

Estrategia de Mantenimiento de Unidades de Bombeo de CENIT Basada en Análisis de Eficiencia Energética

Diana Carolina Méndez Castellanos - Jorge Alberto Gomez Lozano - Robiel Ignacio Argüello Bermudez - Daniel Ricardo Ojeda Giratá - Alexis Javier Piraján Aranguren

CENIT Transporte y Logística de Hidrocarburos S.A.S Calle 113 No. 7 – 80, Torre AR, Piso 13

E-mail: diana.mendez@cenit-transporte.com, jorge.gomez@cenit-transporte.com, robiel.arguello@cenit-transporte.com, daniel.ojeda@cenit-transporte.com, alexis.pirajan@cenit-transporte.com

Bogotá, D.C. – Colombia

Resumen

CENIT, empresa líder en transporte de hidrocarburos en Colombia, está desarrollando una innovadora estrategia de mantenimiento predictivo para sus unidades de bombeo basada en el análisis de eficiencia energética. Este sistema en desarrollo monitorea las variables de los equipos, las almacena en la nube y, mediante algoritmos de aprendizaje automático, compara el rendimiento actual con el teórico. Al detectar desviaciones, generará alertas que permitirán identificar la causa de la ineficiencia y tomar medidas correctivas de forma proactiva, con el objetivo de evitar fallas y optimizar el mantenimiento. Un estudio preliminar demostró el potencial del sistema al detectar un aumento en el consumo energético de una bomba debido al desgaste de sus componentes.

Introducción

La industria del petróleo y gas enfrenta en su continuo desarrollo desafíos que buscan la optimización de los procesos y la eficiencia en la gestión de activos para mantener la competitividad y la sostenibilidad. CENIT, como empresa de midstream en Colombia y consciente de este desafío, se encuentra desarrollando una innovadora estrategia de mantenimiento predictivo para sus unidades principales de bombeo, con el objetivo de maximizar la confiabilidad y la eficiencia de sus operaciones.

A lo largo de este documento se presenta el desarrollo e implementación de una estrategia de mantenimiento predictivo basada en el análisis de eficiencia energética, el cual busca identificar las desviaciones en el comportamiento del consumo de energía del equipo en el estado como nuevo y el actual

consumo de energía. Con este nuevo sistema se busca identificar, predecir y prevenir posibles fallas en etapas tempranas mediante el monitoreo continuo y el análisis inteligente de datos.

El sistema en desarrollo se basa en la captura, almacenamiento en nube y análisis de variables de proceso y de condición de los activos, que, mediante algoritmos de aprendizaje automático y análisis estadístico, compara la eficiencia energética actual del equipo con su eficiencia teórica (como nuevo), lo que permite detectar desviaciones y generar alertas tempranas de posibles fallas.

Un caso de estudio preliminar demostró la efectividad de este enfoque al detectar desviaciones en el consumo de energía de una unidad de bombeo principal, que luego del análisis mostró desgaste natural y

oportunidades de mejora en la instalación y operación del equipo. Se espera que la implementación completa de este sistema permita a CENIT reducir costos de mantenimiento, minimizar el tiempo de inactividad de los equipos, extender la vida útil de las unidades de bombeo, mejorar la eficiencia energética de sus operaciones y anticipar aún más las posibles fallas de los equipos.

Mantenimiento Predictivo: Fundamentos y Beneficios

El mantenimiento predictivo se define como una estrategia que utiliza datos y análisis para predecir cuándo es probable que falle un equipo, permitiendo intervenciones oportunas y optimizadas. A diferencia del mantenimiento preventivo, que se basa en calendarios predefinidos, el mantenimiento predictivo se centra en la condición real del equipo, minimizando las interrupciones innecesarias y maximizando la vida útil de los activos (Mobley, 2002).

Esta estrategia se basa en la **monitorización continua** de variables clave, como vibraciones, temperatura, presión y consumo energético, mediante sensores y otras tecnologías de **Internet de las Cosas (IoT)**. Los datos recolectados se analizan utilizando técnicas de **Big Data** y **Machine Learning**, permitiendo identificar patrones y tendencias que indican el estado de salud del equipo y la probabilidad de fallas futuras (Jardine, Lin, & Banjevic, 2006).

Beneficios del Mantenimiento Predictivo:

Reducción de costos: Al evitar fallas inesperadas y optimizar las tareas de mantenimiento, se reducen los costos de reparación, las pérdidas de producción y el consumo de repuestos.

Mayor disponibilidad de los equipos: Las intervenciones se realizan solo cuando son

necesarias, minimizando el tiempo de inactividad y maximizando la productividad.

Extensión de la vida útil de los activos: El monitoreo continuo y las acciones preventivas ayudan a preservar la integridad de los equipos y a prolongar su vida útil.

Mejora de la seguridad: La detección temprana de fallas contribuye a prevenir accidentes y a garantizar la seguridad de las operaciones.

Mayor eficiencia energética: La optimización del rendimiento de los equipos reduce el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el contexto de la industria del petróleo y gas, la implementación del mantenimiento predictivo es especialmente relevante debido a la criticidad de los equipos, los altos costos de las fallas y la necesidad de garantizar la seguridad y la eficiencia de las operaciones (Ahmad & Kamaruddin, 2012).

Metodología

Para desarrollar la Estrategia de Mantenimiento de Unidades de Bombeo de CENIT basada en Análisis de Eficiencia Energética, se implementó una metodología que combina la adquisición y análisis de datos, el desarrollo de modelos predictivos y la validación mediante un caso de estudio. Las etapas clave de esta metodología se describen a continuación:

1. Recopilación de datos:

Se recopilaron datos históricos de variables operativas y de mantenimiento de las unidades de bombeo, incluyendo:

- Variables de proceso: Caudal, presión, temperatura, vibraciones, consumo energético.

- Variables de condición: Horas de operación, historial de mantenimientos, modo de falla de los equipos y componentes.

La captura de datos se hace a través de los sistemas de control de procesos que controlan la operación de las unidades, que luego se almacenan en un historiador central localizado en nube, ver Fig 1.

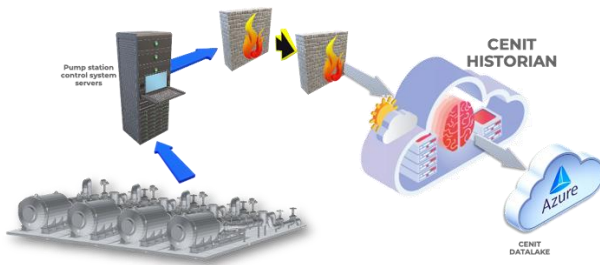


Fig 1. Esquema de captura, almacenamiento y disponibilización de la información

2. Procesamiento y análisis de datos:

Los datos recopilados fueron procesados y analizados utilizando herramientas de análisis de datos y software especializado, siguiendo la siguiente secuencia de actividades:

- Limpieza y depuración de datos: Se eliminaron datos erróneos o inconsistentes.
- Análisis exploratorio de datos: Se identificaron patrones, tendencias y correlaciones entre las variables.
- Caracterización del comportamiento energético: Se definió la línea base de consumo energético de las unidades de bombeo en condiciones óptimas de operación.

3. Desarrollo del modelo de predicción:

Se desarrollaron modelos de predicción utilizando algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning) para:

- Calcular el consumo de energía de las unidades de bombeo en función de las variables operativas y de condición bajo

condiciones de equipo nuevo. (Sin degradación por uso)

- Calcular el consumo de energía de las unidades de bombeo en función de las variables operativas y de condición bajo condiciones de equipo actual.
- Identificar desviaciones entre los dos consumos anteriormente descritos que no obedezcan a situaciones normales de operación.
- Analizar las variables con mayor aporte a la desviación identificada.

Se evaluaron diferentes algoritmos, como regresión lineal, árboles de decisión y redes neuronales, seleccionando el que mejor se ajustara a los datos y a los objetivos del proyecto.

4. Validación del modelo:

Se validó el modelo de predicción utilizando un caso de estudio de una unidad de bombeo principal. Se compararon las predicciones del modelo con el comportamiento real de la unidad, analizando la precisión y la capacidad de anticipación del modelo.

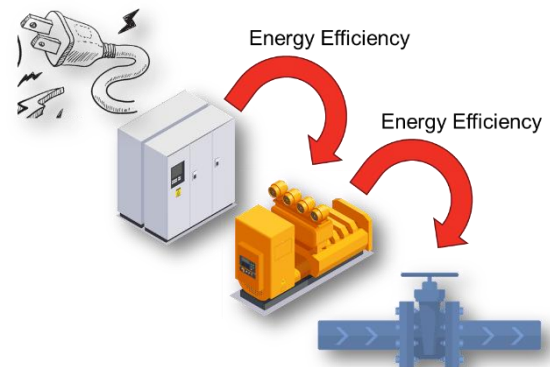


Fig 2. Esquema de modelo para validación.

Se tomo como base para el análisis una unidad de tipo centrífuga con motor eléctrico y variador de frecuencia como la expuesta en la Fig 2, la cual hace parte de un pull de 4 bombas de iguales características y operación en paralelo.

5. Monitoreo y evaluación:

Se estableció un sistema de monitoreo y evaluación para:

- Evaluar la eficacia de los cálculos de consumo de energía.
- Identificar las condiciones de desempeño normal del equipo.
- Identificar y aislar los periodos en los que el equipo presenta desviaciones entre el consumo de energía esperado y el real.
- Analizar el origen de la desviación identificada.

Esta metodología permitirá desarrollar una estrategia de mantenimiento predictivo robusta y adaptable a las necesidades de CENIT, con el potencial de capturar beneficios significativos en la gestión de sus activos.

Caso de Estudio

El caso de estudio se centra en la implementación de la Estrategia de Mantenimiento de Unidades de Bombeo basada en Análisis de Eficiencia Energética en la Estación Ayacucho de Cenit. Esta estación, clave en el sistema de transporte Pozos Colorados - Galán, cuenta con cuatro unidades de bombeo principal, cada una con un motor eléctrico de 2500 HP, un variador de frecuencia (VFD) y una bomba centrífuga. Cada unidad bombea alrededor de 1600 barriles por hora (BPH) y opera en un esquema 4+0, es decir, las cuatro unidades funcionan simultáneamente.

El objetivo principal del caso de estudio es calcular el GAP entre la eficiencia energética teórica y real de las unidades de bombeo para tomar decisiones de intervención (mantenimiento) y/o ajuste de operación. Este GAP, que representa la diferencia entre el consumo energético ideal y el consumo real, permite identificar posibles ineficiencias y anticipar fallas en los equipos.

Aplicando la metodología descrita anteriormente logramos:

Definir la línea base estableciendo la eficiencia energética teórica de cada unidad de bombeo considerando las especificaciones del fabricante, las condiciones de diseño y la curva característica de la bomba.

Identificar las variables de operativas requeridas para el análisis, entre estas: caudal (BPH), presión de descarga (PSI) potencia consumida por el motor (kW), velocidad del motor (RPM).

Definir el cálculo de la eficiencia energética real de cada unidad de bombeo utilizando los datos de monitoreo y las siguientes fórmulas:

$$WHP \text{ (Potencia Hidráulica)} = \frac{Q \times \Delta P}{2200}$$

$$\text{Eficiencia energética real} = \frac{\text{Potencia hidráulica}}{\text{Potencia consumida}}$$

Donde:

Q = Caudal

ΔP = diferencial de presión

Analizar el GAP entre la eficiencia energética teórica y real para cada unidad de bombeo, a través del comportamiento del GAP a lo largo del tiempo, identificando tendencias y patrones que pudieran indicar degradación o ineficiencias.

Con base en el análisis del GAP, las variables operativas y la aplicación de diferentes algoritmos, como regresión lineal, árboles de decisión y redes neuronales se logró definir el un plan de intervención de manera anticipada que permitió realizar actividades como limpieza de la bomba, reemplazo de sellos y ajuste de la operación: Modificación del punto de operación

en la curva de la bomba, ajuste del VFD. Con estas actividades se logró:

- Reducción del consumo energético de las unidades de bombeo.
- Aumento de la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos.
- Optimización de los costos de mantenimiento.
- Mejora de la eficiencia operativa del sistema de transporte.

El caso de estudio en la Estación Ayacucho permitió validar la efectividad de la Estrategia de Mantenimiento de Unidades de Bombeo basada en Análisis de Eficiencia Energética. Los resultados obtenidos contribuirán a la optimización de la gestión de activos de Cenit y servirán como base para la implementación de la estrategia en otras estaciones del sistema de transporte.

Resultados Esperados e Implementación

A partir de la vasta cantidad de datos recolectados y siguiendo la metodología previamente descrita, se calcularon indicadores clave de desempeño (KPI, por sus siglas en inglés) creados con el propósito de analizar la interacción entre las variables operativas y su influencia correspondiente en la eficiencia de las unidades principales. Este análisis, resultó en la creación de una herramienta gráfica que permite detectar de manera eficiente desviaciones en el comportamiento operativo y fortalecer la cultura de toma de decisiones fundamentadas en datos. La herramienta, ilustrada en la Fig 3, se describe a continuación:

1. Filtro de selección de fecha, sistema de transporte y unidad de bombeo.
2. Suma acumulada del consumo energético, horas de operación y cantidad de paros de bombeo.
3. Tendencias diarias de consumo energético acumulado y horas de operación

4. Diagrama de dispersión de TDH versus Flujo. Los puntos situados fuera del rango operativo definido son considerados críticos, dado que corresponden a áreas de operación restringida con potencial para comprometer la integridad o eficiencia del sistema.
5. Diagramas de tendencia de variables operativas como potencia activa, densidad relativa de los productos transportados, velocidad de la unidad y flujo manejado por la unidad.
6. Diagramas de tendencia de eficiencia en el tiempo y eficiencia versus flujo.
7. Diagramas de tendencia de densidad y presión de recibo en la estación de bombeo aguas abajo
8. Diagrama de tendencia de las discrepancias presentadas entre el consumo energético real y el consumo energético teórico de las unidades a lo largo del tiempo
9. Cálculo del costo energético como resultado de las discrepancias en el consumo energético
10. Diagrama de tendencia de las discrepancias a lo largo del tiempo.

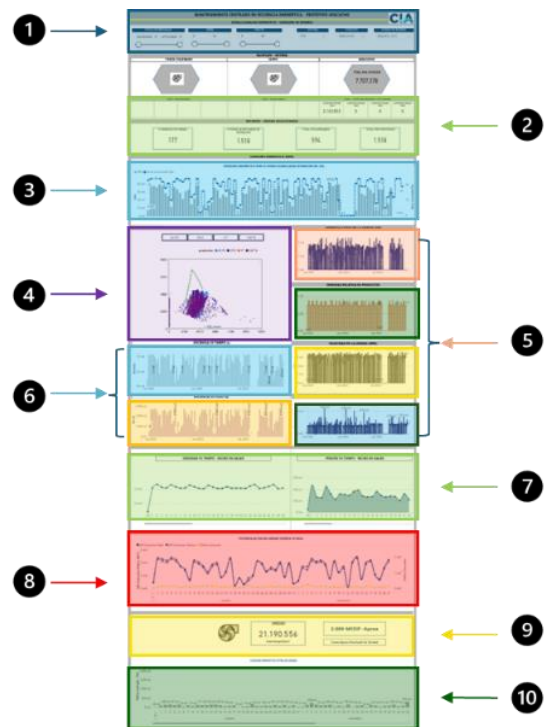


Fig 3. Visualización de la solución

El análisis continuo de las gráficas y los indicadores presentados en la *Fig 3* facilita la identificación de momentos en los que las unidades operan fuera de las ventanas óptimas asumiendo así una mala operación y por consiguiente una degradación prematura en la integridad de los activos. Asimismo, esta herramienta permite delimitar los periodos de mayor y menor eficiencia, estableciendo vínculos entre dichos periodos y las dinámicas presentadas por las variables operativas correspondientes.

Por otro lado, se realizó un análisis descriptivo-comparativo del consumo energético teórico y real de las unidades. El consumo teórico representa el comportamiento de las unidades en su estado original (Nuevo), y se obtuvo a partir de las curvas de eficiencia proporcionadas por los fabricantes, en combinación con las leyes de afinidad aplicables, mientras que el consumo real se determinó mediante mediciones directas de la instrumentación instalada en campo. Este enfoque adquiere particular relevancia en la planificación acertada de intervenciones, ya que las discrepancias crecientes entre ambos consumos representan un indicador crítico para identificar ineficiencias o desgastes en el corto mediano y largo plazo aplicando técnicas adecuadas de Inteligencia Artificial, logrando con esto reducir los costos de mantenimiento y preservar la vida útil de los activos.

Conclusiones

El análisis de la eficiencia energética es un indicador clave para predecir el estado de las

Diana Carolina Mendez Castellanos: Ing. Electrónico, (PM Esp, MBA, SM). 17 años de experiencia en O&G, en las áreas de mantenimiento, confiabilidad, gestión de activos, mejoras de procesos y gestión de proyectos.

Jorge Alberto Gomez Lozano: Ing. Mecánico, (Esp. Aut. Proc. Ind.) 34 años de experiencia en las en la industria manufacturera y O&G áreas de mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos.

unidades de bombeo. La comparación entre la eficiencia teórica y la eficiencia real permite identificar desviaciones que pueden ser indicativas de un desgaste o mal funcionamiento de los componentes.

El mantenimiento predictivo ofrece ventajas significativas frente al mantenimiento preventivo tradicional. Se espera que la implementación de esta estrategia reduzca los costos de mantenimiento, minimice el tiempo de inactividad de los equipos, extienda la vida útil de las unidades de bombeo y mejore la eficiencia energética de las operaciones.

La implementación de algoritmos de aprendizaje automático y análisis estadístico facilita la detección temprana de anomalías. El sistema en desarrollo permite automatizar el análisis de datos y la generación de alertas, lo que facilita la toma de decisiones proactiva.

Bibliografía

- Ahmad , R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, 135-149.
- Jardine, A., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenanc. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1483-1510.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Woburn: Butterworth-Heinemann.

Robiel Ignacio Argüello: Ing. Mecánico (Esp. GP&O). 12 años de experiencia en O&G, en las áreas de ILLI, END, protección catódica, diseño e ingeniería de equipos rotativos.

Daniel Ricardo Ojeda Giratá, Ing. Electrónico, (M.Sc, PhD). 10 años de experiencia en O&G, en las áreas de Analítica y Ciencia de Datos.

Alexis Javier Piraján Aranguren, Ing. Electrónico, (M.Sc, PMP, SMP). 20 años de experiencia en O&G, en las áreas de Mantenimiento, Automatización, Medición e Ingeniería.

Diana Carolina Méndez Castellanos

Celular: 3008651611

Oficina: Calle 113 #7-80, Piso 13

E-mail: diana.mendez@cenit-transporte.com

Ciudad: Bogotá DC

País: Colombia

Jorge Alberto Gomez Lozano

Celular: 3125886260

Oficina: Calle 113 #7-80, Piso 13

E-mail: jorge.gomez@cenit-transporte.com

Ciudad: Bogotá DC

País: Colombia

Robiel Ignacio Argüello

Celular: 3183625504

Oficina: Calle 113 #7-80, Piso 13

E-mail: robiel.arguello@cenit-transporte.com

Ciudad: Bogotá DC

País: Colombia

Daniel Ricardo Ojeda Giratá

Celular: 3102071035

Oficina: Calle 113 #7-80, Piso 13

E-mail: daniel.ojeda@cenit-transporte.com

Ciudad: Bogotá DC

País: Colombia

Alexis Javier Piraján Aranguren

Celular: 3175861382

Oficina: Calle 113 #7-80, Piso 13

E-mail: alexis.pirajan@cenit-transporte.com

Ciudad: Bogotá DC

País: Colombia