| TAG EQUIPO:                                                                          | P-105B                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                         |       |         |                |       |         |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                       | 11324497                                | No DE INVENTARIO:  | 9018128                 |       |         |                |       |         |
| CLASIFICACIÓN                                                                        |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                      | M                                       | CRITICIDAD ASP:    | N                       |       |         |                |       |         |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                   | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: | OP                      |       |         |                |       |         |
| COD CENTRO PLANIF                                                                    | 1129                                    | CLASE:             | PUCE                    |       |         |                |       |         |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                            | Cámara De Empuje (Embrague Hidráulico)  |                    | TIPO DE OBJETO:         | ROT   |         |                |       |         |
| UBICACIÓN                                                                            |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
| VICEPRESIDENCIA:                                                                     | VRC                                     | GERENCIA:          | CATENARE                |       |         |                |       |         |
| ACTIVO:                                                                              | Campo Jazmin                            |                    |                         |       |         |                |       |         |
| PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:                                                               | Módulo MTB Jazmin                       |                    |                         |       |         |                |       |         |
| SISTEMA:                                                                             | Sistema De Reinyeccion                  |                    |                         |       |         |                |       |         |
| PRODUCTO:                                                                            | Agua Industrial                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
| DATOS DE FABRICACIÓN                                                                 |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
| MARCA:                                                                               | GENERAL ELECTRIC                        |                    |                         |       |         |                |       |         |
| MODELO:                                                                              | HD 1/2                                  |                    |                         |       |         |                |       |         |
| TAMAÑO:                                                                              | NO REGISTRA                             |                    |                         |       |         |                |       |         |
| SERIE:                                                                               | 7012F73419P                             |                    |                         |       |         |                |       |         |
|    |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
|   |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
|   |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
|  |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
| Característica                                                                       | Valor                                   | Unidad.            | Característica          | Valor | Unidad. | Característica | Valor | Unidad. |
| NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION                                                         |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |
| NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION                                                           |                                         |                    |                         |       |         |                |       |         |

Fuente: Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 22.

Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                 |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-----------------------|-------|---------|----------------|-------|---------|--|
| DATOS SAP                                                                           |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| No EQUIPO:                                                                          | 11324498                                | DESCRIPCIÓN:       | Unidad de Lubricación |       |         |                |       |         |  |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                  | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B          |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                  | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TAG EQUIPO:                                                                         | P-105B                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                       |       |         |                |       |         |  |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                      | 11324497                                | No DE INVENTARIO:  | 9018128               |       |         |                |       |         |  |
| CLASIFICACIÓN                                                                       |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                     | M                                       | CRITICIDAD ASP:    | N                     |       |         |                |       |         |  |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                  | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: | OP                    |       |         |                |       |         |  |
| COD CENTRO PLANIF                                                                   | 1129                                    | CLASE:             | XRXR                  |       |         |                |       |         |  |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                           | Miscelaneo Rotativo                     | TIPO DE OBJETO:    | ROT                   |       |         |                |       |         |  |
| DATOS DE UBICACIÓN                                                                  |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| VICEPRESIDENCIA:                                                                    | VRC                                     | GERENCIA:          | CATENARE              |       |         |                |       |         |  |
| ACTIVO:                                                                             | Campo Jazmin                            |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:                                                              | Módulo MTB Jazmin                       |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| SISTEMA:                                                                            | Sistema De Reinyeccion                  |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| PRODUCTO:                                                                           | Agua Industrial                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| DATOS DE FABRICACIÓN                                                                |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| MARCA:                                                                              | THERMAL TRANSFER PRODUCTS               |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| MODELO:                                                                             | BOL-30-209004                           |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TAMAÑO:                                                                             | NO REGISTRA                             |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| SERIE:                                                                              | 903876                                  |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|   |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|  |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| Característica                                                                      | Valor                                   | Unidad.            | Característica        | Valor | Unidad. | Característica | Valor | Unidad. |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION                                                        |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION                                                          |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|                                                                                     |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |

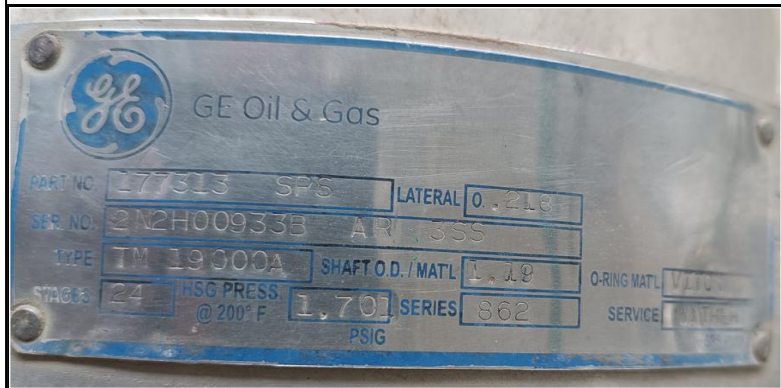
Fuente: Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 23.

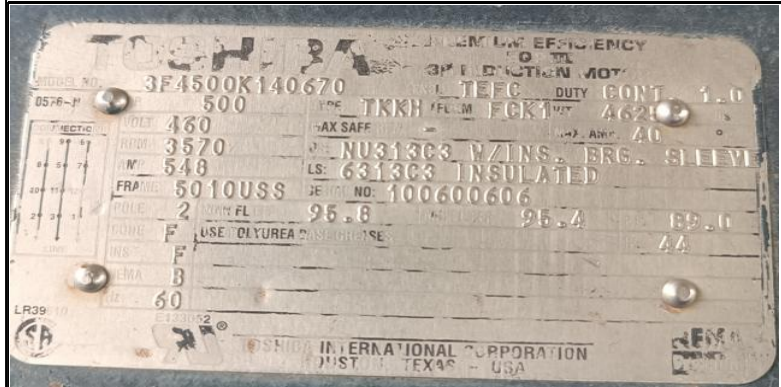
Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C

## HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET

| DATOS SAP                 |                                         |                    |                         | UBICACIÓN            |         |                        |                        |           |          |
|---------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|---------|------------------------|------------------------|-----------|----------|
| No EQUIPO:                | 11324522                                | DESCRIPCIÓN:       | Bomba Centrífuga P-105C |                      |         | VICEPRESIDENCIA:       | VRC                    | GERENCIA: | CATENARE |
| UBICACIÓN TÉCNICA:        | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMNY105C           |                    |                         |                      |         | ACTIVO:                | Campo Jazmin           |           |          |
| DENOMINACIÓN U.T.:        | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C |                    |                         |                      |         | PLANTA/ EMPLAZAMIENTO: | Módulo MTB Jazmin      |           |          |
| TAG EQUIPO:               | P-105C                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                         |                      |         | SISTEMA:               | Sistema De Reinyeccion |           |          |
| EQUIPO NIVEL 8            |                                         | No DE INVENTARIO:  | 9018132                 |                      |         | PRODUCTO:              | Agua Industrial        |           |          |
| CLASIFICACION             |                                         |                    |                         | DATOS DE FABRICACION |         |                        |                        |           |          |
| TIPO DE EQUIPO:           | M                                       | CRITICIDAD ASP:    | N                       |                      | MARCA:  | GENERAL ELECTRIC       |                        |           |          |
| CENTRO PLANIF DESC        | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: | OP                      |                      | MODELO: | TM 19000A              |                        |           |          |
| COD CENTRO PLANIF         | 1129                                    | CLASE:             | PUCE                    |                      | TAMAÑO: | TM 19000A              |                        |           |          |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO: | Bomba Centrífuga                        | TIPO DE OBJETO:    | ROT                     |                      | SERIE:  | 2N2H00933B AR 3SS      |                        |           |          |







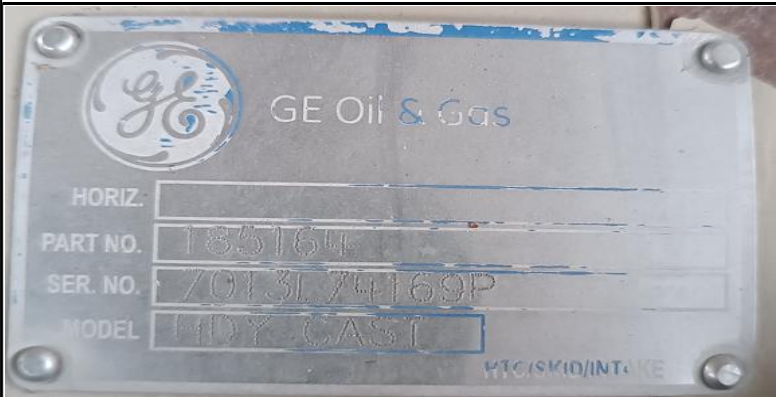
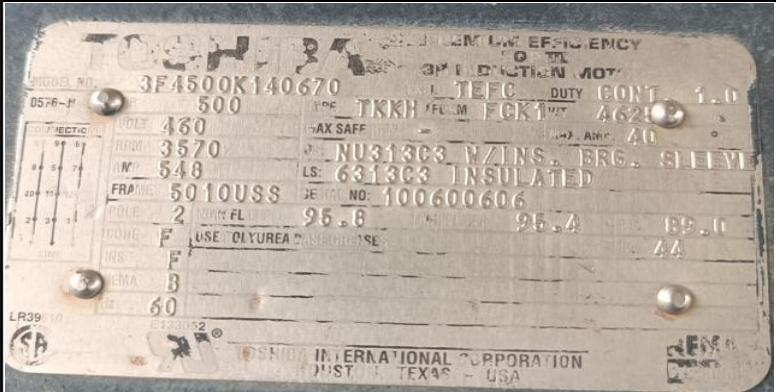


| Característica             | Valor            | Unidad. | Característica               | Valor       | Unidad. | Característica      | Valor            | Unidad. |
|----------------------------|------------------|---------|------------------------------|-------------|---------|---------------------|------------------|---------|
| VELOCIDAD                  | 3.570,00         | RPM     | TAMAÑO_IMPULSOR              |             |         | FABRICANTE          | GENERAL ELECTRIC |         |
| TIPO_LUBRICANTE            | ACEITE           |         | SISTEMA_SELLADO_API          | API PLAN-31 |         | MODELO              | TM 19000A        |         |
| TIPO_IMPULSOR              | CERRADO          |         | POTENCIA_NOMINAL_CABALLOSF   | 385,00      | HP      | DIAMETRO_SUCCION    | 6,00             | Pulg.   |
| TIPO_FLUIDO                | AGUA INYECCION   |         | NUMERO_DE_TORNILLOS          |             |         | DIAMETRO_DESCARGA   | 4,00             | Pulg.   |
| TIPO_DE_APOYO_RADIAL       | Rodamientos      |         | NUMERO_DE_ETAPAS             | 24,00       | UN      | PRESION_DE_SALIDA   |                  |         |
| TIPO_DE_APOYO_AXIAL        | Rodamientos      |         | NUMERO_DE_CILINDROS          |             |         | DELTA_DE_PRESION    |                  |         |
| TIPO_BOMBA_API             | API 610 BB4      |         | NPSH                         |             |         | CONSUMO_POTENCIA    |                  |         |
| TIPO_APOYO                 |                  |         | NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION   |             |         | TIPO_RODAMIENTO     |                  |         |
| TIPO_ACOPLE                | GRD-FALK 1070T20 |         | NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION |             |         | PRESION_DE_SUCCION  | 60,00            | PSI     |
| TEMPERATURA_DE_OPERACION_F | 150,00           | °F      | FLUJO_CAUDAL_BEP_GM          | 583,33      | G/M     | PRESION_DE_DESCARGA | 710,00           | PSI     |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 24.

Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                 |                                         |                    |                         |         |                                                                                      |                        |             |          |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------|----------|--|
| DATOS SAP                                                                           |                                         |                    |                         |         | UBICACIÓN                                                                            |                        |             |          |  |
| No EQUIPO:                                                                          | 11324524                                | DESCRIPCIÓN:       | Camara de empuje P-105C |         | VICEPRESIDENCIA:                                                                     | VRC                    | GERENCIA:   | CATENARE |  |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                  | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C          |                    |                         |         | ACTIVO:                                                                              | Campo Jazmin           |             |          |  |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                  | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C |                    |                         |         | PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:                                                               | Módulo MTB Jazmin      |             |          |  |
| TAG EQUIPO:                                                                         | P-105C                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                         |         | SISTEMA:                                                                             | Sistema De Reinyeccion |             |          |  |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                      | 11324522                                | No DE INVENTARIO:  |                         | 9018132 | PRODUCTO:                                                                            | Agua Industrial        |             |          |  |
| CLASIFICACIÓN                                                                       |                                         |                    |                         |         | DATOS DE FABRICACIÓN                                                                 |                        |             |          |  |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                     | M                                       | CRITICIDAD ASP:    |                         | N       | MARCA:                                                                               | GENERAL ELECTRIC       |             |          |  |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                  | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: |                         | OP      | MODELO:                                                                              | HDY CAST               |             |          |  |
| COD CENTRO PLANIF                                                                   | 1129                                    | CLASE:             |                         | PUCE    | TAMAÑO:                                                                              | NO REGISTRA            |             |          |  |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                           | Cámara De Empuje (Embrague Hidráulico)  |                    | TIPO DE OBJETO:         |         | ROT                                                                                  | SERIE:                 | 7013L74169P |          |  |
|   |                                         |                    |                         |         |   |                        |             |          |  |
|  |                                         |                    |                         |         |  |                        |             |          |  |
| Característica                                                                      | Valor                                   | Unidad.            | Característica          | Valor   | Unidad.                                                                              | Característica         | Valor       | Unidad.  |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION                                                        |                                         |                    |                         |         |                                                                                      |                        |             |          |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION                                                          |                                         |                    |                         |         |                                                                                      |                        |             |          |  |

Fuente: Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 25.

Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C -Unidad de lubricación.

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                 |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-----------------------|-------|---------|----------------|-------|---------|--|
| DATOS SAP                                                                           |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| No EQUIPO:                                                                          | 11324523                                | DESCRIPCIÓN:       | Unidad de Lubricación |       |         |                |       |         |  |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                  | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C          |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                  | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TAG EQUIPO:                                                                         | P-105C                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                       |       |         |                |       |         |  |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                      | 11324522                                | No DE INVENTARIO:  | 9018132               |       |         |                |       |         |  |
| CLASIFICACIÓN                                                                       |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                     | M                                       | CRITICIDAD ASP:    | N                     |       |         |                |       |         |  |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                  | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: | OP                    |       |         |                |       |         |  |
| COD CENTRO PLANIF                                                                   | 1129                                    | CLASE:             | XRXR                  |       |         |                |       |         |  |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                           | Miscelaneo Rotativo                     | TIPO DE OBJETO:    | ROT                   |       |         |                |       |         |  |
| DATOS DE UBICACIÓN                                                                  |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| VICEPRESIDENCIA:                                                                    | VRC                                     | GERENCIA:          | CATENARE              |       |         |                |       |         |  |
| ACTIVO:                                                                             | Campo Jazmin                            |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:                                                              | Módulo MTB Jazmin                       |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| SISTEMA:                                                                            | Sistema De Reinyeccion                  |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| PRODUCTO:                                                                           | Agua Industrial                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| DATOS DE FABRICACIÓN                                                                |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| MARCA:                                                                              | THERMAL TRANSFER PRODUCTS               |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| MODELO:                                                                             | BOL-30-209004                           |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TAMAÑO:                                                                             | NO REGISTRA                             |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| SERIE:                                                                              | 1059382                                 |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|   |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|  |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| Característica                                                                      | Valor                                   | Unidad.            | Característica        | Valor | Unidad. | Característica | Valor | Unidad. |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION                                                        |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION                                                          |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

Figura 26.

Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D

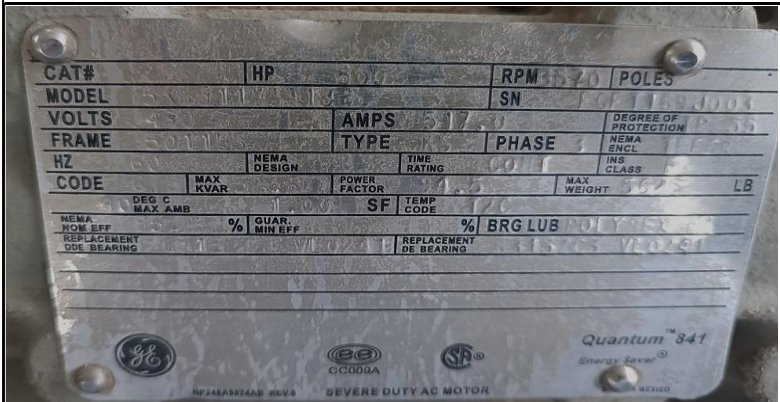
## HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET

| DATOS SAP          |                                         |                   |                         |
|--------------------|-----------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| No EQUIPO:         | 11324547                                | DESCRIPCIÓN:      | Bomba Centrífuga P-105D |
| UBICACIÓN TÉCNICA: | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D          |                   |                         |
| DENOMINACIÓN U.T.: | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D |                   |                         |
| TAG EQUIPO:        | P-105D                                  | CENTRO DE COSTOS: |                         |
| EQUIPO NIVEL 8     |                                         | No DE INVENTARIO: | 9018139                 |

| UBICACIÓN              |                        |           |          |
|------------------------|------------------------|-----------|----------|
| VICEPRESIDENCIA:       | VRC                    | GERENCIA: | CATENARE |
| ACTIVO:                | Campo Jazmin           |           |          |
| PLANTA/ EMPLAZAMIENTO: | Módulo MTB Jazmin      |           |          |
| SISTEMA:               | Sistema De Reinyeccion |           |          |
| PRODUCTO:              | Agua Industrial        |           |          |

| CLASIFICACIÓN             |                  |                    |      |
|---------------------------|------------------|--------------------|------|
| TIPO DE EQUIPO:           | M                | CRITICIDAD ASP:    | N    |
| CENTRO PLANIF DESC        | PR PUERTO BOYACÁ | ESTADO DEL EQUIPO: | OP   |
| COD CENTRO PLANIF         | 1129             | CLASE:             | PUCE |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO: | Bomba Centrífuga | TIPO DE OBJETO:    | ROT  |

| DATOS DE FABRICACIÓN |                   |
|----------------------|-------------------|
| MARCA:               | GENERAL ELECTRIC  |
| MODELO:              | TM9.5" 18000A     |
| TAMAÑO:              | TM9.5" 18000A     |
| SERIE:               | 2M3E51954P AR 3SS |

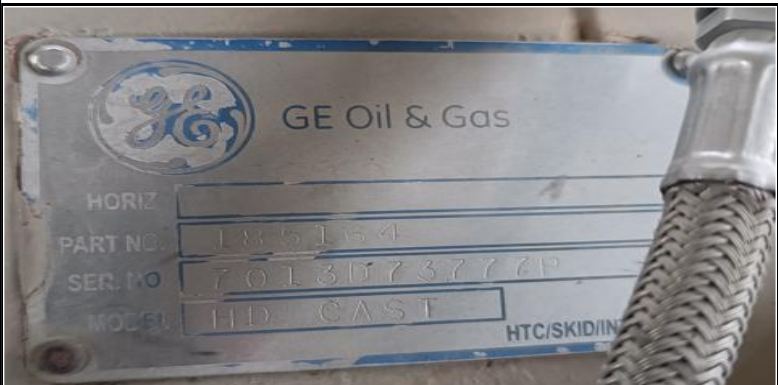
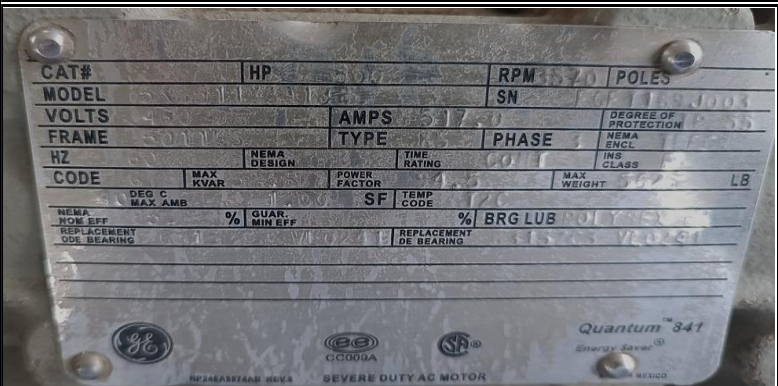


| Característica             | Valor             | Unidad. | Característica               | Valor       | Unidad. | Característica      | Valor            | Unidad. |
|----------------------------|-------------------|---------|------------------------------|-------------|---------|---------------------|------------------|---------|
| VELOCIDAD                  | 3.570,00          | RPM     | TAMANO_IMPULSOR              |             |         | FABRICANTE          | GENERAL ELECTRIC |         |
| TIPO_LUBRICANTE            | ACEITE            |         | SISTEMA_SELLADO_API          | API PLAN-31 |         | MODELO              | TM9.5" 18000A    |         |
| TIPO_IMPULSOR              | CERRADO           |         | POTENCIA_NOMINAL_CABALLOSF   |             |         | DIAMETRO_SUCCION    | 6,00             | Pulg.   |
| TIPO_FLUIDO                | AGUA INYECCION    |         | NUMERO_DE_TORNILLOS          |             |         | DIAMETRO_DESCARGA   | 4,00             | Pulg.   |
| TIPO_DE_APOYO_RADIAL       | Rodamientos       |         | NUMERO_DE_ETAPAS             | 24,00       | UN      | PRESION_DE_SALIDA   |                  |         |
| TIPO_DE_APOYO_AXIAL        | Rodamientos       |         | NUMERO_DE_CILINDROS          |             |         | DELTA_DE_PRESION    |                  |         |
| TIPO_BOMBA_API             | API 610 BB4       |         | NPSH                         |             |         | CONSUMO_POTENCIA    |                  |         |
| TIPO_APOYO                 |                   |         | NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION   |             |         | TIPO_RODAMIENTO     |                  |         |
| TIPO_ACOUPLE               | GRID-FALK 1070T20 |         | NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION |             |         | PRESION_DE_SUCCION  | 60,00            | PSI     |
| TEMPERATURA_DE_OPERACION_F | 150,00            | °F      | FLUJO_CAUDAL_BEP_GM          | 583,33      | G/M     | PRESION_DE_DESCARGA | 710,00           | PSI     |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

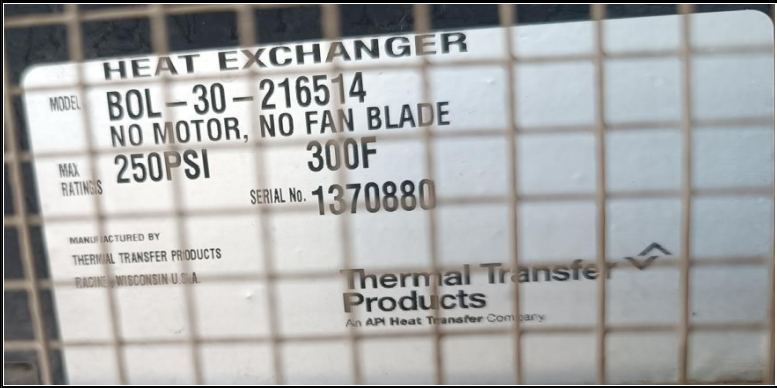
Figura 27.

Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                 |  |                                         |  |                    |                                                                                      |                         |  |       |  |         |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------|--|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--|-------|--|---------|--|
| DATOS SAP                                                                           |  |                                         |  |                    | UBICACIÓN                                                                            |                         |  |       |  |         |  |
| No EQUIPO:                                                                          |  | 11324549                                |  | DESCRIPCIÓN:       |                                                                                      | Camara de empuje P-105D |  |       |  |         |  |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                  |  | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D          |  |                    |                                                                                      |                         |  |       |  |         |  |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                  |  | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D |  |                    |                                                                                      |                         |  |       |  |         |  |
| TAG EQUIPO:                                                                         |  | P-105D                                  |  | CENTRO DE COSTOS:  |                                                                                      |                         |  |       |  |         |  |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                      |  | 11324547                                |  | No DE INVENTARIO:  |                                                                                      | 9018139                 |  |       |  |         |  |
| CLASIFICACIÓN                                                                       |  |                                         |  |                    | DATOS DE FABRICACIÓN                                                                 |                         |  |       |  |         |  |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                     |  | M                                       |  | CRITICIDAD ASP:    |                                                                                      | N                       |  |       |  |         |  |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                  |  | PR PUERTO BOYACÁ                        |  | ESTADO DEL EQUIPO: |                                                                                      | OP                      |  |       |  |         |  |
| COD CENTRO PLANIF                                                                   |  | 1129                                    |  | CLASE:             |                                                                                      | PUCE                    |  |       |  |         |  |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                           |  | Cámara De Empuje (Embrague Hidráulico)  |  | TIPO DE OBJETO:    |                                                                                      | ROT                     |  |       |  |         |  |
|   |  |                                         |  |                    |   |                         |  |       |  |         |  |
|  |  |                                         |  |                    |  |                         |  |       |  |         |  |
| Característica                                                                      |  | Valor                                   |  | Unidad.            |                                                                                      | Característica          |  | Valor |  | Unidad. |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_LEGISLACION                                                        |  |                                         |  |                    |                                                                                      |                         |  |       |  |         |  |
| NIVEL_RIESGO_POR_OPERACION                                                          |  |                                         |  |                    |                                                                                      |                         |  |       |  |         |  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

**Figura 28.**  
*Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D*

| HOJA DE DATOS DE EQUIPO - DATASHEET                                                 |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-----------------------|-------|---------|----------------|-------|---------|--|
| <b>DATOS SAP</b>                                                                    |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| No EQUIPO:                                                                          | 11324548                                | DESCRIPCIÓN:       | Unidad de Lubricación |       |         |                |       |         |  |
| UBICACIÓN TÉCNICA:                                                                  | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D          |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| DENOMINACIÓN U.T.:                                                                  | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TAG EQUIPO:                                                                         | P-105D                                  | CENTRO DE COSTOS:  |                       |       |         |                |       |         |  |
| EQUIPO NIVEL 8                                                                      | 11324547                                | No DE INVENTARIO:  | 9018139               |       |         |                |       |         |  |
| <b>CLASIFICACIÓN</b>                                                                |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TIPO DE EQUIPO:                                                                     | M                                       | CRITICIDAD ASP:    | N                     |       |         |                |       |         |  |
| CENTRO PLANIF DESC                                                                  | PR PUERTO BOYACÁ                        | ESTADO DEL EQUIPO: | OP                    |       |         |                |       |         |  |
| COD CENTRO PLANIF                                                                   | 1129                                    | CLASE:             | XRXR                  |       |         |                |       |         |  |
| DESCRIPCIÓN CLASE EQUIPO:                                                           | Miscelaneo Rotativo                     | TIPO DE OBJETO:    | ROT                   |       |         |                |       |         |  |
| <b>UBICACIÓN</b>                                                                    |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| VICEPRESIDENCIA:                                                                    | VRC                                     | GERENCIA:          | CATENARE              |       |         |                |       |         |  |
| ACTIVO:                                                                             | Campo Jazmin                            |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| PLANTA/ EMPLAZAMIENTO:                                                              | Módulo MTB Jazmin                       |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| SISTEMA:                                                                            | Sistema De Reinyeccion                  |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| PRODUCTO:                                                                           | Agua Industrial                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| <b>DATOS DE FABRICACIÓN</b>                                                         |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| MARCA:                                                                              | THERMAL TRANSFER PRODUCTS               |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| MODELO:                                                                             | BOL-30-216514                           |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| TAMAÑO:                                                                             | NO REGISTRA                             |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| SERIE:                                                                              | 1370880                                 |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|   |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
|  |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| Característica                                                                      | Valor                                   | Unidad.            | Característica        | Valor | Unidad. | Característica | Valor | Unidad. |  |
| NIVEL_RIESGO POR LEGISLACION                                                        |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |
| NIVEL_RIESGO POR OPERACION                                                          |                                         |                    |                       |       |         |                |       |         |  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de registros técnicos del sistema de inyección de agua, ECOPETROL (2026).

La hoja de vida de las bombas representa un registro exhaustivo y detallado que compila toda la información técnica, operativa y de mantenimiento de cada unidad. Este documento es fundamental para el seguimiento continuo del desempeño, la planificación de intervenciones y la gestión eficiente del ciclo de vida del equipo. Incluye especificaciones técnicas, historial de fallas, registros de mantenimiento preventivo y correctivo, condiciones operativas y resultados de pruebas de eficiencia energética. Mantener actualizada esta información permite anticipar fallas potenciales, optimizar la asignación de recursos y garantizar tanto la confiabilidad como la eficiencia energética dentro del sistema de inyección de agua.

Las figuras 17 a 28 adjuntas presentan la caracterización técnica de las bombas de inyección de agua residual analizadas, estableciendo los parámetros de diseño definidos por el fabricante, tales como caudal, presión, potencia del motor, velocidad de operación y punto de mejor eficiencia (BEP). Esta información constituye el marco de referencia técnico para el diagnóstico energético–operativo del sistema, dado que permite comparar las condiciones reales de operación con los valores nominales de diseño.

La caracterización técnica evidencia que las bombas están concebidas para operar en un rango específico de caudal y presión, en el cual se maximiza la eficiencia hidráulica y energética. Cualquier desviación sostenida de estos parámetros incrementa las pérdidas hidráulicas, el esfuerzo mecánico sobre los componentes rotativos y el consumo energético del sistema. Por tanto, esta tabla es fundamental para sustentar el análisis posterior de las desviaciones operativas y su impacto en la confiabilidad y eficiencia del sistema de bombeo.

#### **4.25 Evidencia de planes de mantenimiento de las bombas**

Se presentan a continuación los registros extraídos del sistema SAP PM correspondientes a los planes de mantenimiento programados para las bombas de inyección identificadas como P-105B, P-105C y P-105D. Estos planes contemplan actividades de mantenimiento preventivo y predictivo, enfocadas en asegurar la operatividad, confiabilidad y eficiencia energética de las unidades.

La información documentada incluye la frecuencia de intervención, tipo de mantenimiento asignado, y responsables de ejecución, reflejando un esquema sistematizado y estructurado para la gestión del ciclo de vida de cada bomba. La adecuada planificación y





La Tabla nro.18 resume las condiciones reales de operación de las bombas de inyección, evidenciando la variabilidad del caudal, la presión y las horas de operación a las que están sometidos los equipos. La información presentada permite identificar que el sistema opera bajo regímenes cambiantes, propios de la dinámica del proceso de inyección de agua residual, lo cual dificulta el mantenimiento de un punto de operación estable.

La presencia de desviaciones respecto al punto de mejor eficiencia (BEP) confirma que las bombas no operan de manera consistente dentro de su zona óptima de desempeño. Esta condición genera un impacto directo tanto en la eficiencia energética como en la confiabilidad operacional, dado que incrementa las cargas dinámicas, las vibraciones y el desgaste prematuro de los componentes internos. La tabla sustenta, por tanto, la afirmación de que la variabilidad operativa es un factor crítico en el deterioro del desempeño del sistema de bombeo.

**Tabla 20.**

*Relación operación – confiabilidad (MTBF / MTTR)*

| Ubicación Técnica / Año Hrs    | 2022  | 2023  | 2024   | 2025   |
|--------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A | 15,17 | 12,00 | 105,43 | 17,15  |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B | 42,92 | 3,00  | 69,96  | 919,37 |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C | 2,00  | 21,00 | 83,50  | 29,07  |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D | 0,00  | 10,00 | 25,37  | 42,89  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

**Tabla 21.**

*Relación tiempo de paradas durante cada año.*

| Ubicación Técnica / Cantidad fallas | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A      | 3    | 4    | 4    | 12   |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B      | 5    | 2    | 4    | 22   |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C      | 1    | 5    | 4    | 9    |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D      | 0    | 4    | 3    | 7    |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

**Tabla 22.**

*Relaciona la cantidad de fallas presente durante cada año.*

| Ubicación Técnica / MTTR       | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A | 5,1  | 3,0  | 26,4 | 1,4  |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B | 8,6  | 1,5  | 17,5 | 41,8 |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C | 2    | 4,2  | 20,9 | 3,2  |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D | 0    | 2,5  | 8,5  | 6,1  |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

**Tabla 23.**

*Relaciona el tiempo medio entre reparaciones.*

| Ubicación Técnica / Tiempo Operación | 2022   | 2023   | 2024   | 2025   |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A       | 8672,8 | 8676,0 | 8582,6 | 8670,9 |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B       | 8645,1 | 8685,0 | 8618,0 | 7768,6 |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C       | 8686,0 | 8667,0 | 8604,5 | 8658,9 |
| JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D       | 8688,0 | 8678,0 | 8662,6 | 8645,1 |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

**Tabla 24.***Relaciona el tiempo de operación de los equipos*

| <b>Ubicación Técnica / MTBF</b>       | <b>2022</b> | <b>2023</b> | <b>2024</b> | <b>2025</b> |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A</b> | 2890,9      | 2169,0      | 2145,6      | 722,6       |
| <b>JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B</b> | 1729,0      | 4342,5      | 2154,5      | 353,1       |
| <b>JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C</b> | 8686,0      | 1733,4      | 2151,1      | 962,1       |
| <b>JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D</b> | 8688,0      | 2169,5      | 2887,5      | 1235,0      |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas**Tabla 25.***Relaciona el tiempo medio entre fallas.*

| <b>Ubicación Técnica / DISPONIBILIDAD</b> | <b>2022</b> | <b>2023</b> | <b>2024</b> | <b>2025</b> |
|-------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A</b>     | 99,83%      | 99,86%      | 98,79%      | 99,80%      |
| <b>JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105B</b>     | 99,51%      | 99,97%      | 99,19%      | 89,42%      |
| <b>JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C</b>     | 99,98%      | 99,76%      | 99,04%      | 99,67%      |
| <b>JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105D</b>     | 100,00%     | 99,88%      | 99,71%      | 99,51%      |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

El análisis de la mantenibilidad de las bombas, evaluado mediante el MTTR (Mean Time To Repair), evidencia una deficiencia operativa significativa en la bomba P-105B. En 2025, el MTTR se disparó a 41,8 horas, frente a 17,5 horas en 2024, lo que indica que las fallas no solo se han vuelto más frecuentes, sino también más complejas de reparar, o bien que existen limitaciones en la disponibilidad de repuestos o en la capacitación del personal de mantenimiento.

Paralelamente, se observa una caída drástica en la confiabilidad (MTBF, Mean Time Between Failures) de todos los activos analizados durante 2025. La bomba P-105B presenta el caso más crítico, con un MTBF que disminuye de 2154,5 horas en 2024 a 353,1 horas en 2025, lo que coincide con un aumento exponencial en la cantidad de fallas, pasando de 4 fallas en 2024 a 22 fallas en 2025.

Este comportamiento refleja una combinación de problemas en la gestión de mantenimiento, disponibilidad de recursos y posibles desviaciones operativas que impactan negativamente la disponibilidad general del sistema de bombeo. La integración de estrategias de mantenimiento basado en condición y la optimización de repuestos y formación del personal se muestran como medidas necesarias para revertir esta tendencia.

**Tabla 26.**

*Instrumentos y variables analizadas en la fase I*

| <b>Instrumento</b>          | <b>Variables analizadas</b> | <b>Fuente</b> | <b>Tipo de información</b> | <b>Uso metodológico</b> |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------|-------------------------|
| <b>Registros históricos</b> | Caudal, presión, kWh, horas | Operación     | Cuantitativa               | Diagnóstico operativo   |
| <b>Mediciones en sitio</b>  | Caudal real                 | Campo         | Cuantitativa               | Validación hidráulica   |
| <b>SAP PM</b>               | Fallas, OT, tiempos         | Mantenimiento | Cuantitativa / Cualitativa | Confiabilidad           |
| <b>Bitácoras</b>            | Observaciones               | Mantenimiento | Cualitativa                | Contexto operativo      |

**Fuente:** Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas relacionadas

La Tabla 25 presenta los instrumentos de recolección de información utilizados en la Fase I y las variables analizadas a partir de cada uno de ellos. Esta tabla permite evidenciar la trazabilidad metodológica del estudio, mostrando cómo los datos operativos, energéticos y de mantenimiento se integran para construir el diagnóstico energético–operativo del sistema.

La diversidad de instrumentos empleados, que incluye registros históricos, mediciones en sitio y formatos de mantenimiento, garantiza la triangulación de la información y fortalece la validez de los resultados obtenidos. En este sentido, la tabla demuestra que el diagnóstico no se basa en una única fuente de información, sino en un análisis integral que combina datos cuantitativos y cualitativos, en coherencia con el diseño metodológico del proyecto.

El presente capítulo consolidó el análisis integral de los resultados obtenidos a partir del estudio del sistema de bombeo de inyección de agua residual del campo Jazmín, en coherencia con los objetivos específicos y el diseño metodológico del proyecto. A partir del análisis de la información histórica de operación y mantenimiento, la evaluación de la confiabilidad operacional, el estudio de los costos asociados, el contraste con el instructivo operacional SIAR y la revisión del desempeño energético, se estructuró un diagnóstico técnico que permitió caracterizar el estado real de la gestión de mantenimiento del sistema.

Los resultados evidenciaron que las bombas operan bajo condiciones exigentes, con alta variabilidad operativa y recurrencia de fallas en componentes críticos, lo que se traduce en una elevada frecuencia de intervenciones técnicas. Este comportamiento refleja una confiabilidad inferior a la esperada para equipos de operación continua y confirma la predominancia de un enfoque de mantenimiento reactivo y preventivo tradicional, con una integración limitada de criterios de eficiencia energética y optimización del desempeño.

Desde el punto de vista económico, el análisis de costos permitió identificar que la repetitividad de las intervenciones genera un impacto acumulativo significativo sobre el costo del ciclo de vida de los activos, afectando la eficiencia global del proceso de inyección. Estos costos se encuentran directamente relacionados con las condiciones reales de operación y con la

ausencia de un modelo estructurado de toma de decisiones basado en desempeño, confiabilidad y consumo energético.

El contraste entre la operación real del sistema y los lineamientos del instructivo operacional SIAR puso en evidencia brechas técnicas y de gestión que limitan la efectividad del sistema de mantenimiento. En particular, se identificó que la operación recurrente fuera del punto de mejor eficiencia contribuye al incremento del consumo energético específico, al deterioro acelerado de los equipos y a la aparición de fallas repetitivas.

En conjunto, los hallazgos presentados constituyen una base técnica sólida para sustentar la necesidad de evolucionar hacia un modelo de mantenimiento basado en condición y eficiencia energética, alineado con los principios de las normas ISO 50001 e ISO 55001. La adopción de este enfoque permitiría mejorar la confiabilidad de los equipos, optimizar la asignación de recursos, reducir costos operativos y maximizar el valor de los activos del sistema de bombeo, fortaleciendo la sostenibilidad operativa y económica del campo Jazmín.

## Capítulo 5. Conclusiones

A partir del conjunto de pruebas de eficiencia hidráulica, análisis volumétrico, simulaciones operativas y evaluación energética desarrolladas sobre el sistema de inyección de agua residual del campo Jazmín, se obtuvieron conclusiones integrales que permiten caracterizar el desempeño real de las bombas y sustentar técnicamente la estrategia de optimización operativa propuesta.

En términos generales, los resultados evidenciaron que la eficiencia de las bombas de inyección es técnicamente aceptable, especialmente para las bombas P 105 B y P 105 D, las cuales mostraron un comportamiento estable y coherente con las curvas de desempeño del fabricante. Las simulaciones realizadas en el software Baker confirmaron que, tanto a 54 Hz como a 56 Hz, estas bombas operaron dentro del cono óptimo de eficiencia, lo que indicó un adecuado balance entre caudal, presión y velocidad de rotación, minimizando pérdidas energéticas y riesgos de deterioro mecánico.

Desde el punto de vista metrológico, el análisis comparativo entre los registros del sistema SCADA y las mediciones externas realizadas mediante el FIT no intrusivo de Proasem evidenció que el sistema de control interno sobreestima el volumen real de inyección. Las diferencias acumuladas alcanzaron valores cercanos al 11,7 % a nivel global del sistema, lo que confirmó la existencia de desviaciones estructurales en la instrumentación instalada y la necesidad de establecer una línea base energética soportada en mediciones independientes y confiables.

Finalmente, a partir de la integración de los resultados hidráulicos, energéticos y económicos, se concluyó que el sistema de inyección debe operar de manera óptima con tres

bombas principales en un rango de frecuencia entre 54 Hz y 56 Hz, manteniendo una bomba adicional como respaldo operativo. Esta configuración permitió no solo incrementar el volumen real de inyección, sino también optimizar el consumo energético del sistema al prescindir de una bomba principal equipada con motor de 500 HP y una bomba booster de 60 HP. Esta estrategia se tradujo en un ahorro energético anual superior a COP \$1.614 millones y, sumado a la reducción de costos de mantenimiento, consolidó un beneficio económico total cercano a COP \$1.684 millones por año, validando la sostenibilidad técnica y financiera del modelo de optimización operativa propuesto.

## Capítulo 6. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos a partir de las pruebas de eficiencia, análisis volumétrico, simulaciones hidráulicas y evaluación energética del sistema de inyección de agua residual del campo Jazmín, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas orientadas a garantizar condiciones óptimas de operación, confiabilidad operacional y sostenibilidad del desempeño del sistema SIAR.

En primer lugar, se recomienda no operar de manera simultánea las bombas reciprocantes (Gasol) con las bombas horizontales del sistema, debido a que esta configuración genera incrementos significativos en los niveles de vibración, afectando la estabilidad mecánica, acelerando el desgaste de componentes críticos y aumentando el riesgo de fallas prematuras en los equipos de inyección.

Así mismo, se recomienda realizar la limpieza interna periódica del tanque de almacenamiento de agua TK-150, con el fin de evitar la acumulación de sólidos, sedimentos y contaminantes que puedan ingresar al sistema de succión de las bombas, generando pérdidas hidráulicas, obstrucciones parciales, cavitación y deterioro progresivo de los elementos internos de impulsión.

Se recomienda implementar un programa de limpieza periódica de los filtros de succión de todas las bombas del sistema, como medida preventiva para reducir pérdidas de carga, mejorar la eficiencia volumétrica y disminuir la probabilidad de fallas asociadas a restricción de flujo.

Adicionalmente, se recomienda realizar la limpieza de los filtros de entrada a pozo cada vez que el sistema registre presiones de descarga superiores a 1.000 psi, ya que estos

incrementos pueden estar asociados a obstrucciones hidráulicas que afectan directamente la eficiencia del proceso de inyección y elevan el consumo energético del sistema.

Finalmente, se recomienda formalizar la configuración de la filosofía de operación del sistema SIAR para que opere de manera permanente con tres bombas principales en servicio continuo y una bomba en condición de respaldo (back-up). Esta estrategia operativa permitirá consolidar la optimización energética identificada, reducir el desgaste de los activos críticos, mejorar la confiabilidad global del sistema y sostener los beneficios económicos derivados de la reducción en consumo eléctrico y costos de mantenimiento.

## Referencias

- American Petroleum Institute. (2019). *API Standard 610: Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries*. API Publishing Services.
- Asociación Colombiana de Ingenieros – ACIEM. (2020). *Guía técnica para la gestión eficiente de la energía en sistemas de bombeo industriales*. ACIEM.
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Ecopetrol S.A. (2023). *Informe de sostenibilidad 2023: Desempeño energético y gestión operativa en campos de producción*. Bogotá: Ecopetrol S.A.
- García, J., & Ríos, M. (2021). Mantenimiento predictivo y eficiencia energética en bombas centrífugas industriales. *Revista DYNA*, 96(3), 245–253. <https://doi.org/10.6036/10035>
- ICONTEC. (2014). *NTC ISO 55001:2014. Sistemas de gestión de activos – Requisitos*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC. (2019). *NTC ISO 50001:2019. Sistemas de gestión de la energía – Requisitos con orientación para su uso*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55001:2014 – Asset management – Management systems – Requirements*. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 50001:2018 – Energy management systems – Requirements with guidance for use*. ISO.

López Quintero, J. G., Buritica Macias, A. M., & Buritica Noreña, C. A. (2021). ISO 50001 sistema de gestión energética 2018 guía de implementación. *Scientia et Technica*, 26(2), 178–182. <https://doi.org/10.22517/23447214.22761>

Márquez, A. C. (2007). *The maintenance management framework: Models and methods for complex systems maintenance*. Springer.

Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (3rd ed.). SAGE Publications.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press.

Organización Latinoamericana de Energía – OLADE. (2017). *Guía de buenas prácticas de eficiencia energética en la industria latinoamericana*. Quito: OLADE.

Organización Latinoamericana de Energía – OLADE. (2017). *Energética 2017: Manual de planificación*. Global Affairs Canada.

Patton, M. Q. (2015). *Qualitative research & evaluation methods* (4th ed.). SAGE Publications.

Rausand, M., & Hoyland, A. (2004). *System reliability theory: Models, statistical methods, and applications* (2nd ed.). Wiley-Interscience.

Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. (2004). *RCM: Gateway to world class maintenance*. Elsevier.

Valderrama García, J. (2022). Estrategias de mantenimiento basado en condición para la mejora del desempeño energético en sistemas de bombeo industrial. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(2), 85–103.

Valderrama García, L. M. (2022). *Optimización energética en sistemas de bombeo con bombas centrífugas: desarrollo de un caso práctico* [Tesis de maestría, Universidad EAFIT]. Repositorio Institucional Universidad EAFIT.  
<https://repository.eafit.edu.co/items/a9d757c8-df37-42a7-89b5-5422cc501e36>

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

## Apéndices

### Apéndice 1.

#### Encuestas eficiencia energética.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>SECCIÓN 0: CONSENTIMIENTO INFORMADO Y PROTECCIÓN DE DATOS</b></p> <p><b>Tratamiento de datos personales:</b><br/>La información recolectada en esta encuesta será utilizada exclusivamente con fines académicos en el marco del proyecto de investigación:</p> <p><b>“Diseño de un plan de mantenimiento basado en eficiencia energética y optimización operativa en bombas de inyección de agua residual en campo Jazmin, Puerto Boyacá”</b></p> <p>Los datos serán tratados bajo los principios de confidencialidad, legalidad, finalidad y acceso restringido.</p> <p><b>SECCIÓN 1: DATOS GENERALES</b></p> <p>1. Cargo:</p> <p>( ) Ingeniero de mantenimiento<br/>( ) Supervisor<br/><input checked="" type="checkbox"/> Técnico<br/>( ) Operador</p> <p>2. Áreas:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Mecánica<br/>( ) Eléctrica<br/>( ) Instrumentación<br/>( ) Operaciones</p> <p>3. Años de experiencia:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 5 años</p> <p><b>SECCIÓN 2: CONDICIONES OPERATIVAS</b></p> <p>4. Las bombas operan cerca del punto de mejor eficiencia (BEP):</p> <p>( ) Siempre</p> | <p><b>SECCIÓN 3: MANTENIMIENTO</b></p> <p>5. Frecuencia de desviaciones en presión, caudal o vibración:</p> <p>( ) Muy frecuente<br/><input checked="" type="checkbox"/> Frecuente<br/>( ) Baja<br/>( ) Nula</p> <p>6. Confiabilidad de los datos del sistema SCADA:</p> <p>( ) Muy confiables<br/><input checked="" type="checkbox"/> Confiables<br/>( ) Poco confiables<br/>( ) No confiables</p> <p>7. Tipo de mantenimiento predominante:</p> <p>( ) Correctivo<br/>( ) Preventivo<br/>( ) Predictivo<br/><input checked="" type="checkbox"/> Basado en condición</p> <p>8. Frecuencia de fallas no programadas:</p> <p>( ) Muy frecuente<br/>( ) Frecuente<br/><input checked="" type="checkbox"/> Ocasional<br/>( ) Rara vez</p> <p>9. Uso de datos operativos para mantenimiento:</p> <p>( ) Siempre<br/><input checked="" type="checkbox"/> A veces<br/>( ) Nunca</p> <p><b>SECCIÓN 4: EFICIENCIA ENERGÉTICA</b></p> <p>10. ¿Se monitorean indicadores energéticos (EnPis)?</p> <p>( ) Si<br/><input checked="" type="checkbox"/> No</p> <p>11. Nivel de consumo energético del sistema:</p> <p>( ) Óptimo<br/><input checked="" type="checkbox"/> Moderado<br/>( ) Alto<br/>( ) Muy alto</p> <p>12. Implementación de estrategias de eficiencia energética:</p> <p>( ) Si<br/><input checked="" type="checkbox"/> No<br/>( ) En proceso</p> <p>13. Factores que afectan la eficiencia (máximo 3):</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Desgaste mecánico<br/><input checked="" type="checkbox"/> Operación fuera del BEP<br/>( ) Falta de mantenimiento<br/>( ) Fallas en instrumentación<br/><input checked="" type="checkbox"/> Condiciones del fluido<br/>( ) Otros: _____</p> <p><b>SECCIÓN 5: CONFIABILIDAD</b></p> <p>14. Principales fallas identificadas:</p> <p><u>Fugas vibraciones</u><br/><u>Holguras en bomba</u></p> <p>15. Impacto de las fallas:</p> <p>( ) Crítico<br/><input checked="" type="checkbox"/> Moderado<br/>( ) Bajo<br/>( ) Nulo</p> <p>16. Análisis de causa raíz:</p> <p>( ) Siempre<br/>( ) A veces<br/><input checked="" type="checkbox"/> Nunca</p> <p><b>SECCIÓN 6: MEJORA Y PROPUESTAS</b></p> <p>17. Necesidad de un modelo de mantenimiento basado en eficiencia energética:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Si<br/>( ) No</p> <p>18. Nivel de preparación del personal:</p> <p>( ) Alto<br/><input checked="" type="checkbox"/> Medio<br/>( ) Bajo<br/>( ) Nulo</p> <p>19. Propuestas de mejora:</p> <p><u>Implementar comparativos con eventos anteriores para identificar fallas.</u></p> <p>Entrevistado: <u>Andrés Ramírez</u></p> <p>Entrevistador: <u>Steven Buitán</u></p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Fuente:** Autores.



Encuesta Proyecto de Grado .pdf

## Anexos

### Anexo A. Informe de vibraciones - INF BOMBA 105A SIAR MD2 (56HZ)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | Informe de Diagnóstico y Pronóstico Equipos Estáticos               |                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| GOP-F-072                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | Gestión y Optimización de Producción<br>Vicepresidencia de Upstream |                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | Elaborado<br>22/06/2023                                             | Versión:<br>1                  |
| Diagnostico hecho por:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | EDUARD DARIO LUGO ACEVEDO                                           |                                |
| Identificación del equipo (Código SAP, TAG, Descripción de UT)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | 11324472- Bomba Centrífuga P-105A                                   | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105A |
| Técnicas Aplicadas para diagnóstico:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  | ANALISIS DE VIBRACIONES                                             |                                |
| <b>Estado de Salud Resumen:</b><br><br><b>SEG DATOS OPERACIONALES MOTOR BOMBA:</b> TLL: 40°C, TLA:51°C, TCARZ 53°C Corrientes: 398A, Frecuencia: 56.Hz, RPM: 3337.<br><b>MOTOR:</b> En los espectros en velocidad se observa predominio de la frecuencia de 3341 cpm, 6718 cpm 2f, amplitud de vibración en VEL con valor global MTLL 3,80 mm/s rms, MTLA 3,62 mm/s rms, plano axial 2,94 mm/s rms. Las amplitudes de velocidad a nivel general se encuentran dentro de la norma ISO 10816-3. en aceleración se observa actividad a la frecuencia de línea eléctrica con sus respectivos armónicos generados por el variador tendencia alista principal mente en plano axial, con valor global de MTLL 3,47 g rms, MTLA 1,45 g rms. plano axial 12,48 g rms. Por análisis de onda espectral se identifica tendencia alista en plano axial provenientes de las frecuencia electricas emitidas por el variador, estas corrientes pueden acelerar el desgaste del rodamiento y poner en riesgo la operación del equipo, desgaste en componente condición que se tendrá en seguimiento próxima rutina CBM.<br><br><b>NOR DATOS OPERACIONALES CAMARA DE EMPUJE :</b> TLL: 52°C, TLA: 61°C, T. Cuerpo: 68°C.<br><b>CAMARA:</b> las Amplitudes de vibración se encuentran dentro de la norma ISO 10816-7. se evidencia en VEL comportamiento vibratorio estable BBL / BBLA con valores globales de 3,01 mm/s rms. Por análisis de onda espectral se identifica leve holgura ( moderada ) amplitud en ACC con valor global de 0,79 g rms. condición que se tendrá en seguimiento próxima rutina CBM.<br><br><b>SEG DATOS OPERACIONALES BOMBA :</b> TLL: 53°C, TLA: 46°C, T. Cuerpo: 46°C. SUCCION 81 psi, descarga 916 psi.<br><b>BOMBA:</b> Predominio de frecuencia 3340 cpm, Amplitudes de vibración en VEL con valor global upper pump 7,02 mm/s rms, pump support #1 3,82 mm/s rms, lower pump 4,99 mm/s rms. amplitud en ACC con valor global de upper pump 0,23 g rms, pump support #3 0,31 g rms, lower pump 0,25 g rms. por análisis de onda espectral se identifica que las amplitudes con respecto al anterior monitoreo presentan tendencia constante sobre el plano, por análisis de onda espectral se identifica holgura en componente clasificación C operación para corto plazo según la norma iso 10816-7, se requiere inspección de seguimiento aplicando la técnica análisis de vibraciones de esta manera podemos identificar desviación en las amplitudes con respecto al tiempo. |  |                                                                     |                                |
| Modo/ Mecanismo de Falla Asociado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | N/A                                                                 |                                |
| Item mantenibles Asociados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  | N/A                                                                 |                                |
| <b>Recomendaciones inmediatas a Acciones de Mitigación:</b><br><br><b>RECOMENDACIÓN CBM MOTOR :</b> Realizar seguimiento en niveles de ACC próxima rutina cbm, amplitud con valor global de MTLL 3,47 g rms, MTLA 1,45 g rms. plano axial 12,48 g rms. Plano axial presenta tendencia alista considerable, desviación se requiere inspección de seguimiento aplicando las técnicas análisis de vibraciones (aviso Y4). estas corrientes pueden acelerar el desgaste del rodamiento y poner en riesgo la operación del equipo, Estado de salud 60%.<br><br><b>RECOMENDACIÓN CBM CAMARA:</b> Equipo operando en condiciones normales, estado de salud 85%.<br><br><b>RECOMENDACIÓN CBM BOMBA:</b> Realizar seguimiento en niveles de VEL próxima rutina cbm, se requiere inspección de seguimiento aplicando la técnica análisis de vibraciones de esta manera podemos identificar desviación en las amplitudes con respecto al tiempo, estado de salud 85 %.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |                                                                     |                                |
| <b>Acciones de Mejora:</b><br>Ejecución adecuada rutina de mantenimiento preventivo, monitoreo e inspección en tiempos estipulados programa de mantenimiento.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                                                                     |                                |
| <b>Pronóstico</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |                                                                     |                                |
| 1. Vida de diseño del equipo:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | 20 años                                                             |                                |
| 2. Monitoreo parámetros:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | Bueno                                                               |                                |
| 3. Vida remanente del equipo:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | Según Run Life fabricante del equipo                                |                                |
| 4. Decisiones de mantenimiento:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | Inspección Bomba Centrífuga P-105A                                  |                                |
| Fecha inicio extremo ( Fecha última para intervención)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | N / A                                                               |                                |
| Riesgo Mitigado del Equipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  | L                                                                   |                                |
| Riesgo Sin Mitigar del Equipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | L                                                                   |                                |
| Riesgo Actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | L                                                                   |                                |
| Estado de Salud Informe Anterior                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | N/A                                                                 | N/A                            |
| Estado de Salud Actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | 85                                                                  | B                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |                                                                     |                                |

La evidencia de diagnostico y causa identificada (ultrasonido, cupones, fisicoquímicos, fotografías, etc.) debe ser cargada en el repositorio definido por las Vicepresidencias

**Fuente:** Registros técnicos del sistema de monitoreo de vibraciones, ECOPETROL S.A. (2026).



CBM Bomba  
P-105A.pdf

## Anexo B. Informe de vibraciones - INF BOMBA 105B SIAR MD2 (56HZ)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | Informe de Diagnóstico y Pronóstico Equipos Estáticos               |                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| GOP-F-072                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  | Gestión y Optimización de Producción<br>Vicepresidencia de Upstream |                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | Elaborado<br>22/06/2023                                             | Versión:<br>1                  |
| Diagnostico hecho por:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | EDUARD DARIO LUGO ACEVEDO                                           |                                |
| Identificación del equipo (Código SAP, TAG, Descripción de UT)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | 11324497- Bomba Centrífuga P-105B                                   | JAZ-MIAZ-REIN-AGUT-UBOMINY105B |
| Técnicas Aplicadas para diagnóstico:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | ANALISIS DE VIBRACIONES                                             |                                |
| Estado de Salud Resumen:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |                                                                     |                                |
| <p><b>SEG DATOS OPERACIONALES MOTOR BOMBA:</b> TLL: 45°C, TLA:63°C, TCARZ 56°C Corrientes: 399A, Frecuencia: 56Hz, RPM: 3394.</p> <p><b>MOTOR:</b> En los espectros en velocidad se observa predominio de la frecuencia de 3339 CPM, amplitud de vibración en VEL con valor global MTLL 1,41 mm/s rms, MTLA 1,02 mm/s rms, plano axial 0,46 mm/s rms. Las amplitudes de velocidad a nivel general se encuentran dentro de la norma ISO 10816-3. en aceleración se observa actividad a la frecuencia de línea eléctrica con sus respectivos armónicos generados por el variador con valor global de MTLL 2,98 g rms, MTLA 2,71 g rms, plano axial 6,31 g rms. Por análisis de onda espectral se identifica tendencia alcista en plano axial provenientes de las frecuencia electricas emitidas por el variador, estas corrientes pueden acelerar el desgaste del rodamiento y poner en riesgo la operacion del equipo. desgaste en BPFO condición que se tendrá en seguimiento próxima rutina CBM.</p> <p><b>SEG DATOS OPERACIONALES CAMARA DE EMPUJE:</b> TLL: 70°C, TLA: 70°C, T. Cuerpo: 70°C.</p> <p><b>CAMARA:</b> las Amplitudes de vibración se encuentran dentro de la norma ISO 10816-7. se evidencia en VEL comportamiento vibratorio con tendencia estable CLM / CLB con valores globales de 2,58 mm/s rms. . Por análisis de onda espectral se identifica leve holgura ( moderada ) amplitud en ACC con valor global de 0,42 g rms, plano axial 0,70 g rms. condición que se tendrá en seguimiento próxima rutina CBM.</p> <p><b>SEG DATOS OPERACIONALES BOMBA:</b> TLL: 45°C, TLA: 45°C, T. Cuerpo: 45°C. SUCCION 81 psi, descarga 903 psi.</p> <p><b>BOMBA:</b> Predominio de frecuencia 3336 cpm, Amplitudes de vibración en VEL con valor global, upper pump 3,48 mm/s rms, pump support #1 3,60 mm/s rms, lower pump 7,64 mm/s rms. amplitud en ACC con valor global de upper pump 0,73 g rms, pump support #1 0,11 g rms. lower pump 0,17 g rms.</p> <p>análisis de vibraciones ejecutado con una frecuencia de 56 Hz.</p> |  |                                                                     |                                |
| Modo/ Mecanismo de Falla Asociado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  | N/A                                                                 |                                |
| Item mantenibles Asociados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | N/A                                                                 |                                |
| Recomendaciones inmediatas a Acciones de Mitigación:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                                                     |                                |
| <p><b>RECOMENDACIÓN CBM MOTOR BOMBA:</b> equipo realizar seguimiento aplicando las técnicas análisis de vibraciones. estado de salud 55%.</p> <p><b>RECOMENDACIÓN CBM:</b> Equipo operando en condiciones normales, estado de salud 85%.</p> <p><b>RECOMENDACIÓN CBM:</b> Realizar seguimiento en niveles de VEL próxima rutina CBM, estado de salud 70%.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |                                                                     |                                |
| Acciones de Mejora:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |                                                                     |                                |
| Ejecución adecuada rutina de mantenimiento preventivo, monitoreo e inspección en tiempos estipulados programa de mantenimiento.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |                                                                     |                                |
| Pronóstico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                                                                     |                                |
| 1. Vida de diseño del equipo:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | 20 años                                                             |                                |
| 2. Monitoreo parámetros:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  | Bueno                                                               |                                |
| 3. Vida remanente del equipo:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | Según Run Life fabricante del equipo                                |                                |
| 4. Decisiones de mantenimiento:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | Inspeccion Bomba Centrífuga P-105B                                  |                                |
| Fecha inicio extremo ( Fecha última para intervención)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | N / A                                                               |                                |
| Riesgo Mitigado del Equipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | L                                                                   |                                |
| Riesgo Sin Mitigar del Equipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | L                                                                   |                                |
| Riesgo Actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |                                                                     |                                |
| Estado de Salud Informe Anterior                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | N/A                                                                 | N/A                            |
| Estado de Salud Actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | 70                                                                  | O                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |                                                                     |                                |

La evidencia de diagnostico y causa identificada (ultrasonido, cupones, fisicoquímicos, fotografías, etc.) debe ser cargada en el repositorio definido por las Vicepresidencias

**Fuente:** Registros técnicos del sistema de monitoreo de vibraciones, ECOPETROL S.A. (2026).



Anexo B. Informe  
de vibraciones - INF

## Anexo C. Informe de vibraciones - INF BOMBA 105C SIAR MD2 (56HZ)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      | Informe de Diagnóstico y Pronóstico Equipos Estáticos               |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|
| GOP-F-072                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      | Gestión y Optimización de Producción<br>Vicepresidencia de Upstream |               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      | Elaborado<br>22/06/2023                                             | Versión:<br>1 |
| Diagnostico hecho por:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | EDUARD DARIO LUGO ACEVEDO            |                                                                     |               |
| Identificación del equipo (Código SAP, TAG, Descripción de UT)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 11324522- Bomba Centrífuga P-105C    | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOMINY105C                                      |               |
| Técnicas Aplicadas para diagnóstico:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | ANÁLISIS DE VIBRACIONES              |                                                                     |               |
| <b>Estado de Salud Resumen:</b><br><b>NOR DATOS OPERACIONALES MOTOR:</b> TLL: 38°C, TLA:52°C, TCARZ 54°C Corrientes: 380A, Frecuencia: 56Hz, RPM: 3328.<br><b>MOTOR:</b> Se evidencia actividad a la frecuencia de línea eléctrica con sus respectivos armónicos generados por el variador. Se observa predominio de la frecuencia 3128 CPM 1x. En los espectros de velocidad se observa amplitudes con valor global de MTL 1,49 mm/s rms. MTLA 1,24 mm/s rms, plano axial 0,67 mm/s rms. Las amplitudes de velocidad a nivel general se encuentran dentro de los rangos de operación según la norma ISO 10816-3. En ACC se evidencia tendencia alcista con multiplex armónicos una amplitud con valor global de MTL 0,96 g rms; MTLA 1,84 g rms. plano axial MTLA 2,26 g rms, se mantiene tendencia constante con respecto al anterior monitoreo. Por análisis de onda espectral se descartan condiciones de falla, aún no se identifican impactos que representen afectación en componentes internos en los rodamientos del equipo.<br>se requiere inspección de seguimiento en plano axial del motor eléctrico 2,26 g rms. |                                      |                                                                     |               |
| <b>NOR DATOS OPERACIONALES CAMARA DE EMPUJE:</b> TLL: 62°C, TLA: 61°C, T. Cuerpo: 68°C, 56Hz.<br><b>CAMARA:</b> Se observa predominio de la frecuencia 3327 CPM 1x, se evidencia en VEL una Amplitud con valor global de CLM 0,08 mm/s rms. CLBB axial 1,35 mm/s rms. las amplitudes en VEL a nivel general se encuentran dentro de los rangos de operación según la ISO 10816-7. Se evidencia tendencia alcista levantamiento espectral. Amplitudes en ACC con valor global de CLBM 0,250 g rms. CLBB 0,250 g rms, plano axial 0,54 g rms. por análisis de onda espectral se descartan condiciones de falla y desgaste en componentes internos del equipo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |                                                                     |               |
| <b>SEG DATOS OPERACIONALES BOMBA:</b> TLL: 45°C, TLA: 45°C, T. Cuerpo: 45°C, Presión de descarga: 906PSI, Presión de succión: 84 psi, Frecuencia 56hz<br><b>BOMBA:</b> Se evidencia predominio de frecuencia 3383 cpm. las Amplitudes de vibración se encuentran fuera de los rangos de operación según la norma ISO 10816-7. se evidencia en VEL comportamiento vibratorio con tendencia alcista valor total de vibración BBL 4,22 mm/s rms. BBL 2,85 mm/s rms, soporte 3,17 mm/s rms. En ACC se evidencia amplitudes de vibración con valor global BBL 0,303 g rms, BBL 0,17 g rms.<br>centralizadores, puntos de anclaje del tornillo # 1-2-3- con valores globales de 3,19 mm/s rms, 0.09 g rms. se requiere inspección de seguimiento especialmente en la BBL se identifica tendencia alcista a la 1x 7,85 mm/s rms.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |                                                                     |               |
| Modo/ Mecanismo de Falla Asociado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | N/A                                  |                                                                     |               |
| Item mantenibles Asociados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | N/A                                  |                                                                     |               |
| <b>Recomendaciones inmediatas a Acciones de Mitigación:</b><br><b>RECOMENDACIÓN CBM MOTOR:</b> Equipo operando en condiciones normales, ESTADO DE SALUD 90%.<br><b>RECOMENDACIÓN CBM CAMARA:</b> Equipo operando en condiciones normales, ESTADO DE SALUD 95%.<br><b>RECOMENDACIÓN CBM BOMBA:</b> Equipo operando en condiciones normales, ESTADO DE SALUD 85%.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |                                                                     |               |
| <b>Acciones de Mejora:</b><br>Ejecución adecuada rutina de mantenimiento preventivo, monitoreo e inspección en tiempos estipulados programa de mantenimiento.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |                                                                     |               |
| <b>Pronóstico</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |                                                                     |               |
| 1. Vida de diseño del equipo:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 20 años                              |                                                                     |               |
| 2. Monitoreo parámetros:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Bueno                                |                                                                     |               |
| 3. Vida remanente del equipo:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Según Run Life fabricante del equipo |                                                                     |               |
| 4. Decisiones de mantenimiento:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Inspeccion Bomba Centrífuga P-105C   |                                                                     |               |
| Fecha inicio extremo ( Fecha última para intervención)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | N / A                                |                                                                     |               |
| Riesgo Mitigado del Equipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | L                                    |                                                                     |               |
| Riesgo Sin Mitigar del Equipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | L                                    |                                                                     |               |
| Riesgo Actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |                                                                     |               |
| Estado de Salud Informe Anterior                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | N/A                                  | N/A                                                                 |               |
| Estado de Salud Actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 85                                   | B                                                                   |               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |                                                                     |               |
| La evidencia de diagnostico y causa identificada (ultrasonido, cupones, fisicoquímicos, fotografías, etc.) debe ser cargada en el repositorio definido por las Vicepresidencias                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |                                                                     |               |

**Fuente:** Registros técnicos del sistema de monitoreo de vibraciones, ECOPETROL S.A. (2026).



Anexo C. Informe  
de vibraciones - INF

## Anexo D. Informe de vibraciones - INF BOMBA 105D SIAR MD2 (56HZ).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                                     |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | Informe de Diagnóstico y Pronóstico Equipos Estáticos               |                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | Gestión y Optimización de Producción<br>Vicepresidencia de Upstream |                                |
| GOP-F-072                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | Elaborado<br>22/06/2023                                             | Versión:<br>1                  |
| Diagnostico hecho por:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | EDUARD DARIO LUGO ACEVEDO                                           |                                |
| Identificación del equipo (Código SAP, TAG, Descripción de UT)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | 11324547- Bomba Centrífuga P-105D                                   | JAZ-MJAZ-REIN-AGUI-UBOM\NY105D |
| Técnicas Aplicadas para diagnóstico:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | ANALISIS DE VIBRACIONES                                             |                                |
| Estado de Salud Resumen:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |                                                                     |                                |
| <p><b>NOR DATOS OPERACIONALES MOTOR BOMBA:</b> TLL: 33°C, TLA:43°C, TCARZ 42°C Corrientes: 361A, Frecuencia: 56Hz, RPM: 3356.</p> <p><b>MOTOR:</b> En los espectros en velocidad se observa predominio de la frecuencia de 3356 CPM, amplitud de vibración en VEL con valor global MTLL 3,59 mm/s rms. MTLA 2,10 mm/s rms, plano axial 2,34 mm/s rms. Las amplitudes de velocidad a nivel general se encuentran dentro de la norma ISO 10816-3. en aceleración se observa actividad a la frecuencia de línea eléctrica con sus respectivos armónicos generados por el variador con valor global de MTLL 0,55 g rms, MTLA 0,55 g rms. plano axial 1,32 g rms. Por análisis de onda espectral se descartan condiciones de falla y desgaste en rodamientos del equipo.</p> <p><b>NOR DATOS OPERACIONALES CAMARA DE EMPUJE:</b> TLL: 58°C, TLA: 58°C, T. Cuerpo: 58°C. 56Hz</p> <p><b>CAMARA:</b> las Amplitudes de vibración se encuentran dentro de la norma ISO 10816-7. se evidencia en VEL comportamiento vibratorio con tendencia estable CLM / CLB con valores globales de 1,88 mm/s rms. Por análisis de onda espectral se identifica leve holgura (moderada) amplitud en ACC con valor global de 0,049 g rms. Por análisis de onda espectral se descartan condiciones de falla y desgaste en rodamientos del equipo.</p> <p><b>NOR DATOS OPERACIONALES BOMBA:</b> TLL: 57°C, TLA: 59°C, T. Cuerpo: 62°C. SUCCION 80 psi, descarga 925 psi.</p> <p><b>BOMBA:</b> Predominio de frecuencia 3155 cpm, Amplitudes de vibración en VEL con valor global, upper pump 3,26 mm/s rms, pump support #1 2,81 mm/s rms, lower pump 2,46 mm/s rms. amplitud en ACC con valor global de upper pump 0,14 g rms, pump support #1 0,08 g rms. lower pump 0,16 g rms. por análisis de onda espectral se identifica tendencia estable no se identifica desviación de los parámetros, leve holgura en componente.</p> <p>análisis de vibraciones ejecutado con una frecuencia de 56 HZ.</p> <p>Amplitudes en VEL se encuentran dentro de los rangos de operación según la norma iso 10816-3. upper pump 1,86 mm/s rms, pump support #1 8,81 mm/s rms, lower pump 2,86 mm/s rms.</p> |  |                                                                     |                                |
| Modo/ Mecanismo de Falla Asociado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  | N/A                                                                 |                                |
| Item mantenibles Asociados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | N/A                                                                 |                                |
| Recomendaciones inmediatas a Acciones de Mitigación:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                                                                     |                                |
| <p><b>RECOMENDACIÓN CBM MOTOR:</b> Equipo operando en condiciones normales, ESTADO DE SALUD 90%.</p> <p><b>RECOMENDACIÓN CBM CAMARA:</b> Equipo operando en condiciones normales, ESTADO DE SALUD 90%.</p> <p><b>RECOMENDACIÓN CBM BOMBA:</b> Equipo operando en condiciones normales, ESTADO DE SALUD 90%.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                                     |                                |
| Acciones de Mejora:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                                                                     |                                |
| Ejecución adecuada rutina de mantenimiento preventivo, monitoreo e inspección en tiempos estipulados programa de mantenimiento.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                                     |                                |
| Pronóstico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |                                                                     |                                |
| 1. Vida de diseño del equipo:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | 20 años                                                             |                                |
| 2. Monitoreo parámetros:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | Bueno                                                               |                                |
| 3. Vida remanente del equipo:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | Según Run Life fabricante del equipo                                |                                |
| 4. Decisiones de mantenimiento:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | Inspección Bomba Centrífuga P-105D                                  |                                |
| Fecha inicio extremo ( Fecha última para intervención)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | N / A                                                               |                                |
| Riesgo Mitigado del Equipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | L                                                                   |                                |
| Riesgo Sin Mitigar del Equipo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | L                                                                   |                                |
| Riesgo Actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |                                                                     |                                |
| Estado de Salud Informe Anterior                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | N/A                                                                 | N/A                            |
| Estado de Salud Actual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | 90                                                                  | B                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                                                                     |                                |
| La evidencia de diagnostico y causa identificada (ultrasonido, cupones, fisicoquímicos, fotografías, etc.) debe ser cargada en el repositorio definido por las Vicepresidencias                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                                     |                                |

**Fuente:** Registros técnicos del sistema de monitoreo de vibraciones, ECOPETROL S.A. (2026).



Anexo D. Informe  
de vibraciones - INF

## Anexo E. Datos mantenimiento SAP 30 enero 2026

| Orden    | Ubicación                      | Descripción                           | Inicio avería | Parada | Hora in. avería | Fin de avería | Hora fin avería | Duración parada | Status sistema | Pto. bjo. resp. | Creado por | Equipo   | Denominación                            | Denominación2                            |
|----------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------|--------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|------------|----------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| 20749024 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Mtto A Motor Electrico Bomba P-105A   | 19/01/2022    |        | 19:54:34        | 19/01/2022    | 19:54:34        | 0.00            | MECE ORAS      | DECENAR         | C1081514   | 11324496 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Motor Eléctrico P-105A                   |
| 20749025 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105B | Mtto A Motor Electrico Bomba P-105B   | 19/01/2022    |        | 19:55:33        | 19/01/2022    | 19:55:33        | 0.00            | MECE ORAS      | DECENAR         | C1081514   | 11324521 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B | Motor Eléctrico P-105B                   |
| 20749027 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105C | Mtto A Motor Electrico Bomba P-105C   | 19/01/2022    |        | 19:56:02        | 19/01/2022    | 19:56:02        | 0.00            | MECE ORAS      | DECENAR         | C1081514   | 11324546 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C | Motor Eléctrico P-105C                   |
| 20753435 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Patin Bba Multietapa Iny Agua P-105A  | 27/01/2022    |        | 11:03:23        | 27/01/2022    | 11:03:23        | 0.00            | MECE ORAS      | DMECENAR        | C7186582   | 11324472 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Bomba Centrífuga P-105A                  |
| 20753454 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105B | Patin Bba Multietapa Iny Agua P-105B  | 27/01/2022    |        | 11:07:26        | 27/01/2022    | 11:07:26        | 0.00            | MECE ORAS      | DMECENAR        | C7186582   | 11324497 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B | Bomba Centrífuga P-105B                  |
| 20753456 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105C | Patin Bba Multietapa Iny Agua P-105C  | 27/01/2022    |        | 11:07:56        | 27/01/2022    | 11:07:56        | 0.00            | MECE ORAS      | DMECENAR        | C7186582   | 11324522 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C | Bomba Centrífuga P-105C                  |
| 20753457 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105D | Patin Bba Multietapa Iny Agua P-105D  | 27/01/2022    |        | 11:08:23        | 27/01/2022    | 11:08:23        | 0.00            | MECE ORAS      | DMECENAR        | C7186582   | 11324547 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D | Bomba Centrífuga P-105D                  |
| 20756086 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Insp Patin Bba Multi Iny Agua P-105A  | 03/02/2022    |        | 02:43:34        |               | 00:00:00        | 0.00            | MECE ORAS      | DMECENAR        | C7186582   | 11324472 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Bomba Centrífuga P-105A                  |
| 20756087 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105B | Insp Patin Bba Multi Iny Agua P-105B  | 03/02/2022    |        | 02:44:04        | 03/02/2022    | 02:44:04        | 0.00            | MECE ORAS      | DMECENAR        | C7186582   | 11324497 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B | Bomba Centrífuga P-105B                  |
| 20756088 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105C | Insp Patin Bba Multi Iny Agua P-105C  | 03/02/2022    |        | 02:44:33        | 03/02/2022    | 02:44:33        | 0.00            | MECE ORAS      | DMECENAR        | C7186582   | 11324522 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105C | Bomba Centrífuga P-105C                  |
| 20756089 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105D | Insp Patin Bba Multi Iny Agua P-105D  | 03/02/2022    |        | 02:45:03        | 03/02/2022    | 02:45:03        | 0.00            | MECE ORAS      | DMECENAR        | C7186582   | 11324547 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105D | Bomba Centrífuga P-105D                  |
| 20758785 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Insp Tablero Control P-105A           | 09/02/2022    |        | 19:03:53        | 09/02/2022    | 19:03:53        | 0.00            | MECE ORAS      | DINSENAR        | C1081514   | 11324475 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Sistema Control y Protección P-105A      |
| 20758782 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Insp P Bomba Multietapa P-105A        | 09/02/2022    |        | 19:02:45        | 09/02/2022    | 19:02:45        | 0.00            | MECE ORAS      | DINSENAR        | C1081514   | 11324478 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Lazo Control Presión PIC-1517            |
| 20758787 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Mtto A Valv Control Pres Desc P-105A  | 09/02/2022    |        | 19:04:38        | 09/02/2022    | 19:04:38        | 0.00            | MECE ORAS      | DINSENAR        | C1081514   | 11324479 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Válvula Control Presión PCV-1515         |
| 20758786 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Mtto A Transmisores P-105A            | 09/02/2022    |        | 19:04:15        | 09/02/2022    | 19:04:15        | 0.00            | MECE ORAS      | DINSENAR        | C1081514   | 11324480 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Transmisor Presión PIT-1517              |
| 20758784 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Insp Switch Presion P-105A            | 09/02/2022    |        | 19:03:30        | 09/02/2022    | 19:03:30        | 0.00            | MECE ORAS      | DINSENAR        | C1081514   | 11324484 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Interruptor Presión PSH-6807 Succ        |
| 20758783 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Insp Sensores Temperat Motor P-105A   | 09/02/2022    |        | 19:03:07        | 09/02/2022    | 19:03:07        | 0.00            | MECE ORAS      | DINSENAR        | C1081514   | 11324486 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Transmisor Temperatura TT-105A Camara Em |
| 20758788 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Mtto Valv Seguridad Succión P-105A    | 09/02/2022    |        | 19:05:00        | 09/02/2022    | 19:05:00        | 0.00            | MECE ORAS      | DINSENAR        | C1081514   | 11324492 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Válvula Alivio Presión PSV-105A          |
| 20758324 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105A | Mtto A Variador Velo Bom Multi P-105A | 08/02/2022    |        | 22:41:41        | 08/02/2022    | 22:41:41        | 0.00            | MECE ORAS      | DELEENAR        | C1081514   | 11324485 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105A | Variador de Frecuencia PFI-105A          |
| 20758792 | JAZ-MIAZ-REIN-AGUA-UBOMINY105B | Insp Tablero Control P-105B           | 09/02/2022    |        | 19:06:32        | 09/02/2022    | 19:06:32        | 0.00            | MECE ORAS      | DINSENAR        | C1081514   | 11324500 | Und. Bombeo de Inyección de Agua P-105B | Sistema Control y Protección P-105B      |

**Fuente:** Tomado de SAP ERP. ECOPETROL. 2026



Datos  
mantenimiento SAP