



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



MÁS ALLÁ DEL ACTIVO: DIAGNÓSTICO HOLÍSTICO DE FALLAS RECURRENTE EN SISTEMAS DE BOMBEO

En una estación de transporte de hidrocarburos se realizó un análisis holístico a bombas centrífugas multietapa debido a fallas recurrentes que afectaban la disponibilidad y generaban altos costos de reparación. Se aplicó un análisis de causa raíz considerando historial operativo, condición técnica y mediciones CBM de vibraciones. El estudio evidenció que las bombas operaban de forma sostenida fuera de su ventana de diseño, superando el caudal máximo permitido por la norma API 610. Esta condición fue consecuencia de una actualización tecnológica que incrementó la capacidad del sistema sin adecuar los equipos aguas abajo. Como resultado, se presentaron modos de falla como cavitación y sobrecalentamiento de rodamientos. Estas fallas aceleraron el desgaste de componentes críticos y redujeron la vida útil de los equipos. El impacto fue significativo en eficiencia, tiempos de parada y continuidad del servicio. Además, operar fuera de los parámetros de diseño incrementó los riesgos para la integridad de los activos. La comparación con una unidad similar operando correctamente confirmó que las fallas eran inducidas por el sistema. Esto resalta la importancia de un enfoque sistémico para mejorar la confiabilidad operativa.

Objetivo

El objetivo principal de este análisis fue identificar y comprender las causas raíz de las fallas recurrentes en las bombas centrífugas multietapa de la estación de transporte de hidrocarburos, evaluando su condición técnica y operativa mediante datos históricos, pruebas de vibración y registros de operación. De manera específica, se buscó determinar cómo las condiciones externas del sistema, derivadas de cambios en la demanda operativa, afectaban el desempeño de los equipos, identificar los modos de falla críticos, evaluar los impactos en confiabilidad, eficiencia y seguridad, y establecer un enfoque sistémico de diagnóstico que permitiera desarrollar planes de acción efectivos para prevenir la recurrencia de fallas y optimizar la operación de los activos.

Planteamiento del problema

En la operación de sistemas de transporte de hidrocarburos, la confiabilidad de los

activos de bombeo es un factor crítico para garantizar la continuidad del servicio, la seguridad operacional y el control de costos a lo largo del ciclo de vida. Sin embargo, en la estación analizada se han presentado fallas recurrentes en las bombas centrífugas multietapa, reflejadas en incrementos de vibración, elevación de temperatura en rodamientos, desgaste acelerado de componentes e indisponibilidad operativa.

Inicialmente, estas fallas se abordaron desde una perspectiva local, centrada en la condición interna de las bombas. No obstante, el análisis detallado de los parámetros operativos, las curvas características, los registros históricos y las pruebas de monitoreo basado en condición (CBM) evidenció que los equipos están operando de forma sostenida fuera de su ventana de diseño, superando los rangos recomendados por el fabricante y la norma API 610. Esta condición ha sido inducida por cambios en el sistema aguas arriba, donde una actualización tecnológica incrementó la capacidad de bombeo sin un ajuste integral de los activos aguas abajo.

Desde el enfoque de la norma ISO 55000, esta situación pone de manifiesto una brecha en la gestión de activos, al no considerar de manera



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



sistémica la interacción entre los activos, los procesos y el contexto operacional. La operación fuera de los parámetros de diseño incrementa el riesgo de fallas prematuras, reduce la vida útil de los equipos y eleva los costos del ciclo de vida, afectando directamente el valor que los activos aportan a la organización.

El problema no radica únicamente en la condición técnica de las bombas, sino en la falta de alineación entre las decisiones operativas, los cambios tecnológicos y la gestión del riesgo. Esta desconexión compromete la confiabilidad operacional del sistema de transporte y evidencia la necesidad de adoptar un enfoque integral que permita identificar las causas raíz reales, gestionar los riesgos asociados y definir acciones sostenibles orientadas a mejorar el desempeño y la confiabilidad de los activos, en coherencia con los principios de la ISO 55000.

Marco teórico

Eficiencia en bombas centrífugas

La eficiencia en bombas centrífugas es la ratio de la potencia de salida útil respecto a la entrada de potencia total en el eje. La diferencia entre ambos constituye la suma de las pérdidas en el interior de la bomba, estas pérdidas se agrupan en tres tipos: mecánicos, hidráulicos y volumétricos [1].

$$\eta = \eta_{hR} + \eta_V + \eta_m \quad (1)$$

Donde:

η = Eficiencia total

η_{hR} = eficiencia hidráulica

η_V = eficiencia volumétrica

η_m = Eficiencia mecánica

BEP (Best Efficiency Point)

El BEP (Punto de mejor eficiencia) es el punto en el cual una bomba funciona en su máxima capacidad, cuya eficiencia según el fabricante es la más alta y está produciendo el cabezal con la cantidad mínima de pérdidas, a su vez, los costos operativos son mínimos, además sus cargas radiales y vibraciones también son mínimas (Figura 1).

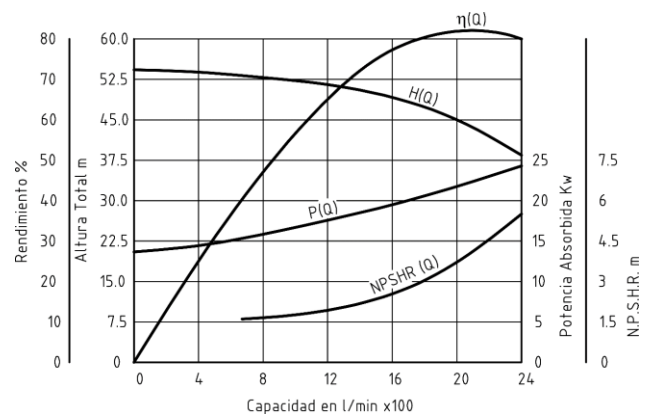


Figura 1 curva característica de la bomba

NSPH (Net Positive Suction Head)

El NSPH (altura neta positiva de aspiración) es la diferencia entre la presión del líquido en el eje del impulsor y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, dicho de otra forma, es la presión absoluta mínima en la entrada de la bomba para evitar cavitación (Figura 1).

Leyes de afinidad

El rendimiento de la bomba centrífuga se puede cambiar por el cambio en el diámetro del impulsor



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



o su velocidad de rotación. Las leyes de afinidad, o las leyes de la bomba, establecen cómo dichos cambios influyen en el rendimiento de la bomba [2]. Las leyes de afinidad se pueden expresar con relaciones matemáticas entre las variables envueltas en el desempeño de la bomba.

Si se mantiene el diámetro del impulsor contante y la velocidad de giro variable:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (2)$$

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \frac{H_1}{H_2} \quad (3)$$

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 = \frac{BHP_1}{BHP_2} \quad (4)$$

Donde:

Q = Caudal

N_1 = Velocidad de giro de la bomba máxima (RPM)

N_2 = Velocidad de giro de la bomba real (RPM)

BHP = Potencia al freno

H = cabeza de la bomba

Cuando se ha realizado el cambio en el diámetro de los impulsores, se debe realizar el siguiente ajuste en la curva de la bomba:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (9)$$

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \frac{H_1}{H_2} \quad (10)$$

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 = \frac{BHP_1}{BHP_2} \quad (5)$$

Donde:

D_1 = Diámetro de impulsor original (pulgadas)

D_2 = Diámetro de impulsor ajustado (pulgadas)

Operación de la bomba

Existen casos en que las necesidades de un sistema exigen que varíe la carga o el gasto, para esos casos se pueden usar varias bombas en diversas configuraciones, el uso de dos o más bombas, en lugar de una, permite que cada una de ellas opere en su mejor región de eficiencia la mayor parte del tiempo, aun cuando los costos iniciales pueden ser mayores, el costo de operación más bajo y la mayor flexibilidad en la operación ayuda a pagar la inversión inicial.

Operación en paralelo

Si el caudal de una sola bomba no fuese suficiente, puede aumentarse conectando varias bombas en paralelo (*Figura 2*). Se entiende como bombeo en paralelo a un sistema hidráulico constituido por dos o más bombas operando simultáneamente y con sus descargas conectadas a una línea común (*Figura 3*).

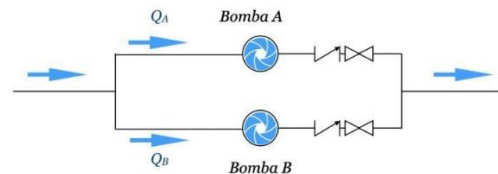


Figura 2 Operación de bombas en paralelo



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia

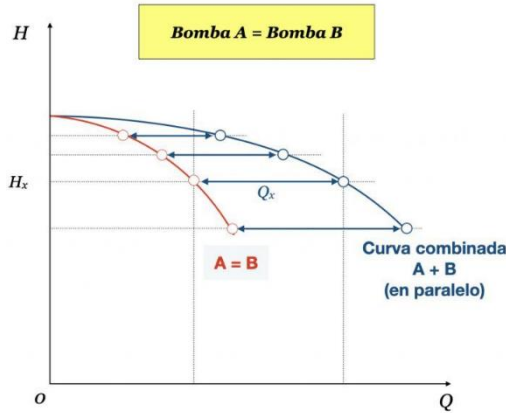


Figura 3 Curva de las bombas en paralelo

Si el caudal total está suministrado por varias bombas trabajando en paralelo, la nueva característica conjunta se conseguirá sumando los caudales de cada una de ellas para una altura dada.

Igualmente, el punto de funcionamiento se encontrará gráficamente en el cruce de la nueva línea Q-H conjunta y la correspondiente a la resistente del sistema [3].

Si las bombas son iguales:

$$H_T = H_A = H_B \quad (6)$$

$$Q_T = Q_A + Q_B \quad (7)$$

$$\eta_T = \eta_A = \eta_B \quad (8)$$

Operación en serie

Cuando dos bombas se conectan de tal forma que la descarga de la primera se introduce en la succión de la segunda (Figura 4), se dice que es una configuración en serie, la cual tiene

como resultado obtener alturas de bombeo mayores a las que lograría cada bomba individualmente (Figura 5).



Figura 4 Operación de bombas en serie

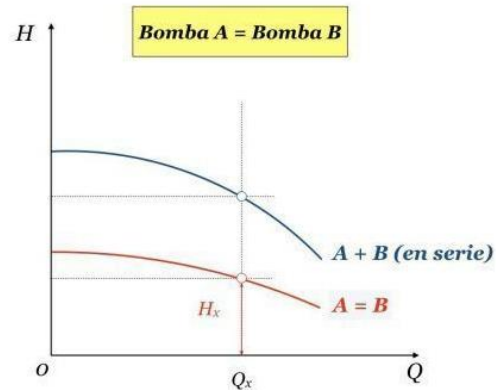


Figura 5 Curva de las bombas en serie

Cuando la altura total en un sistema está producida por varias bombas trabajando en serie, la nueva línea Q-H conjunta se obtendrá sumando las alturas de cada una de ellas para un caudal dado. En este caso el punto de funcionamiento del sistema se obtendrá gráficamente en el cruce de la línea característica Q-H obtenida, con la curva resistente del sistema [3].

Si las bombas son iguales:

$$H_T = H_A + H_B \quad (9)$$

$$Q_T = Q_A = Q_B \quad (10)$$

$$\eta_T = \eta_A = \eta_B \quad (11)$$



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Norma API 610

La norma API 610 establece los requisitos para las bombas centrífugas en voladizo, entre cojinetes y suspendidas verticalmente que trabajan en servicios de proceso de la industria de petróleo, petroquímica y gas [4], a su vez, cuál debe ser el rango de trabajo recomendados de la bomba según su punto de mejor eficiencia conocido como BEP (siglas en ingles de best efficiency point), donde las bombas deben tener una región operativa permisible (AOR siglas en ingles de allowable operating región) del 70% al 120% del BEP de la bomba tal como se suministra y una región recomendada (POR siglas en ingles de Preferred Operating Range) que debería estar dentro de la región del 80% al 110% del BEP de la bomba (Figura 6).

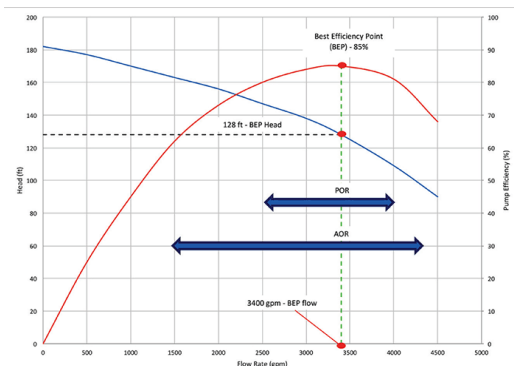


Figura 6 margen permisible de trabajo de la bomba

Las bombas centrífugas son diseñadas para operar dentro de ciertos parámetros operativos, en los cuales los fabricantes garantizan una mayor confiabilidad de los componentes, operar fuera de dichos parámetros de diseño trae como consecuencia una reducción

considerable en la vida útil del activo, lo cual se refleja en altos costos de mantenimiento y tiempo medio entre fallas más corto. Las fallas más comunes son cavitación a la succión, cavitación a la descarga, fallo de rodamientos y reducción de vida útil del impeller (Figura 7).

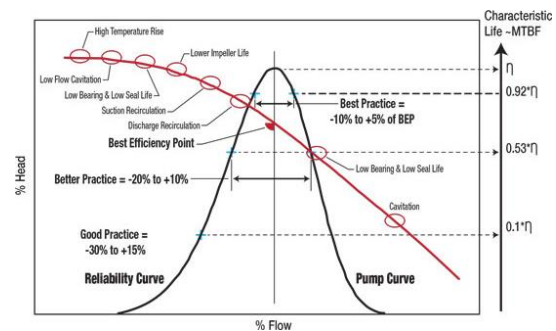


Figura 7 Tipos de fallas en bombas

Operación a alto flujo

Operar en esta condición se pueden presentar los siguientes efectos adversos en la bomba:

- Sobrecarga del elemento motriz
- Cavitación interna que induce a altas vibraciones
- Desgaste acelerado de los rodamientos
- Induce deflexión hidraulica al eje

Operación a bajo flujo

Operar en esta condición se pueden presentar los siguientes efectos adversos en la bomba:

- Alta temperatura
- Cavitación en la succión y en la descarga que induce a altas vibraciones
- Induce deflexión hidraulica al eje
- Acelera desgaste de los rodamientos por alta temperatura y vibraciones



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Metodología aplicada

El análisis se desarrolló siguiendo un enfoque holístico basado en ISO 55001, considerando la interacción entre activos, procesos operativos, personal y entorno de soporte. Se enfocó en identificar causas raíz de fallas y evaluar la confiabilidad de las bombas.

1. **Recolección de datos:** Historial operativo, mediciones CBM, presiones, caudales, vibraciones, temperaturas y curvas de operación de las bombas.
2. **Análisis de condición técnica:** Comparación entre operación real y límites de diseño/API 610; evaluación de BEP, eficiencia y estado de componentes críticos.
3. **Identificación de fallas:** Registro de eventos y patrones recurrentes, observando desviaciones en operación fuera de rangos recomendados.
4. **Análisis de causa raíz (RCA):** Aplicación de técnica de análisis de árbol lógico de fallas.
5. **Planes de acción y seguimiento:** Definición de medidas correctivas y preventivas, ajustando operación y mantenimiento; generación de seguimiento de curvas operativas con datos reales como indicador de desempeño y confiabilidad, permitiendo anticipar fallas y optimizar la vida útil de los equipos.

Análisis y discusión

El análisis de las curvas evidencia que la mayoría de los puntos de operación se concentran alrededor de ± 3500 GPM, superando el caudal máximo permisible según la norma API 610 para la cabeza dinámica del sistema. Bajo estas condiciones, y conforme a las leyes de afinidad, las bombas no alcanzan el diferencial de presión requerido, operando de forma sostenida hacia la derecha de su curva característica.

Esta condición operativa incrementa significativamente la probabilidad de fallas como cavitación, oleaje hidráulico, elevación de temperatura en rodamientos, aumento de vibraciones y deflexión del eje, lo que acelera el desgaste de componentes críticos y reduce la vida útil del activo. Aunque las bombas no han presentado eventos críticos de indisponibilidad debido a su operación intermitente, mantenimientos mayores previos y periodos prolongados fuera de servicio, el análisis evidencia una condición de operación límite que representa un riesgo latente de fallas prematuras y elevados costos de mantenimiento correctivo.

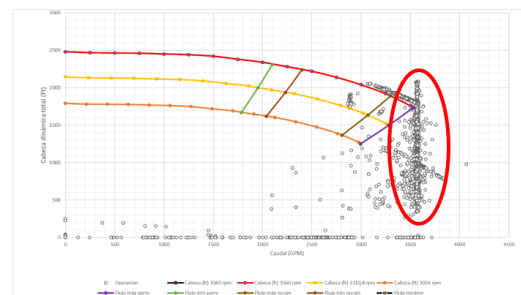


Figura 8 curva características de bomba centrífuga

Adicionalmente, la simulación del sistema bajo diferentes valores de densidad confirmó que el comportamiento fuera de los rangos de diseño



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



persiste, descartando errores asociados a la estimación de la cabeza del sistema. Esto refuerza la necesidad de implementar el seguimiento de curvas operativas con datos reales como indicador de desempeño, permitiendo evaluar de forma continua la adecuación entre la bomba y los requerimientos reales del sistema.

Desde la perspectiva del análisis de causa raíz, se identificó que los estudios realizados previamente se enfocaban principalmente en las consecuencias de las fallas, tales como altas vibraciones, elevadas temperaturas en rodamientos o fallas recurrentes de componentes, abordando estas condiciones de manera individual sin integrar los parámetros operativos del sistema. Este enfoque limitaba la identificación de la causa fundamental, al no evaluar si las condiciones de operación y la selección de la bomba eran adecuadas para los requerimientos actuales del proceso.

El análisis holístico permitió evidenciar que los requerimientos del sistema han cambiado con el tiempo, incrementando las demandas de caudal y operación, mientras que las bombas instaladas no fueron diseñadas para suplir dichas condiciones de manera continua. Si bien las bombas cumplen funcionalmente con el transporte del fluido, lo hacen en una zona de operación desfavorable, generando un desgaste acelerado que se traduce en fallas prematuras y pérdida de confiabilidad.

Este caso demuestra que los análisis de causa raíz deben trascender la identificación de fallas o síntomas puntuales, incorporando la evaluación de la funcionalidad del sistema completo, especialmente en instalaciones con muchos años de operación. Ante cambios en los requerimientos operativos, es indispensable analizar si todos los equipos involucrados en el sistema de bombeo son capaces de responder de forma confiable y sostenible, alineando la gestión de activos a un enfoque sistémico conforme a ISO 55001, que priorice la confiabilidad, la integridad de los activos y la optimización del ciclo de vida.

Conclusiones

El análisis realizado demostró que las fallas recurrentes observadas en las bombas centrífugas no responden exclusivamente a condiciones internas del activo, sino a una interacción sistémica entre equipos, operación y cambios en el entorno operativo. Si bien el caudal de trabajo del sistema se mantiene en 3500 GPM, las modificaciones realizadas en estaciones de transporte aguas arriba alteraron el comportamiento hidráulico del sistema, forzando a las bombas a operar de manera sostenida en condiciones cercanas o superiores a su límite operativo.

Se concluye que las bombas analizadas operan fuera de la ventana de flujo recomendada por el fabricante y la norma API 610, aun cuando el caudal nominal del sistema es 3500 GPM. Esta condición se refleja en la operación a la derecha del punto de mejor eficiencia (BEP), generando un diferencial de presión inferior al requerido y provocando fenómenos como cavitación, incremento de vibraciones, elevación de temperatura en rodamientos y desgaste acelerado de componentes internos.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Se evidenció que los análisis de causa raíz desarrollados previamente se enfocaban principalmente en los síntomas de la falla (altas vibraciones, temperaturas elevadas y fallas recurrentes de componentes), sin integrar de manera estructurada los datos operativos ni evaluar la adecuación de la bomba frente a los requerimientos del sistema. El enfoque holístico aplicado permitió identificar que, aunque la bomba cumple funcionalmente con el caudal requerido de 3500 GPM, lo hace en una zona de operación desfavorable que induce fallas prematuras.

Este caso demuestra que los análisis de causa raíz deben ir más allá de la identificación de fallas puntuales, incorporando la evaluación de la funcionalidad del sistema completo, especialmente en instalaciones con varios años de operación. Ante cambios en las condiciones hidráulicas o configuraciones del sistema, es indispensable verificar si los equipos instalados pueden suplir los requerimientos sin comprometer la confiabilidad y la integridad de los activos.

Desde la perspectiva de gestión de activos alineada con ISO 55001, se concluye que la confiabilidad operacional depende de la coherencia entre los objetivos del sistema, las condiciones reales de operación y la capacidad de los activos. El seguimiento continuo de curvas de operación con datos reales se consolida como una herramienta clave para la detección

temprana de desviaciones y la prevención de fallas inducidas.

Finalmente, se recomienda contrastar los resultados con los procedimientos operacionales del sistema y, si las condiciones hidráulicas lo requieren, evaluar alternativas como:

- **Operación de las bombas en paralelo**, distribuyendo el caudal total de 3500 GPM entre ambas unidades para permitir una operación dentro de rangos más favorables.
- **Revisión de la selección hidráulica de las bombas**, en caso de mantenerse una configuración 1+1, con el fin de asegurar que puedan operar de manera continua a 3500 GPM sin generar desgaste acelerado ni indisponibilidad recurrente, se debe hacer una actualización tecnológica para reemplazar las bombas por unas de mayor capacidad.

Bibliografía

- [1] American Petroleum Institute, *API 610 Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries*, 2004.
- [2] Bombas Ideal, *Datos técnicos de bombas hidráulicas*, Valencia. [En línea]. Disponible: N/A
- [3] N. Connor, "Leyes de afinidad," *Thermal Engineering*, 27 de septiembre de 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ley-de-afinidad-ley-de-bombas-definicion/>



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



- [4] Sulzer Pumps Ltd., *Centrifugal Pump Handbook*, Winterthur: Elsevier, 2010.

Carlos Felipe Vargas Gomez: Ingeniero Mecánico con maestría en Ingeniería de Confiabilidad y Gestión de Activos, certificado en CMRP. Docente de maestría en las áreas de Gestión de Activos y RAMS. Experiencia como líder de confiabilidad, especializado en estrategias para optimizar procesos de mantenimiento. Líder de investigaciones de causa raíz (RCA) para definir planes de acción que eviten fallas reincidentes. Aplica técnicas como el análisis de árbol de falla. Control de KPIs de confiabilidad, tales como MTTR, MTBF y disponibilidad. Con el fin de proponer acciones que garanticen la mejora continua en la gestión de activos físicos, todo ello conforme a la norma ISO 55000.

Datos de contacto:

Nombre del autor: Carlos Felipe Vargas Gomez
Celular: 3003868006
Dirección del autor: Cra. 39 #41-12 apt. 1202 edificio Monteverde.
E. mail: felvargo29@hotmail.com
Ciudad: Bucaramanga
País: Colombia