# Análisis de las causas de cavitación en bombas centrífugas

Jhon Alexander Ortiz Toro

Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

director

Carlos Fidel Amaris Castilla

Ing. Mecánico, MSc, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2026

**Dedicatoria**

*Dedico este logro principalmente a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida, brindándome su amor, esfuerzo, apoyo incondicional y enseñándome el valor de la constancia y la disciplina. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por impulsarme siempre a cumplir cada una de mis metas.*

*A mi pareja, por acompañarme durante este proceso con paciencia, comprensión y motivación. Gracias por estar presente en cada etapa, por tus palabras de ánimo y por ser un apoyo importante en este camino profesional y personal.*

*A mi hermano, por su compañía, consejos y por compartir conmigo cada aprendizaje y desafío vivido durante esta etapa académica.*

*Y de manera muy especial a mi abuela, por su amor infinito, sus oraciones y sus enseñanzas, que han sido inspiración constante para seguir adelante y nunca rendirme.*

*Este logro también les pertenece a ustedes, porque cada sacrificio, consejo y muestra de cariño fueron fundamentales para alcanzar esta meta.*

**Jhon Alexander Ortiz Toro**

**Agradecimientos**

*Agradezco primeramente a Dios por permitirme culminar con éxito esta importante etapa académica y profesional, brindándome la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para alcanzar esta meta.*

*A mi familia, por su amor, apoyo incondicional, comprensión y motivación constante durante todo este proceso. Gracias por acompañarme en cada desafío, por creer en mí y ser el motor que me impulsa a seguir creciendo personal y profesionalmente.*

*De igual manera, expreso mi agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander y a todos los docentes de la especialización en Gerencia de Mantenimiento, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, contribuyendo significativamente a mi formación académica y profesional.*

*Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este logro y aportaron a la culminación satisfactoria de este proyecto.*

**Jhon Alexander Ortiz Toro**

**Tabla de Contenido**

Introducción ..... 12

Justificación del plan propuesto ..... 14

1. Objetivos ..... 16

1.1. Objetivo General ..... 16

1.2. Objetivos Específicos ..... 16

2. Alcance ..... 17

3. Marco teórico ..... 19

3.1 Bombas centrífugas y su funcionamiento básico ..... 19

3.2 Cavitación: definición, causas y consecuencias ..... 19

3.3 Técnicas de detección temprana de cavitación ..... 20

3.4 Estrategias para la mitigación de la cavitación en contextos industriales ..... 21

3.5 Vida útil de las bombas centrifugas como variable de desempeño ..... 22

3.6 Brechas en la literatura y alineación con la hipótesis ..... 23

3.7 Importancia de un enfoque integral en la prevención de la cavitación ..... 23

4. Análisis bibliométrico ..... 25

4.1 Información principal ..... 25

4.2 Producción científica anual ..... 26

4.3 Fuentes más relevantes ..... 28

4.4 Producción científica de los países ..... 30

4.5 Palabras más frecuentes ..... 32

4.6 Tendencia de los temas ..... 34

4.7 Evolución temática ..... 35

4.8 Visión general del corpus bibliométrico ..... 40

4.9 Estudios más relevantes ..... 41

*4.9.1 Obra de referencia* ..... 41

*4.9.2 Diagnostico y detección de cavitación* ..... 41

*4.9.3 Caracterización del comportamiento bajo cavitación* ..... 44

*4.9.4 Control y supresión de la cavitación* ..... 44

*4.9.5 Contribución al objetivo de la monografía* ..... 45

5. Análisis técnico-comparativos ..... 49

5.1 Técnicas de ensayos no destructivos (END) aplicadas al diagnóstico de cavitación ..... 49

*5.1.1 Análisis de vibraciones* ..... 49

*5.1.2 Termografía infrarroja* ..... 51

*5.1.3 Ultrasonido pasivo* ..... 53

*5.1.4 Emisiones Acústicas (EA)* ..... 54

5.2 Cuadro Comparativo de Técnicas END ..... 56

5.3 Metodologías de simulación y gemelos digitales para el diagnóstico de cavitación en bombas centrífugas ..... 60

*5.3.1 Simulación por dinámica de fluidos computacional (CFD)* ..... 60

*5.3.2 Modelos analíticos: criterios de Thoma y curvas H-Q* ..... 61

*5.3.3 Gemelos digitales en el diagnóstico de cavitación* ..... 61

*5.3.4 Matriz de evaluación multicriterio* ..... 62

*5.3.5 Análisis por dimensión de evaluación* ..... 64

5.3.5.1 Costo de implementación. ..... 64

5.3.5.2 Precisión y confiabilidad del diagnóstico.. ..... 64

5.3.5.3 Capacidad predictiva y mantenimiento basado en condición. ..... 65

6. Plan de mantenimiento preventivo y predictivo ..... 66

6.1 Condiciones que favorecen la cavitación ..... 66

6.2 Consecuencias técnicas y económicas ..... 66

6.3 Medidas preventivas desde el diseño y la operación ..... 67

*6.3.1 Criterio NPSH — fundamento del control hidráulico* ..... 67

*6.3.2 Punto de mejor eficiencia (BEP) y rango de operación* ..... 68

*6.3.3 Diseño y configuración de la línea de succión* ..... 69

*6.3.4 Selección de materiales resistentes a la erosión por cavitación* ..... 70

6.4 Plan de mantenimiento preventivo y predictivo ..... 71

*6.4.1 Estructura del plan de mantenimiento* ..... 71

6.4.1.1 Inspección diaria (operador de turno). El operador de turno es la primera línea de detección. ..... 71

6.4.1.2 Mantenimiento preventivo semanal (técnico de turno). ..... 72

6.4.1.3 Mantenimiento predictivo mensual (especialista en condición). ..... 72

6.4.1.4 Mantenimiento preventivo semestral (mecánico especialista). ..... 74

6.4.1.5 Revisión mayor anual / Overhaul (equipo de mantenimiento). ..... 75

6.5 Indicadores clave de desempeño (kpis) ..... 76

*6.5.1 Marco de indicadores* ..... 76

*6.5.2 Línea base y metas por horizonte temporal* ..... 77

6.6 Análisis técnico-económico ..... 77

*6.6.1 Cuantificación del costo de la cavitación no controlada* ..... 77

*6.6.2 Desglose costo-beneficio anualizado* ..... 78

*6.6.3 Indicadores financieros del plan* ..... 79

*6.6.4 Justificación gerencial* ..... 79

6.7 Recomendaciones practicas – síntesis ..... 80

*6.7.1 Recomendaciones de diseño e instalación* ..... 80

*6.7.2 Recomendaciones de operación* ..... 81

*6.7.3 Recomendaciones de mantenimiento preventivo* ..... 81

*6.7.4 Recomendaciones de mantenimiento predictivo* ..... 82

*6.7.5 Recomendaciones de gestión y mejora continua* ..... 82

7. Conclusiones ..... 83

Referencias Bibliográficas ..... 85

## Lista de Tablas

**Pág.**

Tabla 1. *Estudios de mayor relevancia.* ..... 46

Tabla 2. *Cuadro comparativo de técnicas END.* ..... 57

Tabla 3. *Matriz de evaluación multicriterio.* ..... 63

Tabla 4. *Consecuencias técnicas y económicas de la cavitación por horizonte temporal.* ..... 67

Tabla 5. *Comparación de materiales para impulsores y componentes hidráulicos expuestos a cavitación.* ..... 70

Tabla 6. *Matriz de KPIs para el plan de mantenimiento de bombas centrífugas.* ..... 76

Tabla 7. *Línea base y metas de KPIs por horizonte temporal de implementación.* ..... 77

Tabla 8. *Análisis costo-beneficio anualizado del plan de mantenimiento preventivo-predictivo.* 78

Tabla 9. *Indicadores financieros del plan de mantenimiento preventivo-predictivo.* ..... 79

## Lista de Figuras

**Pág.**

Figura 1. *Información principal.* ..... 25

Figura 2. *Producción científica anual.* ..... 27

Figura 3. *Fuentes más relevantes.* ..... 29

Figura 4. *Países destacados por la producción científica de la cavitación en bombas centrífugas.* ..... 31

Figura 5. *Palabras más relevantes.* ..... 33

Figura 6. *Tendencia de los temas.* ..... 34

Figura 7. *Evolución temática.* ..... 36

## Resumen

**Título:** Análisis de las causas de cavitación en bombas centrífugas*

**Autor:** Jhon Alexander Ortiz Toro**

**Palabras Clave:** cavitación, bombas centrífugas, estrategias de mantenimiento, monitorización del estado y fiabilidad.

**Descripción:** La cavitación en bombas centrífugas constituye uno de los fenómenos más destructivos en sistemas de bombeo industrial, ocasionando erosión progresiva del impulsor, degradación del rendimiento hidráulico, fallo prematuro de sellos y rodamientos, y pérdidas económicas anuales por equipo en plantas de proceso continuo. A pesar de su impacto técnico y operacional, la literatura científica disponible muestra una producción moderada y en tendencia decreciente, con escasa integración entre los enfoques hidráulicos, de monitoreo de condición y de mantenimiento predictivo, lo que evidencia una brecha entre el conocimiento científico generado y su aplicación práctica en la gestión de activos industriales. La presente monografía propone un plan integral de recomendaciones técnicas orientadas a optimizar el desempeño de las bombas centrífugas y minimizar la aparición de cavitación en contextos industriales, abordando el problema desde tres dimensiones complementarias: las medidas preventivas aplicables desde el diseño, la instalación y la operación; las prácticas de mantenimiento preventivo y predictivo sustentadas en técnicas de monitoreo de condición; y el análisis técnico-económico que justifica la viabilidad gerencial de las intervenciones propuestas. La motivación principal del trabajo radica en la necesidad de contar con un marco técnico estructurado que permita a las organizaciones industriales reducir las fallas por cavitación, extender la vida útil de sus equipos de bombeo y tomar decisiones de mantenimiento basadas en evidencia técnica y criterios económicos objetivos. Este enfoque es coherente con los principios de la Gerencia de Mantenimiento, disciplina que prioriza la confiabilidad de los activos, la optimización del costo total de propiedad y la sostenibilidad operacional como ejes estratégicos de la gestión industrial moderna.

---

* Análisis de las causas de la cavitación en bombas centrífugas

** Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Carlos Fidel Amaris Castilla. Ing. Mecánico, MSc, PhD.

## Abstract

**Title:** Analysis of the Causes of Cavitation in Centrifugal Pumps [*]

**Author(s):** Jhon Alexander Ortiz Toro [**]

**Key Words:** cavitation, centrifugal pumps, maintenance strategies, condition monitoring and reliability.

**Description:** Cavitation in centrifugal pumps is one of the most destructive phenomena in industrial pumping systems, causing progressive impeller erosion, degradation of hydraulic performance, premature failure of seals and bearings, and annual economic losses per unit in continuous process plants. Despite its technical and operational impact, the available scientific literature shows moderate and declining research output, with limited integration between hydraulic, condition monitoring, and predictive maintenance approaches. This highlights a gap between the scientific knowledge generated and its practical application in industrial asset management. This monograph proposes a comprehensive plan of technical recommendations aimed at optimizing the performance of centrifugal pumps and minimizing the occurrence of cavitation in industrial settings. It addresses the problem from three complementary dimensions: preventive measures applicable from the design, installation, and operation phases; preventive and predictive maintenance practices based on condition monitoring techniques; and a techno-economic analysis that justifies the managerial feasibility of the proposed interventions. The primary motivation for this work lies in the need for a structured technical framework that enables industrial organizations to reduce cavitation failures, extend the service life of their pumping equipment, and make maintenance decisions based on technical evidence and objective economic criteria. This approach aligns with the principles of Maintenance Management, a discipline that prioritizes asset reliability, optimization of total cost of ownership, and operational sustainability as strategic pillars of modern industrial management.

---

* Analysis of the causes of cavitation in centrifugal pumps

** School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Director: Carlos Fidel Amaris Castilla. Mechanical Engineer, MSc, PhD.

## Introducción

Uno de los principales retos económicos y técnicos que afrontan las industrias que utilizan bombas centrífugas para el traslado y transporte de líquidos es la cavitación. Este fenómeno, que implica la aparición de burbujas de vapor en áreas de baja presión durante el funcionamiento de la bomba, tiene el potencial de provocar un deterioro estructural significativo, disminuir la eficacia operativa y elevar considerablemente los costos asociados a la reparación y el mantenimiento. Los efectos mecánicos explican la gravedad de la cavitación, ya que la implosión de las burbujas genera golpes de presión que dañan las volutas, los rodetes y otros componentes internos del equipo, afectando directamente su rendimiento y vida útil (Brennen, 2013).

Los factores de operación que originan la cavitación en bombas centrífugas están estrechamente relacionados con las condiciones de mantenimiento y operación, así como con ciertas variables de diseño. Entre los factores más relevantes se encuentran una cavidad de ingreso mal diseñada, condiciones de succión inadecuadas, variaciones en la temperatura del fluido, presiones de entrada incorrectas y deficiencias en los métodos de mantenimiento. Muchas de estas causas están directamente asociadas al estado operativo del equipo y a las prácticas de conservación implementadas. La ausencia de mantenimiento preventivo, la acumulación de sedimentos y el ensuciamiento de los filtros favorecen la aparición de cavitación, impactando negativamente la durabilidad y el desempeño de la bomba (Çengel & Boles, 2015a).

En este contexto, un mantenimiento planificado y óptimo se convierte en un elemento clave para prevenir la cavitación, prolongar la vida útil de los equipos y asegurar una operación eficiente. Dicho programa no solo contempla inspecciones periódicas de los componentes, sino también la limpieza de filtros, el control y ajuste de las presiones de operación y la identificación temprana

de condiciones anómalas que puedan inducir la cavitación. Adicionalmente, la incorporación de tecnologías de monitoreo, como sensores de vibración y presión, facilita la detección temprana de este fenómeno y permite intervenir antes de que se produzcan daños irreversibles en el equipo (Olsen, 2024).

A partir de lo anterior, se plantea la siguiente hipótesis de investigación: a partir del análisis de la literatura científica y técnica reciente, se plantea que las principales causas de cavitación en bombas centrífugas están asociadas no solo a condiciones hidráulicas de operación (NPSH, régimen de flujo y diseño), sino también a deficiencias en las prácticas de mantenimiento, las cuales son identificadas en la literatura como factores recurrentes que aceleran el deterioro y la pérdida de eficiencia del equipo.

Esta hipótesis permite establecer una relación cuantificable entre las prácticas de mantenimiento y el desempeño operativo de las bombas, haciendo viable su verificación mediante indicadores técnicos y operativos (Brennen, 2013).

Por lo tanto, resulta fundamental comprender en profundidad las causas operativas que generan cavitación en bombas centrífugas y promover una gestión de mantenimiento orientada a la prevención y corrección oportuna de dichas causas. Solo mediante un enfoque integral que combine conocimiento técnico, supervisión continua y buenas prácticas de mantenimiento es posible garantizar una operación prolongada, confiable y segura de estos equipos, optimizando recursos, reduciendo costos y asegurando la continuidad de los procesos industriales que dependen de ellos (Bin Mohd et al., 2025). En este marco, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿cuáles son las causas de operación que generan cavitación en bombas centrífugas y cómo las buenas prácticas que se le realizan al equipo pueden aumentar su vida útil?

## Justificación del plan propuesto

Uno de los problemas técnicos más importantes que compromete la confiabilidad, el rendimiento y la disponibilidad de los sistemas de bombeo en ambientes industriales es la cavitación en bombas centrífugas. Este fenómeno, marcado por la creación y posterior implosión de burbujas de vapor en áreas de presión baja dentro del fluido, produce impactos mecánicos intensos en las partes internas del equipo, lo que provoca vibraciones excesivas, deterioro, disminución del rendimiento y fallas anticipadas. Estas consecuencias no solo amenazan la integridad estructural de las bombas, sino que además aumentan los costos relacionados con el mantenimiento correctivo, ocasionan paradas imprevistas y disminuyen la productividad operacional.

En este marco, la creación y ejecución de un plan de mantenimiento enfocado en prevenir la cavitación se muestra como una táctica con un gran impacto para asegurar que los procesos industriales sigan funcionando de manera continua y eficaz. Este plan posibilitará la implementación de protocolos sistemáticos para la supervisión, el monitoreo y el control de las condiciones operativas que propician la emergencia del fenómeno, como son la presión de succión, la temperatura del fluido, el estado de los filtros y la calibración de los sistemas de bombeo. Además, se prevé la incorporación de métodos de mantenimiento predictivo a través del empleo de instrumentos diagnósticos que se basan en medir vibraciones, presión y ruido. Esto posibilitará identificar anomalías con anterioridad a que ocurran perjuicios irreparables.

El impacto esperado de la presente investigación se centra en el aporte al conocimiento y a la toma de decisiones técnicas, mediante la sistematización y análisis de la literatura relacionada con la cavitación en bombas centrífugas y su vínculo con las prácticas de mantenimiento. Los

resultados del estudio permitirán identificar, desde la evidencia reportada por estudios previos, los efectos de la cavitación sobre el rendimiento hidráulico y la vida útil de los equipos, así como las estrategias de mantenimiento que la literatura reconoce como más relevantes para su mitigación. De esta manera, el trabajo proporciona una base técnica que puede servir de apoyo para la formulación de estrategias de mantenimiento predictivo, contribuyendo indirectamente a la optimización de costos y a la reducción de fallas operativas, sin realizar una aplicación práctica directa.

Por lo tanto, el desarrollo de este proyecto es plenamente justificado, ya que aborda una cuestión operativa de gran importancia en la industria a través de la implementación de principios de ingeniería de mantenimiento, diagnóstico de fallas y gestión de confiabilidad. No solo se evitará la cavitación con su implementación, sino también mejorará la eficiencia energética, la seguridad en las operaciones y la sustentabilidad económica de los sistemas de bombeo. Esto está en línea con las metas del sector industrial de aumentar continuamente, ser más productivos y tener una mayor competitividad tecnológica.

Desde la perspectiva de la especialización en Gerencia de Mantenimiento, este proyecto aporta al fortalecimiento de competencias clave asociadas a la gestión estratégica de los activos físicos, la toma de decisiones basada en confiabilidad y el control eficiente de los recursos de mantenimiento. El análisis de la cavitación en bombas centrífugas permite abordar un problema técnico recurrente desde un enfoque gerencial, al vincular sus efectos con indicadores críticos como la disponibilidad, la confiabilidad operacional y los costos del ciclo de vida del equipo. Asimismo, contribuyendo a la optimización del desempeño operacional y al logro de los objetivos estratégicos de la organización.

# 1. Objetivos

## 1.1. Objetivo General

Analizar las causas de la cavitación en bombas centrífugas con el fin de proponer estrategias que prolonguen la vida útil de estas, usando técnicas de mantenimiento predictivo para aumentar la eficiencia operativa del equipo.

## 1.2. Objetivos Específicos

Explorar los factores técnicos y de funcionamiento que propician la aparición de la cavitación dentro de bombas centrífugas.

Analizar diferentes técnicas como la termografía, análisis de vibraciones, ultrasonido, entre otras para detectar la cavitación de forma temprana.

Proponer una serie de recomendaciones prácticas para optimizar el desempeño de las bombas centrífugas y minimizar la aparición de cavitación dentro de un contexto industrial.

## 2. Alcance

El presente proyecto de grado tiene como alcance la revisión y análisis bibliográfico de los factores que propician la cavitación en bombas centrífugas, con el fin de apoyar la gestión del mantenimiento mediante la exploración de técnicas modernas y actuales orientadas a la mitigación de este fenómeno en bombas utilizadas en entornos industriales.

El estudio considera criterios técnicos, operativos y gerenciales propios de la gestión del mantenimiento, y se enfoca en la identificación y análisis, a partir de la literatura especializada, de las condiciones operativas que favorecen la aparición de la cavitación en bombas centrífugas. Entre estas condiciones se incluyen la presión de succión, la temperatura del fluido, el estado de los componentes asociados y los principales parámetros hidráulicos del sistema de bombeo, tal como son descritos y discutidos en estudios previos.

Asimismo, el proyecto contemplará la evaluación de los efectos de la cavitación sobre la confiabilidad, disponibilidad y desempeño hidráulico de las bombas, analizando su impacto en los costos de mantenimiento, la frecuencia de fallas y la vida útil de los equipos. Con base en este análisis, se formularán estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo, incorporando técnicas de monitoreo de condición como análisis de vibraciones, medición de presión y evaluación de ruido, con el fin de detectar oportunamente señales tempranas de cavitación.

Desde el enfoque gerencial, el alcance incluirá la definición de indicadores clave de desempeño (KPI) asociados al mantenimiento, tales como reducción de paradas no programadas, disminución del mantenimiento correctivo y optimización del costo del ciclo de vida del activo. Este trabajo de grado se limita a ser un estudio teórico en donde se contemplará ha implementación

de una matriz de recomendaciones priorizando la toma de decisiones estratégicas, la estandarización de procedimientos y sostenibilidad operativa de las bombas centrífugas.

# 3. Marco teórico

## 3.1 Bombas centrífugas y su funcionamiento básico

Las bombas centrífugas son equipos hidráulicos rotodinámicos ampliamente empleados en procesos industriales para el transporte de fluidos, debido a su eficiencia, versatilidad y facilidad de mantenimiento. Su funcionamiento se basa en la conversión de energía mecánica en energía cinética y presión mediante un impulsor giratorio, lo que permite el desplazamiento continuo del fluido a través del sistema (Karassik, 2001). Cuando estas bombas operan fuera de su punto de máxima eficiencia (BEP), se generan condiciones hidráulicas desfavorables que incrementan la probabilidad de vibraciones excesivas, pérdidas de eficiencia y fenómenos como la cavitación. Esta relación entre operación, desempeño y confiabilidad constituye la base teórica que sustenta la evaluación del impacto de las prácticas de mantenimiento planteadas en la presente investigación (Çengel & Boles, 2015b).

## 3.2 Cavitación: definición, causas y consecuencias

La cavitación se presenta cuando la presión local del fluido cae por debajo de su presión de vapor, generando burbujas que colapsan violentamente al ingresar a zonas de mayor presión. Este fenómeno está directamente asociado a variables operativas como presión de succión, caudal, temperatura del fluido y estado del sistema hidráulico, las cuales pueden ser controladas o influenciadas mediante un mantenimiento adecuado.

Desde la perspectiva de esta investigación, la cavitación constituye la variable dependiente principal, cuya incidencia puede ser evaluada a partir de indicadores medibles como patrones de vibración, variaciones de presión y evidencia de daño mecánico en componentes internos.

Principales causas de cavitación:

• Baja presión en la succión (insuficiente NPSH disponible).

• Temperatura elevada del fluido bombeado.

• Diseño inadecuado del sistema hidráulico (codos, válvulas, longitudes excesivas).

• Operación fuera del rango de caudal recomendado.

Consecuencias:

• Daños mecánicos en el impulsor, carcasas y sellos.

• Vibraciones anómalas y ruidos similares a “grava”.

• Reducción de eficiencia hidráulica.

• Fallas prematuras del equipo (Karassik, 2001).

### 3.3 Técnicas de detección temprana de cavitación

Las técnicas de detección temprana de cavitación, particularmente el análisis de vibraciones, el monitoreo de presión y el ultrasonido, constituyen herramientas fundamentales dentro del mantenimiento predictivo. Estas técnicas permiten identificar patrones característicos asociados al colapso de burbujas antes de que se produzcan daños visibles, facilitando intervenciones oportunas.

Desde el punto de vista metodológico, estas técnicas se utilizan en la presente investigación como instrumentos de medición, permitiendo cuantificar la incidencia de cavitación antes y

después de la implementación del programa de mantenimiento. No obstante, estudios previos advierten que ninguna técnica por sí sola es suficiente, lo que justifica el enfoque integrado adoptado en este trabajo (Quiroga M. et al., 2012a).

a. Análisis de vibraciones: La cavitación genera patrones de vibración característicos en frecuencias específicas, los cuales pueden ser detectados mediante acelerómetros y analizados en el dominio del tiempo y la frecuencia. Es una de las técnicas más utilizadas en mantenimiento predictivo.

b. Termografía infrarroja: La termografía permite detectar anomalías térmicas en la superficie de la bomba causadas por fricción o colapsos de burbujas. Aunque no es una técnica primaria para cavitación, puede complementar el análisis en etapas avanzadas del fenómeno (García Márquez et al., 2012).

c. Ultrasonido: El ultrasonido detecta señales de alta frecuencia emitidas por el colapso de las burbujas cavitantes. Su alta sensibilidad lo hace útil para aplicaciones de diagnóstico rápido en campo.

Cada una de estas técnicas presenta ventajas y limitaciones en cuanto a costo, precisión, facilidad de aplicación y nivel de experticia requerido para su interpretación.

### 3.4 Estrategias para la mitigación de la cavitación en contextos industriales

Para reducir la aparición de cavitación y mejorar el desempeño de las bombas centrífugas, se pueden implementar diversas estrategias que combinan mejoras técnicas, buenas prácticas operativas y mantenimiento predictivo, entre ellas:

• Verificar y garantizar el cumplimiento del NPSH requerido.

• Evitar operaciones a caudal muy bajo o excesivo.

• Realizar mantenimientos periódicos y limpiezas del sistema de succión.

• Instalar válvulas de control adecuadas y evitar codos inmediatos a la succión.

• Implementar sistemas de monitoreo continuo mediante sensores.

Estas medidas, cuando se adaptan al entorno industrial específico, pueden alargar la vida útil de las bombas, reducir los tiempos de paro y optimizar la eficiencia energética del sistema (Kelechava, 2017).

Importancia de un enfoque integral en la prevención de cavitación La cavitación no solo representa un problema técnico, sino también económico y operativo. Adoptar un enfoque integral que considere diseño hidráulico, monitoreo constante y personal capacitado permite no solo detectar a tiempo el fenómeno, sino también prevenir su aparición, asegurando una operación más confiable y eficiente (García Márquez et al., 2012; Wilson et al., 2018).

### 3.5 Vida útil de las bombas centrifugas como variable de desempeño

La vida útil de una bomba centrífuga está estrechamente relacionada con la frecuencia e intensidad de fenómenos como la cavitación. El daño acumulativo causado por la implosión de burbujas acelera el desgaste de componentes críticos, reduciendo el tiempo medio entre fallas (MTBF) y aumentando los costos de mantenimiento correctivo.

Desde el enfoque metodológico, la vida útil se define como la segunda variable dependiente, medida en horas de operación continua y MTBF, indicadores ampliamente aceptados en la ingeniería de mantenimiento. La literatura respalda que la reducción de la cavitación

mediante prácticas de mantenimiento adecuadas tiene un impacto directo en la extensión de la vida útil del equipo, sustentando así el segundo componente de la hipótesis (Geitner & Bloch, 2012; Mobley, 2002).

### 3.6 Brechas en la literatura y alineación con la hipótesis

A pesar de la amplia documentación sobre cavitación y técnicas de mitigación, persiste una limitación en estudios que integren mantenimiento planificado, monitoreo predictivo y evaluación cuantitativa del impacto sobre variables operativas clave. La mayoría de los trabajos se centran en soluciones técnicas individuales, sin analizar su efectividad conjunta ni su aplicabilidad en escenarios industriales reales.

En respuesta a esta brecha, la presente investigación se orienta a analizar críticamente la literatura científica y técnica con el fin de identificar y discutir la relación entre las prácticas de mantenimiento y la aparición de cavitación en bombas centrífugas. A partir de este análisis, se plantea como proposición teórica que la literatura especializada reconoce la gestión adecuada del mantenimiento como un factor relevante para mitigar los efectos de la cavitación y prolongar la vida útil del equipo. Este enfoque se desarrolla mediante la sistematización y comparación de indicadores técnicos reportados en estudios previos, tales como vibraciones, condiciones de presión y regímenes de operación, sin realizar mediciones experimentales directas.

### 3.7 Importancia de un enfoque integral en la prevención de la cavitación

La cavitación no debe abordarse únicamente como un problema técnico aislado, sino como un fenómeno que impacta directamente la eficiencia operativa, los costos de mantenimiento y la confiabilidad de los procesos industriales. Adoptar un enfoque integral que articule diseño hidráulico adecuado, monitoreo continuo y mantenimiento planificado permite reducir significativamente la probabilidad de cavitación y mejorar la seguridad y sostenibilidad de la operación.

# 4. Análisis bibliométrico

## 4.1 Información principal

Con el propósito de caracterizar el estado actual del conocimiento en torno a la cavitación en bombas centrífugas y sus estrategias de mitigación desde el mantenimiento, se realizó un análisis bibliométrico utilizando el paquete bibliometrix del software RStudio, aplicado sobre el corpus documental recuperado de las bases de datos Scopus y ScienceDirect. El período de análisis abarcó los años 2010 a 2026, permitiendo capturar tanto la producción científica consolidada como las tendencias más recientes en el área de estudio. Durante este intervalo se identificaron 91 documentos distribuidos en 74 fuentes distintas, entre las que se incluyen revistas especializadas en ingeniería mecánica, mantenimiento industrial y dinámica de fluidos (ver Figura 1).

**Figura 1.**

*Información principal.*




Uno de los hallazgos más relevantes del análisis corresponde a la tasa de crecimiento anual de la producción científica, la cual arrojó un valor negativo de −6,64 %. Este resultado indica que,

lejos de experimentar un crecimiento sostenido, la generación de literatura científica sobre el tema ha mostrado una tendencia decreciente durante el período analizado.

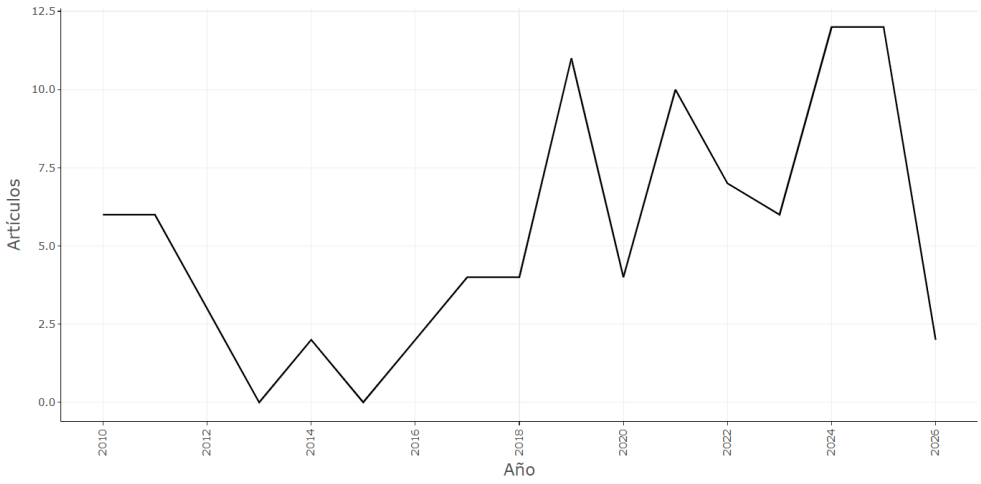
En conjunto, los indicadores bibliométricos obtenidos permiten trazar un panorama claro y objetivo del estado del arte en materia de cavitación en bombas centrífugas desde el enfoque del mantenimiento. Se trata de un campo con una producción científica moderada y en tendencia decreciente, caracterizado por la baja colaboración entre investigadores, una alta dispersión temática y la ausencia de redes de coautoría internacional consolidadas. No obstante, los documentos existentes muestran un impacto relativo considerable y se sostienen sobre una base bibliográfica reciente y vigente. Estos resultados constituyen una base objetiva y cuantificable para justificar el presente trabajo de investigación.

### 4.2 Producción científica anual

Los resultados de la producción científica anual (ver Figura 2), revelan un comportamiento dinámico y heterogéneo a lo largo de los dieciséis años analizados (2010-2026), con fases claramente diferenciables que dan cuenta de la irregularidad con la que la comunidad científica ha abordado esta temática. Durante la primera fase del período, comprendida entre 2010 y 2015, se observa una producción inicialmente moderada, seguida de una caída pronunciada en los años 2013 y 2015. Esta contracción temprana puede asociarse a la ausencia de eventos tecnológicos o industriales detonadores de investigación en esa época, así como a la limitada consolidación de líneas de trabajo continuas en el área. La recuperación parcial observada en 2014 y 2016, sugiere el inicio de un interés renovado, aunque todavía incipiente y sin continuidad sostenida.

**Figura 2.**

*Producción científica anual.*




La segunda fase, que abarca el período 2017–2021, constituye la etapa de mayor dinamismo dentro del corpus analizado. En 2019 se registró el primer pico significativo. Este incremento coincide con el crecimiento global de la investigación en mantenimiento predictivo y monitoreo de condición, impulsado en parte por el auge de las tecnologías de la Industria 4.0 y su aplicación en sistemas de bombeo. No obstante, la producción descendió nuevamente en 2020, posiblemente como consecuencia de las disrupciones generadas por la pandemia de COVID-19 en los ciclos de investigación y publicación académica a nivel mundial. La recuperación fue rápida consolidando una tendencia de crecimiento que se extendió hasta 2022 y 2023.

La tercera fase del período analizado, correspondiente a los años 2024 y 2025, marca el punto de mayor producción registrado en toda la serie. Este comportamiento refleja un interés científico creciente y sostenido hacia la problemática de la cavitación, particularmente desde enfoques orientados al diagnóstico, la modelación numérica y las estrategias de mantenimiento

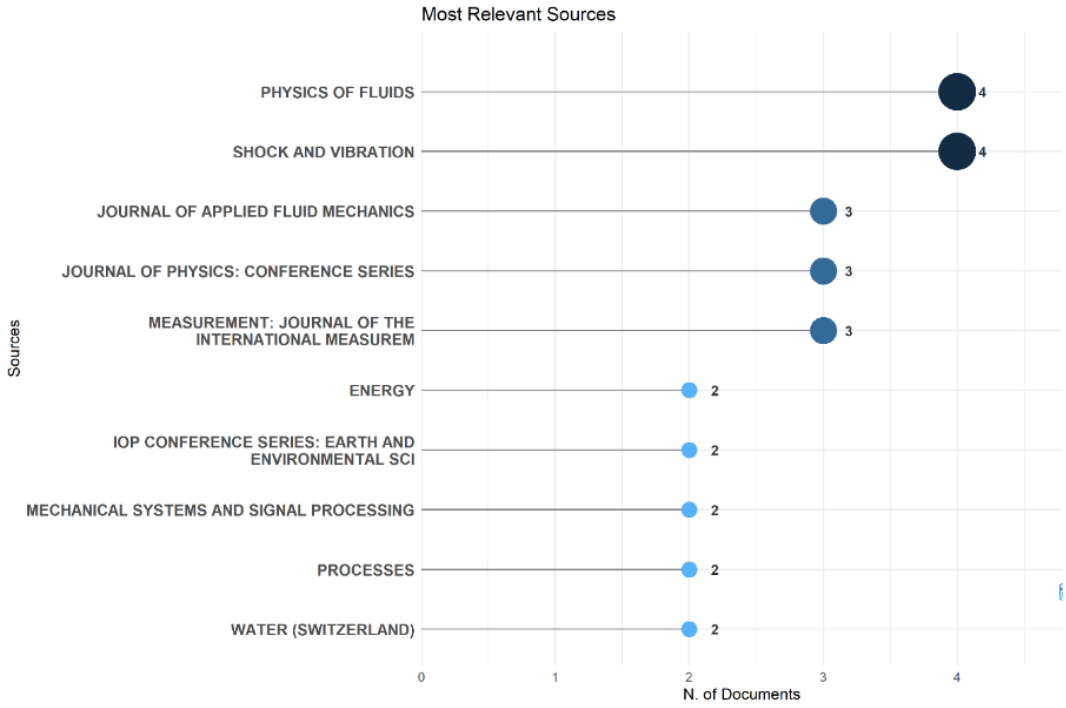
basadas en condición. Desde una perspectiva global, la evolución de la producción anual confirma los hallazgos previamente discutidos en torno a la tasa de crecimiento negativa de −6,64 %.

### 4.3 Fuentes más relevantes

En la Figura 3, se observan dos fuentes con igual número de contribuciones: Physics of Fluids y Shock and Vibration, cada una con 4 documentos. La presencia de Physics of Fluids como fuente líder evidencia que el abordaje de la cavitación desde una perspectiva hidrodinámica y de mecánica de fluidos sigue siendo el enfoque dominante en la literatura indexada, lo cual es coherente con la naturaleza físico-matemática del fenómeno. Por su parte, Shock and Vibration refleja un enfoque complementario centrado en los efectos mecánicos de la cavitación, particularmente en lo relacionado con las vibraciones inducidas en las estructuras de la bomba, aspecto directamente vinculado con las estrategias de monitoreo de condición y diagnóstico de fallas, que constituyen uno de los ejes temáticos de mayor interés para el presente proyecto de investigación.

**Figura 3.**

*Fuentes más relevantes.*



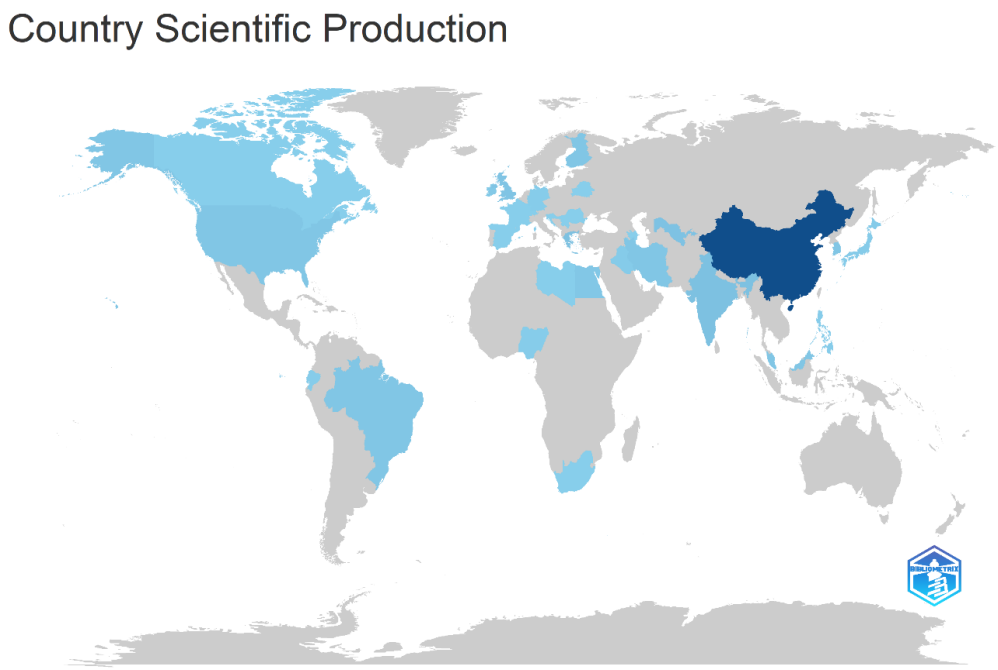

En síntesis, el análisis de las fuentes más relevantes revela que la investigación sobre cavitación en bombas centrífugas se articula principalmente desde tres grandes enfoques disciplinares: la mecánica de fluidos y la hidrodinámica, el monitoreo de condición y el procesamiento de señales, y la instrumentación y la metrología aplicada. Esta convergencia disciplinar, expresada en la diversidad de las fuentes que nutren el corpus, reafirma la necesidad de desarrollar una revisión sistemática integradora que permita articular estos enfoques bajo un marco unificado orientado al mantenimiento industrial, objetivo central del presente trabajo de investigación.

### 4.4 Producción científica de los países

En la producción científica por países, China de Asia se posiciona con claridad como el país de mayor producción científica en el área con 84 artículos (ver Figura 4), siendo el único representado con el tono azul más oscuro en la escala del mapa, lo que indica que concentra el mayor volumen de publicaciones del corpus analizado. Este liderazgo es coherente con la consolidación de China como potencia científica global en ingeniería mecánica, hidráulica y sistemas de manufactura, sectores en los que las bombas centrífugas desempeñan un papel estratégico a nivel industrial. La producción científica china en este campo refleja, además, la fuerte inversión que el país ha realizado en infraestructura hídrica, sistemas de irrigación y plantas de generación de energía, contextos en los que la cavitación representa un problema técnico de primer orden con implicaciones económicas significativas.

**Figura 4.**

*Países destacados por la producción científica de la cavitación en bombas centrífugas.*




Representado con los tonos azul más claros, aparece un conjunto amplio de países con contribuciones menores pero distribuidas en distintas regiones del mundo, incluyendo países del Sudeste Asiático, Europa del Este, Oriente Medio, Sudáfrica y algunos países de América Latina como Colombia y Venezuela. La aparición de esta capa de países con producción emergente es un indicador de que el interés por el fenómeno de la cavitación y sus implicaciones en el mantenimiento industrial está adquiriendo carácter global, aunque de manera incipiente y con una base investigativa aún en consolidación en muchas de estas regiones. Cabe señalar que una proporción importante de los países del mundo, representados en gris en el mapa, no registra producción científica en el corpus analizado, lo que refuerza la idea de que el campo permanece concentrado en un número limitado de sistemas nacionales de investigación.

Desde una perspectiva analítica, la distribución geográfica observada guarda coherencia directa con los indicadores de coautoría internacional previamente discutidos. La coautoría internacional del 15,38 % registrada en el corpus implica que, a pesar de la participación de múltiples países en la producción del campo, las colaboraciones transfronterizas son limitadas y los flujos de conocimiento entre regiones no se han institucionalizado mediante redes de investigación conjunta. Este escenario sugiere que los grupos de investigación de cada país trabajan de manera predominantemente independiente, abordando el problema de la cavitación desde sus propios contextos industriales y tecnológicos, sin una articulación internacional sistemática que permita integrar perspectivas complementarias y acelerar el avance del conocimiento en el área.

### 4.5 Palabras más frecuentes

En la Figura 5, se evidencia que las 5 palabras más relevantes que se encontraron en los artículos científicos analizados son, cavitación, bombas centrifugas, impulsores, análisis de vibraciones y detección de cavitación.

**Figura 5.**

*Palabras más relevantes.*




En el nivel de mayor prominencia visual, coherentemente con los resultados cuantitativos ya discutidos, se encuentran bombas centrifugas y cavitación, cuyos tamaños tipográficos dominan el núcleo de la nube y confirman su posición como términos estructurantes del corpus. Estos dos conceptos definen el objeto de estudio central de la literatura analizada y actúan como nodos de articulación en torno a los cuales se organizan los demás enfoques temáticos identificados. Su predominancia visual refuerza la conclusión de que el corpus posee una identidad temática clara y delimitada.

Además, expone un conjunto de términos de tamaño intermedio que dan cuenta de los enfoques metodológicos y los componentes técnicos más frecuentemente abordados en la literatura. Entre ellos destacan impulsores, análisis de vibraciones y detección de cavitación, todos previamente identificados en el análisis de frecuencias. Su posición central en la nube, adyacente al núcleo principal, refuerza la interpretación de que estas dimensiones no son periféricas ni

ocasionales, sino que representan líneas de investigación consolidadas y recurrentes dentro del campo, articuladas directamente con el fenómeno central de estudio.

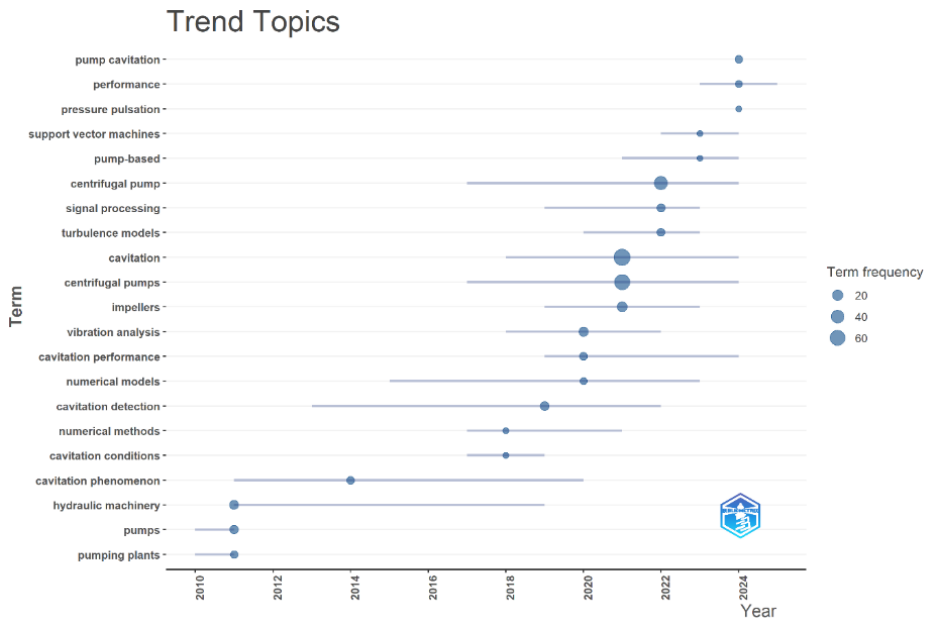
Esta arquitectura conceptual valida la pertinencia del presente proyecto de investigación, que busca precisamente operar en la intersección de estas tres dimensiones, proponiendo una síntesis sistemática que oriente la toma de decisiones en mantenimiento industrial basada en el estado del conocimiento científico disponible sobre cavitación en bombas centrífugas.

## 4.6 Tendencia de los temas

Los temas más importantes vistos en los artículos son cavitación y bombas centrifugas entre el año 2017 y 2024 como se puede ver en la Figura 6, ganando relevancia en los años más recientes.

**Figura 6.**

*Tendencia de los temas.*



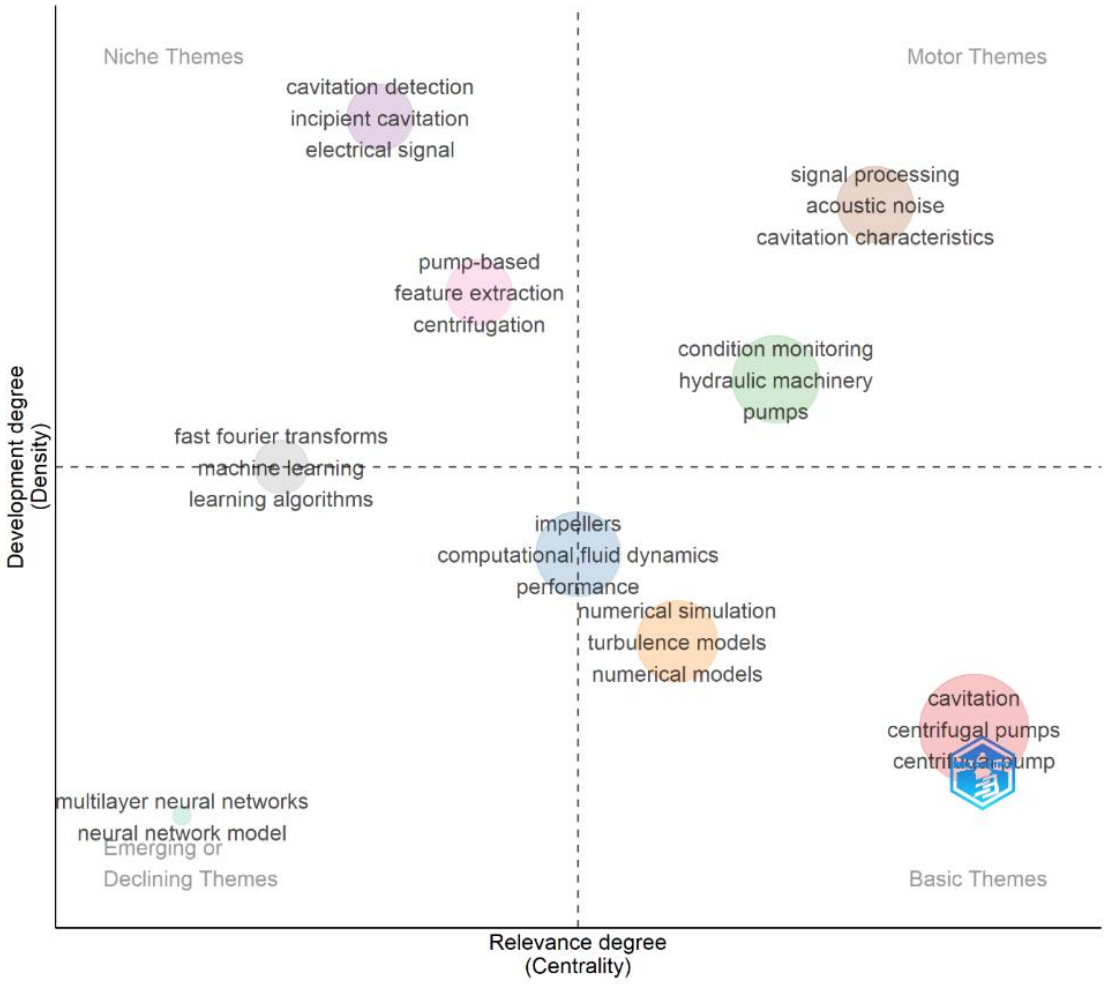
Desde una perspectiva integradora, el análisis de tendencias temáticas ofrece una lectura diacrónica del campo que complementa y enriquece todos los análisis bibliométricos previos. La trayectoria evolutiva identificada muestra un campo que ha transitado desde el estudio general de la maquinaria hidráulica hacia la caracterización específica del fenómeno cavitatorio, y que actualmente avanza hacia la integración de técnicas computacionales avanzadas, procesamiento de señales y aprendizaje automático para su detección y gestión en tiempo real. Este tránsito es coherente con las tendencias globales del mantenimiento industrial hacia paradigmas predictivos y basados en datos, y sitúa al presente proyecto en un momento de alta pertinencia académica y técnica.

## 4.7 Evolución temática

La evolución temática se analizó en un lapso del 1 de enero de 2010 al 1 de enero de 2026. En la Figura 7 se observa un mapa temático de palabras claves asociadas y determinadas en cuadrantes del plano cartesiano que permite categorizar cada temática en uno de cuatro tipos estratégicos: temas motores o impulsores (motor themes), temas avanzados y aislados (niche themes), temas emergentes o en declive ( emerging or declining themes) y temas básicos y transversales (basic themes), cada uno con implicaciones específicas para la comprensión del estado del arte y la orientación de la investigación futura ( López Rodríguez y Neme Chaves, 2023).

**Figura 7.**

*Evolución temática.*




En el cuadrante superior derecho, denominado Motor Themes o temas motores, se ubican las temáticas que presentan simultáneamente alta centralidad y alta densidad, lo que indica que son líneas de investigación bien desarrolladas internamente y con amplia conexión con el resto del campo, actuando como motores del avance científico en el área. En este cuadrante se identifican dos clústeres diferenciados. El primero agrupa los términos signal processing, acoustic noise y cavitation characteristics, configurando una línea de investigación consolidada en torno a la caracterización acústica de la cavitación y el procesamiento de las señales de ruido generadas por

el colapso de burbujas. La presencia de acoustic noise como tema motor es particularmente relevante, dado que la emisión acústica es uno de los indicadores más directos y no invasivos del fenómeno cavitatorio, y su procesamiento mediante técnicas espectrales representa una de las estrategias de detección más prometedoras en contextos industriales. El segundo clúster motor agrupa condition monitoring, hydraulic machinery y pumps, confirmando que el monitoreo de condición en maquinaria hidráulica es una línea temática madura, internamente cohesionada y con alta relevancia transversal dentro del campo. Este hallazgo es de especial importancia para el presente proyecto, dado que valida el monitoreo de condición como el enfoque de mantenimiento con mayor centralidad y desarrollo relativo en la literatura sobre cavitación.

En el cuadrante superior izquierdo, correspondiente a los Niche Themes o temas nicho, se ubican las temáticas con alta densidad interna pero baja centralidad, es decir, líneas de investigación bien desarrolladas, pero con escasa conexión con el núcleo principal del campo, lo que les confiere un carácter especializado y relativamente autónomo. En este cuadrante se identifican dos agrupaciones. La primera, conformada por cavitation detection, incipient cavitation y electrical signal, representa una línea especializada en la detección temprana de la cavitación a través de señales eléctricas, un enfoque menos convencional que los métodos vibroacústicos pero con alto potencial para la implementación en sistemas de monitoreo embebidos en los propios accionamientos eléctricos de las bombas. La segunda agrupación de nicho incluye pump-based, feature extraction y centrifugation, términos que apuntan hacia el desarrollo de métodos de extracción de características específicas para sistemas de bombeo, posiblemente vinculados a técnicas de procesamiento avanzado de señales para la identificación de patrones asociados a la cavitación. La naturaleza nicho de estas dos líneas indica que, aunque están bien desarrolladas en

sus propios marcos conceptuales, no han logrado aún integrarse plenamente con las líneas dominantes del campo, representando oportunidades de articulación para investigaciones futuras.

En el cuadrante inferior izquierdo, denominado Emerging or Declining Themes, se ubican las temáticas con baja centralidad y baja densidad, que pueden corresponder a líneas de investigación en etapas muy tempranas de desarrollo o, alternativamente, a enfoques que están perdiendo relevancia dentro del campo. En este cuadrante aparecen multilayer neural networks y neural network model, junto con fast fourier transforms, machine learning y learning algorithms, este último grupo ubicado en el límite entre los cuadrantes izquierdos. La presencia de las redes neuronales multicapa y los modelos de aprendizaje automático en esta categoría resulta aparentemente contradictoria con su identificación como término emergente en el análisis de tendencias de la sección anterior; sin embargo, esta aparente contradicción se resuelve al considerar que, aunque su frecuencia de aparición ha aumentado recientemente, su nivel de integración con el núcleo del campo y su cohesión interna como línea temática aún son insuficientes para clasificarlos como motores o temas nicho maduros. Esto indica que el aprendizaje profundo aplicado a la cavitación es una línea en formación activa, con alto potencial de crecimiento, pero aún en proceso de consolidación conceptual y metodológica dentro de la comunidad científica del área.

En la zona central del mapa, próxima a los ejes de división, pero sin una ubicación claramente dominante en ningún cuadrante, se encuentran varios términos de alto interés que ocupan posiciones de transición entre categorías estratégicas. Impellers, computational fluid dynamics, performance, numerical simulation, turbulence models y numerical models se sitúan en torno al centro del mapa con centralidad moderada y densidad baja o media, lo que los configura como temas en proceso de consolidación cuya posición estratégica puede evolucionar en los

próximos años dependiendo del volumen y la dirección de nuevas publicaciones. La presencia de computational fluid dynamics en esta zona intermedia sugiere que la simulación numérica, si bien es una herramienta metodológica ampliamente utilizada, no ha alcanzado aún la cohesión interna suficiente para constituirse en una línea motora, posiblemente porque se aplica de manera dispersa a distintos aspectos del fenómeno sin un enfoque convergente dominante.

En el cuadrante inferior derecho se sitúan los Basic Themes o temas básicos y transversales, que presentan alta centralidad, pero baja densidad interna. Estos son los conceptos fundacionales del campo, ampliamente referenciados y conectados con la mayoría de las demás temáticas, pero sin un desarrollo interno suficientemente cohesionado como para constituir líneas especializadas. En este cuadrante se ubica el clúster conformado por cavitation, centrifugal pumps y centrifugal pump, los tres términos más frecuentes del corpus. Su posición en los temas básicos confirma lo que el análisis de frecuencias ya había sugerido: estos conceptos son el sustrato definitorio e ineludible de toda la producción científica del campo, el vocabulario sin el cual ningún documento puede ser clasificado en el corpus, pero que por su misma universalidad carecen de una cohesión interna diferenciadora. Esta condición de tema básico no implica obsolescencia, sino que estos conceptos actúan como la base común sobre la cual se articulan todas las demás líneas de investigación, incluyendo las temáticas motoras y de nicho identificadas en los cuadrantes superiores.

Desde una perspectiva integradora y estratégica, el mapa temático ofrece la síntesis más completa y estructurada del estado del conocimiento sobre cavitación en bombas centrífugas obtenida a lo largo de todo el análisis bibliométrico. Sus conclusiones son convergentes con todos los hallazgos previos y permiten formular con precisión las implicaciones para el presente proyecto de investigación. El campo cuenta con una base sólida de temas básicos (cavitation, centrifugal

pumps), líneas motoras consolidadas en torno al monitoreo de condición y el procesamiento acústico de señales, subcampos de nicho especializados en detección temprana y extracción de características, y un conjunto de temáticas emergentes en inteligencia artificial y aprendizaje automático que representan el horizonte más dinámico de la investigación futura. Este panorama confirma que la intersección entre la detección instrumental de la cavitación, el monitoreo de condición y las técnicas computacionales avanzadas constituye el espacio de mayor pertinencia y proyección para el desarrollo de nuevas contribuciones científicas, posicionando al presente trabajo en el cruce estratégico de las líneas de mayor vitalidad y relevancia del campo.

### 4.8 Visión general del corpus bibliométrico

El historial de búsqueda realizado en la base de datos Scopus arrojó un total de 91 documentos relacionados con el fenómeno de cavitación en bombas centrífugas. El conjunto incluye artículos de investigación originales, artículos de revisión, actas de conferencias y un libro técnico de referencia. La distribución temporal abarca publicaciones desde el año 2010 hasta 2026, con una marcada aceleración en la producción científica a partir de 2019, período en el que se concentra aproximadamente el 57% de los registros. Los años 2024 y 2025 presentan el mayor número de publicaciones (12 documentos cada uno), lo que refleja el creciente interés de la comunidad científica en el diagnóstico, monitoreo y control de la cavitación mediante técnicas avanzadas de procesamiento de señales e inteligencia artificial.

## 4.9 Estudios más relevantes

A continuación, se presenta un análisis crítico de los estudios con mayor impacto del corpus, identificados por su número de citaciones, la novedad metodológica de sus aportes y su pertinencia directa con el objetivo de la monografía.

### *4.9.1 Obra de referencia*

Centrifugal Pumps (2nd ed.) — 295 citas (Gülich, 2010). Esta obra constituye la referencia teórica de mayor autoridad en el campo. Su alcance abarca los mecanismos de formación y colapso de burbujas de vapor, la relación entre el NPSH (Net Positive Suction Head) requerido y disponible, las curvas características de rendimiento bajo condiciones cavitantes, y las consecuencias sobre la erosión de materiales y la vida útil del equipo. Prácticamente la totalidad de los artículos del corpus la citan como fundamento teórico, lo que la convierte en el punto de partida indispensable para comprender el fenómeno en su integralidad.

### *4.9.2 Diagnostico y detección de cavitación*

(Panda et al., 2018a) — 142 citas. Este estudio implementó algoritmos de Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) sobre señales de vibración adquiridas en un banco de pruebas con variación de velocidad de giro. Los autores lograron clasificar con más del 95% de precisión dos tipos de falla interrelacionados: el bloqueo de flujo en la tubería de aspiración y la cavitación incipiente. Su principal contribución es demostrar que el aprendizaje automático puede superar los

métodos estadísticos tradicionales en contextos de operación variable, abriendo la puerta al diagnóstico inteligente de bombas en condiciones industriales reales.

(Mousmoulis et al., 2019a) – 114 citas. Mediante una comparación sistemática entre emisión acústica, análisis de vibraciones y visualización directa del flujo en tres geometrías de rodete distintas, este trabajo demostró que la emisión acústica detecta la cavitación en su etapa de inicio antes que cualquier indicador basado en la caída de presión. Los resultados cuantitativos mostraron que la señal de emisión acústica presenta cambios estadísticamente significativos cuando la caída de cabeza aún es inferior al 1%, lo que posiciona esta técnica como la más sensible para la detección temprana.

(Al-Obaidi & Towsyfyan, 2019a) — 54 citas. Desarrollaron un enfoque de procesamiento de señales basado en el análisis espectral de envolvente aplicado a vibraciones de la carcasa de la bomba. El método permite identificar la cavitación incipiente mediante la energía de las bandas de alta frecuencia asociadas al impacto de colapso de burbujas. Su banco de pruebas incluyó variación sistemática del NPSH disponible y del caudal, demostrando que la envolvente espectral tiene mayor sensibilidad que el espectro FFT convencional, particularmente en las etapas iniciales del proceso cavitante.

(Mousmoulis et al., 2021) — 46 citas. Aplicaron la herramienta de Kurtosis Espectral a señales de vibración provenientes de dos rodetes semiabiertos diferentes. La Kurtosis Espectral permite localizar la banda de frecuencia donde se concentran las ondas de choque impulsivas generadas durante el colapso de burbujas, superando las limitaciones de los métodos de banda fija. Los resultados indicaron que esta técnica detecta cavitación incipiente con alta sensibilidad incluso cuando los indicadores globales de energía no presentan variaciones significativas, lo que la convierte en una herramienta robusta para el monitoreo de condición.

(Stopa et al., 2014) — 63 citas. Propusieron el Análisis de Firma de Torque de Carga (LTSA) como método de detección no intrusivo que utiliza exclusivamente señales eléctricas del motor para estimar el torque desarrollado por la bomba. A partir del espectro de frecuencias del torque estimado, identificaron componentes espectrales específicas asociadas a la presencia de cavitación. La ventaja fundamental de este enfoque es que no requiere instrumentación adicional sobre la bomba ni el fluido, siendo aplicable a instalaciones existentes sin modificación.

(Černetič & Čudina, 2011) — 44 citas. Estudiaron la incertidumbre de medición asociada al uso de señales de ruido y vibración en el rango audible para detectar cavitación. Sus resultados mostraron que, aunque las señales acústicas presentan buena correlación con el grado de cavitación, la incertidumbre de medición puede ser significativa si no se controlan adecuadamente las condiciones de ensayo. Este trabajo aporta un marco metrológico riguroso que complementa los estudios puramente fenomenológicos y es fundamental para validar metodologías experimentales.

(Dong et al., 2019) — 43 citas. Presentaron una metodología experimental para detectar el inicio de la cavitación en una bomba de velocidad específica media (ns=117) mediante diagnóstico de ruido transportado por el fluido. Con mediciones sincronizadas de rendimiento hidráulico, distribución visual de burbujas, vibración y ruido, establecieron una correlación directa entre la evolución del nivel de ruido total en la banda de 10-20 kHz y el inicio del colapso de burbujas, proponiendo este indicador como criterio diagnóstico práctico.

### *4.9.3 Caracterización del comportamiento bajo cavitación*

(Jia et al., 2023) — 78 citas. Este estudio, uno de los más citados de la última generación, demostró mediante simulación numérica y ensayos experimentales que los cambios en el flujo interno de la bomba (patrones de flujo desordenados, pérdidas adicionales en el rodete) ocurren cuando la caída de cabeza es inferior al 2%, es decir, antes de que se alcance el criterio convencional del 3% establecido por las normas internacionales. Los autores proponen indicadores basados en el campo de velocidades interno como señales de alerta más tempranas que los indicadores de presión externa, lo cual tiene implicaciones directas en el diseño de sistemas de protección.

(Li et al., 2018a) — 71 citas. Mediante análisis tiempo-frecuencia de señales de vibración adquiridas durante la reducción controlada del NPSH disponible a caudal nominal, caracterizaron la inestabilidad de la cavitación. Sus resultados muestran que la cavitación inestable se manifiesta como oscilaciones de baja frecuencia en la amplitud de vibración antes de que se produzca la caída de rendimiento hidráulico, estableciendo una relación causal entre el NPSH disponible y el espectro vibracional que puede utilizarse como criterio predictivo.

### *4.9.4 Control y supresión de la cavitación*

(Zaresharif et al., 2021) — 67 citas. Esta revisión sistemática analiza en profundidad las técnicas de control pasivo de flujo aplicadas a la mitigación de cavitación, con especial énfasis en los generadores de vórtice. Los autores clasifican los mecanismos de actuación física de cada técnica (modificación de la capa límite, generación de turbulencia local, redistribución del perfil

de presiones) y evalúan su efectividad mediante comparación cuantitativa de los coeficientes de cavitación obtenidos en diferentes estudios. Esta obra representa el estado del arte en estrategias de supresión pasiva y constituye un referente metodológico para el diseño de soluciones industriales.

(Dehghan et al., 2024a) — 42 citas. Propusieron un nuevo criterio de inicio de cavitación basado en la caída del 3% en la eficiencia de la bomba (NPSHr,η) en lugar de la caída convencional del 3% en la cabeza manométrica. Mediante estudios experimentales y numéricos extensos, demostraron que el criterio de eficiencia es más conservador y energéticamente relevante, ya que identifica el inicio de la degradación del rendimiento antes que el criterio de cabeza. Este hallazgo tiene implicaciones normativas importantes para el diseño de sistemas de bombeo eficientes.

### *4.9.5 Contribución al objetivo de la monografía*

En la tabla 1. Se observan los estudios más recientes del corpus revelando un desplazamiento del enfoque investigativo desde la mera detección hacia la predicción, optimización y control inteligente de la cavitación.

**Tabla 1.**

*Estudios de mayor relevancia.*

| Autores (Año) | Año | Enfoque | Contribución al objetivo de la monografía |
|---|---|---|---|
| **Wang et al. (2025)** | 2025 | Optimización con red neuronal BP | Diseño optimizado de rodetes mediante muestreo hipercúbico latino y algoritmo genético; reducción del riesgo cavitacional desde la etapa de diseño. |
| **Karagiovanidis et al. (2023)** | 2023 | Detección con sensores de bajo costo | Valida la detección temprana de cavitación con acelerómetros de smartphone, lo que democratiza el monitoreo en bombas de riego. |
| **Han et al. (2025)** | 2025 | Análisis de corriente y voltaje del motor | Monitoreo no intrusivo mediante firmas de corriente mejoradas con análisis de voltaje; supera limitaciones del MCSA clásico. |
| **Zhu et al. (2024)** | 2024 | Identificación y supresión del estado cavitacional | Revisión de métodos combinados de identificación y supresión; consolida el estado del arte en estrategias de control activo y pasivo. |
| **Wang et al. (2024)** | 2024 | Excitación de fluido interno bajo cavitación | Cuantificó las fuerzas de excitación hidráulica en función del grado de cavitación mediante simulación y ensayos, enriqueciendo la comprensión del daño estructural. |

*Nota*:(Han et al., 2025a; Karagiovanidis et al., 2023a; Wang et al., 2024, 2025a; Zhu et al., 2024).

Destaca la consolidación de métodos basados en inteligencia artificial y aprendizaje profundo como principales herramientas de análisis. Wang et al. (2025) combinan redes neuronales BP con algoritmos genéticos para optimizar el diseño del rodete desde la fase de proyecto, reduciendo la susceptibilidad a la cavitación sin prueba y error experimental.

(Karagiovanidis et al., 2023b) abren una línea de gran pertinencia práctica al demostrar la factibilidad del monitoreo con sensores de bajo costo (acelerómetros de smartphone), lo que democratiza el acceso al diagnóstico en instalaciones de pequeña y mediana escala.

El objetivo de la presente monografía es analizar el fenómeno de cavitación en bombas centrífugas desde sus fundamentos físicos hasta las estrategias disponibles para su detección, diagnóstico y control, con miras a establecer criterios técnicos aplicables en contextos industriales. La revisión bibliométrica realizada permite identificar con claridad cómo los estudios del corpus contribuyen a este propósito en cuatro dimensiones complementarias:

a) Comprensión del fenómeno: La obra de (Gülich, 2010), junto con los estudios de (Jia et al., 2023) y (Li et al., 2018b), establecen el fundamento físico del proceso cavitante, desde la nucleación de burbujas hasta su colapso violento, incluyendo los efectos sobre la curva característica, el NPSH y el rendimiento energético. Estos trabajos permiten caracterizar con rigor los distintos grados de cavitación y su progresión.

b) Metodologías de detección temprana: Los aportes de (Mousmoulis et al., 2019b), (Panda et al., 2018b), (Al-Obaidi & Towsyfyan, 2019b), y (Mousmoulis et al., 2021) demuestran que tanto la emisión acústica como el análisis espectral avanzado de vibraciones (Kurtosis Espectral, análisis de envolvente) son capaces de identificar la cavitación en su etapa incipiente, mucho antes de que se produzcan daños estructurales o pérdidas de rendimiento medibles. Estos hallazgos son directamente aplicables al diseño de sistemas de monitoreo de condición en plantas industriales.

c) Enfoques no intrusivos e inteligentes: (Stopa et al., 2014) y (Han et al., 2025b) abren la posibilidad de monitorear la cavitación sin necesidad de instrumentar la bomba o el fluido, utilizando únicamente señales eléctricas del motor accionador. Esta línea resulta especialmente valiosa para instalaciones ya en operación donde la instrumentación adicional representa un costo o una restricción operativa. Por su parte, (Wang et al., 2025b) y (Karagiovanidis et al., 2023b) muestran que la inteligencia artificial y los sensores de bajo costo pueden reducir significativamente la barrera de adopción de estas tecnologías.

d) Estrategias de control y prevención: (Zaresharif et al., 2021) y (Dehghan et al., 2024b) aportan el componente de solución activa y normativa al análisis: el primero mediante una revisión exhaustiva de técnicas pasivas de control de flujo, y el segundo mediante la propuesta de un criterio de diseño más conservador (NPSHr,η) que permite incorporar márgenes de seguridad frente a la cavitación desde la etapa de selección del equipo.

En conjunto, el corpus bibliométrico revisado ofrece una cobertura completa del ciclo técnico de la cavitación: desde la comprensión del fenómeno y su detección temprana, pasando por el diagnóstico inteligente, hasta el control y la prevención. Esta riqueza bibliográfica sustenta con solidez los capítulos subsiguientes de la monografía y garantiza que los criterios técnicos propuestos estén respaldados por evidencia empírica y computacional de alto impacto científico.

# 5. Análisis técnico-comparativos

El presente análisis describe y compara cuatro técnicas END de amplia aplicación industrial: el análisis de vibraciones, la termografía infrarroja, el ultrasonido pasivo y las emisiones acústicas. Para cada una se presentan su principio de funcionamiento, las fallas detectables, su sensibilidad específica al fenómeno de cavitación, los requerimientos operativos y las normas de referencia vigentes. El análisis concluye con un cuadro comparativo multicriterio que facilita la toma de decisiones técnicas en el contexto de la gestión del mantenimiento industrial.

## 5.1 Técnicas de ensayos no destructivos (END) aplicadas al diagnóstico de cavitación

### *5.1.1 Análisis de vibraciones*

#### Principio de funcionamiento

El análisis de vibraciones se fundamenta en la medición y caracterización de las oscilaciones mecánicas generadas por el equipo en operación. Mediante sensores (acelerómetros o transductores de velocidad) instalados sobre la carcasa de los rodamientos, se captura la señal vibratoria, que es transformada al dominio de la frecuencia a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). El espectro resultante permite identificar patrones asociados a fallas específicas.

En el caso de la cavitación, la implosión de las burbujas de vapor genera cargas no uniformes sobre el impulsor y ondas de choque que se manifiestan como un incremento generalizado del nivel vibratorio, particularmente como ruido de banda ancha en un amplio rango

de frecuencias no sincrónicas. También se observa el aumento de la Frecuencia de Paso de Álabes (BPF = número de álabes × RPM) y sus armónicos, indicativos de perturbación hidráulica.

**Normas de referencia**

Los niveles vibratorios aceptables en bombas centrífugas están normados por ISO 10816-3 e ISO 20816-1, que establecen zonas de severidad (A, B, C, D) en términos de velocidad RMS (mm/s). La norma API 610 complementa estos criterios para bombas industriales. La norma ISO 18436-2 regula la certificación del personal analista. Las mediciones deben realizarse en las direcciones horizontal (H), vertical (V) y axial (A) sobre cada cojinete, conforme a las guías de buenas prácticas del sector.

**Fallas detectables**

- Cavitación (incipiente a severa): ruido de banda ancha sub-sincrónico y en BPF
- Desbalanceo: pico dominante a 1× la frecuencia de rotación
- Desalineación: componentes a 2× y 3×
- Fallas en rodamientos: frecuencias características BPFO, BPFI, BSF
- Holgura mecánica: serie de armónicos
- Recirculación interna: BPF y armónicos

**Sensibilidad y limitaciones**

La técnica posee alta sensibilidad para cavitación en etapas moderada a severa. La detección incipiente puede verse comprometida por el ruido de fondo del sistema. Requiere el establecimiento de una línea base (baseline) del equipo en condición normal para comparación tendencial. Su principal ventaja es la capacidad de monitoreo continúo integrado en sistemas SCADA, con alarmas configuradas según los umbrales de la ISO 10816.

### *5.1.2 Termografía infrarroja*

**Principio de funcionamiento**

La termografía infrarroja se basa en la detección de la radiación electromagnética emitida por los cuerpos en función de su temperatura (Ley de Stefan-Boltzmann). Mediante cámaras termográficas de alta resolución, se capturan mapas térmicos del equipo sin contacto físico, identificando zonas de temperatura anómala que evidencian condiciones de falla. Todos los materiales por encima del cero absoluto emiten radiación infrarroja, y a mayor temperatura, mayor es la emisión.

En el contexto de la cavitación, el colapso repetitivo de burbujas genera fricción y esfuerzos localizados que producen un incremento de temperatura en la carcasa y los rodamientos de la bomba. Este diferencial térmico, aunque generalmente modesto en etapas iniciales, se vuelve detectable termográficamente en fases avanzadas del fenómeno.

**Normas de referencia**

La práctica de termografía infrarroja en mantenimiento industrial se rige por las normas ISO 18434-1 (termografía en máquinas rotativas) y ASTM E1934 (guía para inspección termográfica de equipos eléctricos y mecánicos). La certificación de termografistas sigue los niveles de la norma ISO 18436-7.

**Fallas detectables**

- Sobrecalentamiento en rodamientos y sellos mecánicos
- Fricción anormal por lubricación deficiente
- Cavitación severa con gradiente térmico observable
- Sobrecarga en motores y conexiones eléctricas
- Fugas de calor en sistemas de tuberías e intercambiadores

**Sensibilidad y limitaciones**

La termografía presenta sensibilidad media-baja para la detección de cavitación, siendo más efectiva en etapas avanzadas donde el incremento térmico es manifiesto. Su principal limitación es la incapacidad de detectar cavitación incipiente, dado que en fases tempranas los cambios térmicos son mínimos. Las condiciones del entorno (reflectividad de superficies, temperatura ambiente, emisividad del material) pueden afectar la precisión de las lecturas. No

obstante, su carácter no invasivo y la capacidad de inspección rápida de múltiples componentes la hacen una herramienta valiosa para complementar otras técnicas.

### *5.1.3 Ultrasonido pasivo*

#### Principio de funcionamiento

El ultrasonido pasivo consiste en la captación de ondas de alta frecuencia (entre 20 kHz y 100 kHz) generadas por el propio equipo en operación, mediante sensores de contacto o de airborne instalados sobre la carcasa de la bomba. A diferencia del ultrasonido activo (que emite y recibe señales), el ultrasonido pasivo escucha las emisiones del equipo, permitiendo identificar anomalías por la característica frecuencial y amplitud de las ondas captadas.

En presencia de cavitación, la turbulencia anómala generada por el colapso de burbujas produce emisiones ultrasónicas de alta frecuencia, detectables antes de que se manifiesten síntomas térmicos o vibracionales apreciables. Esto confiere a la técnica una ventaja para la detección en etapas incipientes del fenómeno.

#### Normas de referencia

La aplicación del ultrasonido en mantenimiento industrial está regulada por las normas ISO 29821 (monitoreo de condición mediante ultrasonido) e ISO 18434 para su uso complementario con termografía. La certificación de operadores sigue los lineamientos de la norma EN ISO 9712.

**Fallas detectables**

- Cavitación incipiente y turbulencia anómala en bombas
- Fugas de fluido en válvulas, sellos y tuberías
- Fugas de vapor en trampas y juntas
- Fallas en rodamientos en etapas tempranas
- Descargas eléctricas (efecto corona, arcing)

**Sensibilidad y limitaciones**

El ultrasonido pasivo destaca por su alta sensibilidad en la detección de cavitación incipiente, siendo capaz de identificar turbulencia anómala antes de que se genere daño físico visible. Los equipos son portátiles y de uso relativamente sencillo, con bajo costo de implementación respecto a otras técnicas. Su limitación principal radica en la dificultad para discriminar entre la señal de cavitación y otras fuentes de ruido ultrasónico presentes en entornos industriales ruidosos, requiriendo del operador experiencia en interpretación.

### *5.1.4 Emisiones Acústicas (EA)*

**Principio de funcionamiento**

Las emisiones acústicas son ondas elásticas transitorias generadas por una liberación rápida de energía desde una fuente localizada dentro del material, propagándose a través del cuerpo sólido

de la bomba. Se detectan mediante transductores piezoeléctricos instalados directamente sobre la carcasa, en puntos estratégicos determinados experimentalmente. La señal capturada se procesa en el dominio del tiempo mediante indicadores estadísticos como el valor RMS (Root Mean Square) y en el dominio frecuencial mediante la Transformada Discreta Wavelet (TDW).

Estudios publicados en la literatura científica, entre ellos el de Quiroga, Oviedo y García (2012) publicado en el Boletín de Ingeniería de la Universidad de Tarapacá (SciELO), demostraron experimentalmente que los indicadores RMS de la señal de emisiones acústicas y los coeficientes de la TDW con onda madre db6 permiten detectar y cuantificar los niveles de severidad de la cavitación — incipiente, moderada y severa — mediante el cociente de severidad Rc. Los resultados validaron esta metodología en condiciones de bombeo variables.

**Normas de referencia**

Las emisiones acústicas en ensayos no destructivos industriales siguen las normas ASTM E1316 (terminología), ASTM E650 (guías para sensores), EN ISO 9712 (certificación de personal) y normas sectoriales de TÜV SÜD para equipos a presión. La clasificación y alcance normativo incluye pruebas estáticas y rotativas según la familia de normas para EA.

**Fallas detectables**

- Cavitación incipiente, moderada y severa (con cuantificación de severidad)
- Agrietamiento progresivo en impulsores y carcasa
- Erosión por impacto de burbujas sobre superficies metálicas

- Deformación y esfuerzos internos en materiales bajo carga cíclica
- Corrosión activa en paredes internas

**Sensibilidad y limitaciones**

Las emisiones acústicas ofrecen la mayor sensibilidad entre las técnicas analizadas para la detección temprana de cavitación, con capacidad de identificar el fenómeno desde su etapa incipiente y cuantificar su severidad. La principal limitación es su elevado costo de implementación, que incluye transductores piezoeléctricos de alta precisión, acondicionadores de señal, sistemas de adquisición de datos y software especializado. Adicionalmente, la técnica es sensible al ruido eléctrico del entorno y requiere la selección cuidadosa de los puntos de montaje del sensor para maximizar la transmisión acústica.

## 5.2 Cuadro Comparativo de Técnicas END

A continuación, se presenta el análisis comparativo multicriterio de las cuatro técnicas END evaluadas, considerando los criterios técnicos, económicos y operativos relevantes para la selección en el contexto de la gerencia de mantenimiento:

**Tabla 2.**

*Cuadro comparativo de técnicas END.*

| Criterio | Análisis de Vibraciones | Termografía Infrarroja | Ultrasonido Pasivo | Emisiones Acústicas |
|---|---|---|---|---|
| **Principio físico** | Ondas mecánicas — FFT / espectro de frecuencias | Radiación infrarroja — mapa térmico sin contacto | Ondas de alta frecuencia (20 kHz–100 kHz) captadas superficialmente | Ondas elásticas transitorias generadas por liberación de energía |
| **Fallas detectables** | Cavitación, desbalanceo, desalineación, fallas en rodamientos, holgura mecánica | Sobrecalentamiento en rodamientos, fricción anormal, fuga de calor por cavitación severa | Cavitación incipiente, turbulencia, fugas de fluido y vapor, desgaste de sellos | Cavitación incipiente y severa, agrietamiento, erosión, deformación material |
| **Sensibilidad a cavitación** | Alta en etapas moderada/severa; detectable por ruido de banda ancha sub-sincrónico e incremento en BPF | Media-baja; solo detecta etapas avanzadas con cambios térmicos evidentes | Alta en etapa incipiente; identifica turbulencia anómala antes de daño físico | Muy alta; distingue cavitación incipiente, moderada y severa mediante indicadores RMS |
| **Etapa de detección** | Moderada a severa | Severa (síntomas térmicos evidentes) | Incipiente a moderada | Incipiente a severa |
| **Normas de referencia** | ISO 10816-3, ISO 20816-1, API 610 | ISO 18434-1, ASTM E1934 | ISO 29821, ISO 18434 | EN ISO 9712, ASTM E1316, normas ASTM EA |
| **Costo de implementación** | Medio–Alto (analizador FFT + software + sensores permanentes) | Medio (cámara termográfica; alta inversión inicial, pero bajo costo operativo) | Bajo–Medio (equipo portátil accesible, sin instalación fija) | Alto (transductores piezoeléctricos, acondicionadores de señal, software especializado) |
| **Facilidad de uso** | Requiere analista certificado nivel II–III en vibraciones (ISO 18436-2) | Requiere termografista certificado; interpretación relativa más simple | Técnico con entrenamiento básico; equipo portátil de uso intuitivo | Alta especialización; procesamiento de señal (Wavelet, RMS) complejo |
| **Aplicación en campo** | Continua y periódica; ideal para monitoreo en línea con sistemas SCADA | Periódica (inspecciones programadas); no apta para monitoreo continuo estándar | Periódica y continua; muy versátil en distintos ambientes industriales | Continua; requiere instalación de sensores en puntos estratégicos del cuerpo de bomba |
| **Capacidad de cuantificación** | Alta; permite cuantificar severidad por niveles de amplitud y espectros comparativos | Media; cuantifica diferencial térmico, pero no directamente el nivel de cavitación | Media; identifica presencia y tendencia, pero con menor resolución cuantitativa | Alta; indica nivel de severidad (leve, moderada, crítica) mediante cociente Rc |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Limitaciones principales** | Ruido de fondo puede enmascarar señales; requiere línea base establecida | No detecta cavitación incipiente; condiciones de entorno afectan lecturas | Dificultad para discriminar entre cavitación y otras fuentes de ruido ultrasónico | Costo elevado; sensible a ruido eléctrico; requiere acoplante y puntos óptimos de montaje |
| **Requerimientos operativos** | Bomba en operación normal; puntos de medición en carcasa de rodamientos (H, V, A) | Equipo en operación; visibilidad directa sin obstrucciones térmicas | Acceso físico a cuerpo de bomba; sin necesidad de parar el equipo | Sensor piezoeléctrico fijo en carcasa; ensayos estáticos y rotativos posibles |

*Nota*: (API STANDARD 610, 2021; *ISO 10816-3*, s. f.; *ISO 18434-1*, s. f.; *ISO 29821-1*, s. f.; Quiroga M. et al., 2012b; Tecnología para la Industria, 2019; TRACTIAN, 2024; TÜV SÜD, 2023).

El análisis comparativo evidencia que ninguna técnica END es suficiente por sí sola para una caracterización completa del fenómeno de cavitación en todas sus etapas. Cada método posee fortalezas que complementan las limitaciones de los demás, lo que justifica técnicamente la implementación de estrategias de diagnóstico integrado o complementario.

### Detección Incipiente vs. Detección en Etapas Avanzadas

Las emisiones acústicas y el ultrasonido pasivo destacan como las técnicas más sensibles para la detección en etapas incipientes, gracias a su capacidad de captar manifestaciones físicas — ondas elásticas y turbulencia ultrasónica — previas al daño estructural observable. En contraste, el análisis de vibraciones y la termografía resultan más efectivos para etapas moderadas a severas, cuando las amplitudes vibracionales y los gradientes térmicos son suficientemente pronunciados para ser registrados con claridad por los instrumentos.

### Relación Costo–Beneficio

Desde la perspectiva de la gerencia de mantenimiento, el ultrasonido pasivo ofrece la mejor relación costo–beneficio para una primera implementación de monitoreo predictivo en entornos industriales con recursos limitados: costo de equipamiento moderado, uso portátil sin instalación permanente y sensibilidad alta para detección temprana. El análisis de vibraciones, aunque de costo medio-alto, justifica su inversión mediante la integración en sistemas de monitoreo continuo que permiten gestión en tiempo real.

Las emisiones acústicas, con el mayor potencial diagnóstico, requieren la inversión más significativa en equipamiento e infraestructura, aconsejándose su aplicación en instalaciones críticas donde el costo de una parada no planificada supera ampliamente el costo del sistema de monitoreo. La termografía, por su parte, es de alto valor para inspecciones periódicas masivas de múltiples equipos en un solo recorrido.

### Aplicabilidad en Distintos Entornos Industriales

El análisis de vibraciones y el ultrasonido pasivo presentan la mayor versatilidad de aplicación en distintos contextos industriales (petroquímica, minería, generación eléctrica, agua y saneamiento), siendo técnicas estándar en programas de mantenimiento predictivo a nivel global. La termografía resulta especialmente valiosa en plantas donde múltiples equipos deben inspeccionarse en ventanas de tiempo reducidas. Las emisiones acústicas son preferidas en entornos de alta criticidad donde la cuantificación del nivel de severidad es determinante para la toma de decisiones.

**Integración con Normas y Estándares**

La adopción de normas internacionales como ISO 10816, API 610, ISO 18434 e ISO 29821 no solo proporciona criterios técnicos objetivos para la interpretación de resultados, sino que además otorga validez metodológica y trazabilidad a los diagnósticos. En el marco de la gerencia de mantenimiento, el apego normativo es un requisito para la gestión de activos según los principios de la norma ISO 55001.

## 5.3 Metodologías de simulación y gemelos digitales para el diagnóstico de cavitación en bombas centrífugas

### *5.3.1 Simulación por dinámica de fluidos computacional (CFD)*

La simulación CFD es una metodología numérica que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible o compresible en dominios geométricos discretizados mediante mallas estructuradas o no estructuradas. Su aplicación al diagnóstico de cavitación se fundamenta en la incorporación de modelos de transporte de vapor, siendo los más utilizados el modelo de Rayleigh-Plesset simplificado implementado en los códigos comerciales ANSYS Fluent, ANSYS CFX y OpenFOAM, así como los modelos de Schnerr-Sauer y Zwart-Gerber-Belamri.

En el contexto normativo, la ISO 9906 admite la simulación CFD como herramienta complementaria en la predicción del NPSHr cuando no es factible realizar ensayos de aceptación en banco de pruebas, siempre que se documenten y validen los modelos de turbulencia y los

modelos de cavitación utilizados. La API 610 exige, para bombas de proceso crítico, la validación experimental del modelo CFD mediante al menos un punto operacional instrumentado.

### *5.3.2 Modelos analíticos: criterios de Thoma y curvas H-Q*

Los modelos analíticos para el diagnóstico de cavitación se basan en el balance energético de la instalación, evaluando la disponibilidad de NPSHd frente al NPSHr declarado por el fabricante según la norma ISO 9906 o los catálogos HI. El criterio de Thoma ($\sigma$ = NPSHd / H) permite establecer el margen operativo libre de cavitación de forma expedita, con mínimos requerimientos computacionales, siendo el método de preferencia en diagnóstico de campo por parte del personal técnico de mantenimiento.

Su limitación fundamental radica en la dependencia de los valores de NPSHr certificados por el fabricante bajo condiciones de ensayo normalizadas (ISO 9906, Grado 2), que pueden diferir de las condiciones reales de operación en planta, especialmente en presencia de fluidos con propiedades distintas al agua a 20 °C, caudales fuera del rango de la curva publicada, o degradación progresiva del rodete por desgaste abrasivo.

### *5.3.3 Gemelos digitales en el diagnóstico de cavitación*

Un gemelo digital es una réplica virtual de un activo físico que integra modelos matemáticos del comportamiento del sistema con datos operacionales en tiempo real provenientes de sensores instalados en campo, actualizando dinámicamente su estado para replicar con fidelidad el comportamiento del equipo real (Grieves y Vickers, 2017; Tao et al., 2018). En el contexto de

bombas centrífugas, un gemelo digital de diagnóstico de cavitación puede integrar el modelo hidráulico de la bomba (curva H-Q, curva de eficiencia η-Q, curva NPSHr-Q), sensores de presión diferencial, caudal ultrasónico, vibración (ISO 13373-1), temperatura y corriente del motor eléctrico, junto con algoritmos de detección basados en aprendizaje automático (ML) o lógica difusa entrenada con firmas acústicas y vibratorias características del fenómeno cavitante.

Desde la perspectiva normativa, la implementación de gemelos digitales en entornos industriales está sujeta a los requisitos de ciberseguridad de la IEC 62443, que establece niveles de madurez para la protección de los sistemas de automatización y control industrial (IACS) contra amenazas cibernéticas. Adicionalmente, cuando el gemelo digital forma parte de la estrategia de mantenimiento predictivo dentro de un marco de gestión de activos, debe alinearse con los principios de la ISO 55001, que exige que las decisiones de mantenimiento se sustenten en información confiable, costos del ciclo de vida y análisis de riesgo documentados.

### *5.3.4 Matriz de evaluación multicriterio*

A continuación se presenta la matriz de evaluación comparativa de las tres metodologías de simulación analizadas, estructurada bajo los criterios de la gerencia de mantenimiento.

**Tabla 3.**

*Matriz de evaluación multicriterio.*

| Criterio de evaluación | Simulación CFD (Dinámica de fluidos) | Modelo analítico (Thoma / Euler) | Gemelo digital (Digital Twin) |
|---|---|---|---|
| **Costo de implementación** | Alto — licencias CFD + clúster HPC | Bajo — tablas de curvas de la bomba | Muy alto — plataforma IoT + sensores + integración |
| **Precisión del diagnóstico** | Alta — distribución presiones y vórtices | Media — NPSHr, σ de Thoma simplificado | Muy alta — datos operacionales en tiempo real |
| **Tiempo de análisis** | Días a semanas (preproceso intensivo) | Horas (cálculo manual o hoja de cálculo) | Continuo — monitoreo permanente 24/7 |
| **Capacidad predictiva** | Media — escenarios condicionados al modelo | Baja — estado operativo puntual | Alta — ML + réplica físico-digital |
| **Requerimiento de datos** | Medio — geometría CAD + condiciones límite | Bajo — curvas H-Q y parámetros del fabricante | Muy alto — historial de operación + sensores |
| **Aplicabilidad en campo** | Limitada — requiere especialista CFD | Alta — técnico de mantenimiento de planta | Media — operador capacitado en SCADA/DT |
| **Confiabilidad de resultados** | Alta — validación numérica convergente | Media — hipótesis te simplificadoras | Muy alta — basada en datos reales de proceso |
| **Normativa aplicable** | ISO 9906, ASME B73.1, API 610 | HI 9.6.1, ISO 9906 Thoma σ criterial | IEC 62443, ISO 55001 IEC 61511 (SIS) |
| **Marco de decisión en mantenimiento** | Diseño y rediseño de impulsores | Diagnóstico rápido operativo | Mantenimiento predictivo activos críticos |

*Nota*: («2001 IEEE/ASME International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings [front matter]», 2001; *IEC 61511-1:2016 | IEC*, s. f.; *IEC 62443-4-1:2018 | IEC*, s. f.; *International standard ISO 9906:2012*, s. f.; *Understanding the 2024 Updates to ANSI/HI 9.6.1 Rotodynamic Pumps Guideline for NPSH Margin - Pumps.org*, s. f.-a; Author, 2023) .

### *5.3.5 Análisis por dimensión de evaluación*

**5.3.5.1 Costo de implementación.** La simulación CFD presenta el mayor costo de implementación entre las tres metodologías, en razón de las licencias de software especializado (ANSYS Fluent o CFX: USD 25.000–50.000/año en licencia académica; superior en licencia comercial), la infraestructura de cómputo de alto rendimiento (HPC) requerida para la resolución de mallas con más de 10 millones de elementos, y la necesidad de personal especializado en mecánica computacional de fluidos. El gemelo digital supera incluso este costo en la fase de implementación, al requerir la instalación de infraestructura de sensorización (transmisores de presión, flujómetros ultrasónicos, acelerómetros industriales certificados), plataformas IoT industriales (p. ej., OSIsoft PI, Siemens MindSphere o AWS IoT Greengrass) y el proceso de calibración y validación del modelo físico-digital. En contraste, el modelo analítico basado en Thoma y curvas H-Q no demanda inversión en infraestructura computacional o de instrumentación adicional, siendo accesible al técnico de mantenimiento con los datos de catálogo del fabricante y las condiciones de instalación documentadas.

**5.3.5.2 Precisión y confiabilidad del diagnóstico.** En términos de precisión, el gemelo digital sustentado en datos operacionales en tiempo real ofrece la mayor confiabilidad para el diagnóstico de cavitación en condiciones reales de planta, al capturar variaciones dinámicas en las condiciones de succión, temperatura del fluido y régimen de caudal que los modelos estáticos no pueden representar. La simulación CFD provee alta precisión en la caracterización local del campo de presiones y la distribución de las burbujas de vapor en el rodete, lo que la convierte en la herramienta de referencia para diseño y rediseño de impulsores. El modelo analítico, sujeto a las

hipótesis simplificadoras del flujo unidimensional y los datos certificados bajo ISO 9906 Grado 2, presenta una precisión media, adecuada para diagnóstico operativo de primer nivel pero insuficiente para la caracterización de fenómenos transitorios o configuraciones geométricas no estándar.

**5.3.5.3 Capacidad predictiva y mantenimiento basado en condición.** La capacidad predictiva diferencia fundamentalmente al gemelo digital de las otras dos metodologías. Mientras que la simulación CFD permite explorar escenarios hipotéticos acotados al modelo geométrico construido, y el modelo analítico solo describe el estado operativo en un punto de la curva, el gemelo digital habilita la predicción de la evolución del fenómeno cavitante en el tiempo mediante la integración de algoritmos de aprendizaje automático entrenados con histórico de operación, siguiendo los principios del mantenimiento basado en condición (CBM) y el mantenimiento predictivo articulados en la ISO 55001 y el marco RCM (Reliability-Centered Maintenance).

# 6. Plan de mantenimiento preventivo y predictivo

## 6.1 Condiciones que favorecen la cavitación

Desde una perspectiva termodinámica e hidráulica, los factores que predisponen la aparición de cavitación incluyen:

- Presión de succión insuficiente (NPSH disponible < NPSH requerido).
- Temperatura del fluido elevada, que incrementa la presión de vapor.
- Alta velocidad de flujo en la entrada del impulsor, que reduce la presión estática.
- Operación fuera del punto de mejor eficiencia (BEP), generando flujo recirculante interno.
- Pérdidas hidráulicas excesivas en la línea de succión (codos abruptos, válvulas parcialmente cerradas, longitud excesiva).
- Presencia de gases disueltos o partículas sólidas que actúan como núcleos de nucleación.

## 6.2 Consecuencias técnicas y económicas

Las consecuencias de una operación prolongada bajo condiciones de cavitación son progresivas y acumulativas:

**Tabla 4.**

*Consecuencias técnicas y económicas de la cavitación por horizonte temporal.*

| Nivel de afectación | Consecuencia técnica | Impacto económico |
|---|---|---|
| **Corto plazo (días-semanas)** | Erosión superficial del impulsor, ruido y vibración anormal | Incremento de costos de mantenimiento correctivo |
| **Mediano plazo (meses)** | Picaduras profundas en el impulsor y voluta, degradación del rendimiento hidráulico en 5-15% | Reducción de producción, aumento de consumo energético |
| **Largo plazo (años)** | Fallo del sello mecánico y rodamientos, fractura del impulsor, daño en carcasa | Parada no programada, reemplazo completo del equipo |

*Nota*:(Author, 2023; *International standard ISO 9906:2012*, s. f.; *Understanding the 2024 Updates to ANSI/HI 9.6.1 Rotodynamic Pumps Guideline for NPSH Margin - Pumps.org*, s. f.-b).

## 6.3 Medidas preventivas desde el diseño y la operación

### *6.3.1 Criterio NPSH — fundamento del control hidráulico*

El parámetro de control fundamental para evitar la cavitación es la Altura Neta de Succión (NPSH, por sus siglas en inglés). Se distinguen dos valores de referencia: el NPSH requerido (NPSHr), determinado por el fabricante de la bomba a través de ensayos normalizados (ANSI/HI 9.6.1), y el NPSH disponible (NPSHd), que representa la energía efectiva disponible en la entrada del impulsor. La condición necesaria para una operación segura es:

$$NPSHd \geq NPSHr + 0.5\ m \text{ (Margen de seguridad mínimo)}$$

El NPSHd se calcula como:

$$NPSHd = (Ps / \rho g) + (Vs^2 / 2g) + Zs - (Pv / \rho g)$$

Donde: Ps = presión absoluta en la succión, Vs = velocidad del fluido en la succión, Zs = altura geométrica desde el nivel del fluido hasta la brida de succión, Pv = presión de vapor a la temperatura de operación, ρ = densidad del fluido, g = aceleración gravitacional.

En la práctica industrial, el NPSHd puede incrementarse mediante: (a) aumento de la presión de succión elevando el nivel del depósito fuente; (b) reducción de la temperatura del fluido; (c) minimización de pérdidas hidráulicas en la línea de succión; y (d) selección de una bomba con menor NPSHr mediante el uso de etapas de inducción o impulsores de doble entrada.

### *6.3.2 Punto de mejor eficiencia (BEP) y rango de operación*

El Punto de Mejor Eficiencia (BEP, Best Efficiency Point) es el caudal para el cual la bomba opera con máximo rendimiento hidráulico. Operar alejado del BEP genera recirculación interna —tanto en la entrada como en la salida del impulsor— que reduce localmente la presión y predispone la formación de burbujas de vapor, incluso cuando el NPSHd es suficiente en condiciones de diseño.

La recomendación técnica es mantener el caudal de operación dentro del rango del 85% al 115% del caudal en el BEP. Para sistemas con demanda variable, la implementación de variadores de frecuencia (VFD) permite ajustar la velocidad de la bomba en lugar de estrangular el flujo con válvulas, preservando el punto de operación cerca del BEP y reduciendo simultáneamente el consumo energético conforme a las leyes de afinidad:

$$Q_2/Q_1 = n_2/n_1 \quad | \quad H_2/H_1 = (n_2/n_1)^2 \quad | \quad P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3$$

### *6.3.3 Diseño y configuración de la línea de succión*

La línea de succión es el factor de instalación con mayor influencia sobre el NPSHd. Las siguientes recomendaciones de diseño reducen las pérdidas hidráulicas y previenen la formación de vórtices:

- Longitud de succión mínima: utilizar la tubería de succión más corta y directa posible.
- Diámetro interno: seleccionar un diámetro que mantenga la velocidad del fluido entre 0.9 y 1.5 m/s en la tubería de succión.
- Relación L/D aguas arriba: mantener una longitud mínima de 10 diámetros sin perturbaciones antes de la brida de succión.
- Tipo de codos: preferir codos de radio largo ($R/D \geq 1.5$) sobre codos de 90° de radio corto. Nunca instalar un codo en plano vertical inmediatamente antes de la brida.
- Válvulas de succión: usar únicamente válvulas de compuerta o mariposa, nunca válvulas de globo en la succión.
- Reductores excéntricos: en la transición hacia la brida de succión, usar reductores excéntricos con la parte plana hacia arriba para evitar acumulación de aire.
- Filtros de succión: si se requieren, dimensionar para que la pérdida de carga en condición sucia no supere 0.3 m en el NPSH.

### *6.3.4 Selección de materiales resistentes a la erosión por cavitación*

La selección del material para el impulsor, la voluta y los anillos de desgaste tiene un impacto determinante en la vida útil del equipo bajo condiciones de cavitación. La resistencia de un material a la erosión por cavitación está relacionada con su dureza, tenacidad y energía de deformación elástica. La siguiente tabla presenta los materiales de mayor uso industrial ordenados por resistencia:

**Tabla 5.**

*Comparación de materiales para impulsores y componentes hidráulicos expuestos a cavitación.*

| Material | Dureza (HB) | Índice resist. cavit. | Aplicación recomendada |
|---|---|---|---|
| **Acero inoxidable 316L** | 160–180 | 92% | Fluidos corrosivos, agua de mar, industria química |
| **Aleación Duplex 2205** | 270–310 | 95% | Alta corrosión + erosión, minería, petroquímica |
| **Bronce naval (C83600)** | 70–90 | 75% | Agua dulce, aplicaciones generales no corrosivas |
| **Acero al carbono (CF8M)** | 140–160 | 68% | Agua limpia, baja agresividad química |
| **Hierro fundido gris** | 180–220 | 45% | Aplicaciones no críticas, bajo costo inicial |

*Nota*: (ASTM A743, 2021; ASTM A781, 2021; ASTM B584-22, 2022; ASTM G32, 2021; ASTM G134, 2023).

Para aplicaciones con fluidos especialmente agresivos o en bombas de alta presión donde la cavitación es inevitable durante transitorios operacionales, se recomienda la aplicación de recubrimientos de carburo de tungsteno (WC-Co) o cerámicas de alúmina mediante proyección

térmica HVOF, los cuales incrementan la resistencia a la erosión en un factor de 3 a 5 con respecto al material base.

## 6.4 Plan de mantenimiento preventivo y predictivo

### *6.4.1 Estructura del plan de mantenimiento*

El plan propuesto se organiza en cinco frecuencias de intervención, cada una con actividades, responsables y criterios de aceptación claramente definidos. La filosofía subyacente es la del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC/RCM), que prioriza las actividades según la criticidad del equipo y el modo de falla predominante —en este caso, la cavitación y sus efectos secundarios sobre rodamientos, sellos y el impulsor.

**6.4.1.1 Inspección diaria (operador de turno).** El operador de turno es la primera línea de detección. Las siguientes variables deben registrarse en la hoja de ruta digital al inicio y final de cada turno:

- Presión de succión y descarga: comparar con valores de diseño. Una caída sostenida de la presión diferencial mayor al 5% respecto a la línea base puede indicar erosión del impulsor.
- Caudal de operación: verificar que se mantenga en el rango BEP ±15%. Valores fuera de rango activan protocolo de revisión.
- Temperatura del fluido en la succión: una elevación de 5°C sobre el set-point de diseño incrementa la presión de vapor y reduce el NPSHd.

- Corriente eléctrica del motor: fluctuaciones de corriente de alta frecuencia (vibración eléctrica) pueden correlacionarse con cavitación incipiente.
- Nivel de ruido: el operador debe reportar cualquier cambio en el patrón sonoro de la bomba (ruido tipo cascajo, crepitación o sonido de grava).
- Temperatura superficial de rodamientos y sello mecánico: verificar con termómetro de contacto o infrarrojo. Alarma si supera la temperatura nominal +15°C.

#### 6.4.1.2 Mantenimiento preventivo semanal (técnico de turno).

- Inspección visual de sellos mecánicos: verificar ausencia de fugas, manchas de proceso o depósitos cristalizados.
- Verificación del sistema de enfriamiento/lavado del sello: caudal de fluido de barrera dentro de especificación del fabricante.
- Revisión de acoplamientos: verificar alineación visual, ausencia de juego axial excesivo, estado de los elementos elásticos.
- Lectura del manómetro diferencial en filtros de succión: si la caída de presión supera el límite de diseño, programar limpieza o reemplazo del elemento filtrante.
- Verificación de nivel y condición visual del lubricante de rodamientos (carcasas con lubricación por salpique).

**6.4.1.3 Mantenimiento predictivo mensual (especialista en condición).** El monitoreo de condición mensual constituye el núcleo del plan predictivo. Las técnicas aplicadas permiten detectar la cavitación en estado incipiente, antes de que genere daño estructural:

### A. Análisis de vibración (FFT espectral)

La firma vibratoria de una bomba cavitando presenta características específicas que la diferencian de otros modos de falla. Los puntos de medición recomendados son: brida de descarga (dirección radial y axial), carcasa de rodamiento motor (lado libre y lado bomba), y carcasa de la bomba.

- Frecuencia de paso de álabes (BPF): BPF = (RPM / 60) × N° de álabes. La cavitación genera energía espectral elevada entre 2 y 10 kHz, frecuentemente con modulación de amplitud en BPF y sus armónicos.
- Subarmónicos del BPF: la presencia de componentes a 0.5× o 0.3× BPF es indicativa de recirculación interna, precursora de cavitación.
- Banda ancha de alta frecuencia: el ruido de banda ancha entre 500 Hz y 25 kHz es el indicador más sensible de cavitación activa.
- Umbral de alerta (ISO 10816-7): nivel de vibración global ≥ 4.5 mm/s RMS activa alerta; ≥ 7.1 mm/s RMS activa parada planificada.

### B. Análisis de emisión acústica (AE)

Los sensores de emisión acústica (rango 30–500 kHz) detectan las ondas elásticas generadas por el colapso de burbujas de cavitación sobre las superficies metálicas. Esta técnica permite detectar la cavitación incipiente antes de que sea audible o detectable por vibración

convencional. El parámetro de evaluación es el conteo de eventos AE por unidad de tiempo; un incremento sostenido mayor al 30% sobre la línea base requiere investigación inmediata.

**C. Análisis de lubricante (ferrografía analítica)**

La ferrografía permite cuantificar y caracterizar las partículas metálicas presentes en el aceite de los cojinetes. Un incremento en la concentración de partículas de desgaste de acero entre 5 y 25 µm, o la aparición de partículas con morfología irregular de alta energía, indica desgaste acelerado asociado a las cargas dinámicas impuestas por la cavitación. Se solicitan adicionalmente: viscosidad cinemática, índice de oxidación y contenido de agua.

#### 6.4.1.4 Mantenimiento preventivo semestral (mecánico especialista).

- Balanceo dinámico del rotor: conforme a ISO 1940 Grado G2.5. El desequilibrio residual admisible para una bomba de proceso de 50 kg de rotor a 3 000 RPM es de aproximadamente 16 g·mm por plano de corrección.
- Alineación precisa motor-bomba: mediante equipo de alineación láser. Tolerancia admisible: desalineación paralela ≤ 0.05 mm, angular ≤ 0.05 mm/100 mm. Verificar después de cualquier desmontaje.
- Revisión de anillos de desgaste: medir la holgura diametral. Reemplazar si supera el doble de la holgura nominal del fabricante.
- Termografía infrarroja completa: rodamientos, sellos, acoplamientos, tablero eléctrico del motor. Umbral de acción: $\Delta T > 15°C$ respecto a línea base.

- Verificación de la curva característica: comparar la curva H-Q medida en campo con la curva original del fabricante. Una desviación mayor al 5% en la altura a caudal nominal indica deterioro del impulsor.

**6.4.1.5 Revisión mayor anual / Overhaul (equipo de mantenimiento).** La revisión mayor implica el desmontaje completo del equipo. Las actividades mínimas incluyen:

1. Desmontaje sistemático conforme al procedimiento del fabricante y registro fotográfico de cada componente.
2. Inspección visual del impulsor: documentar picaduras, erosión, fisuras y desgaste de álabes. Clasificar según escala ASTM G32 si aplica.
3. Medición dimensional de impulsores y anillos de desgaste: verificar holguras radiales y tolerancias geométricas con micrómetros y comparadores.
4. Inspección de la voluta y difusor: verificar ausencia de picaduras, corrosión y depósitos.
5. Reemplazo de rodamientos: siempre sustituir en overhaul, independientemente del estado aparente.
6. Reemplazo del sello mecánico: evaluar condición de los anillos de fricción, resortes y fuelles. Reemplazar si presenta marcas de contacto anormal o desgaste asimétrico.
7. Verificación y reapriete de todas las conexiones de instrumentación.
8. Prueba de rendimiento hidráulico post-ensamble: conforme a API 610 o HI 14.6 según aplique.

## 6.5 Indicadores clave de desempeño (kpis)

### *6.5.1 Marco de indicadores*

Los indicadores de desempeño del mantenimiento (KPIs) permiten cuantificar el impacto del plan sobre la confiabilidad, disponibilidad y costo de los sistemas de bombeo. Los indicadores propuestos se organizan en cuatro dimensiones: confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costo.

**Tabla 6.**

*Matriz de KPIs para el plan de mantenimiento de bombas centrífugas.*

| KPI | Fórmula de cálculo | Meta operacional |
|---|---|---|
| **MTBF (h)** | *Horas operativas totales / N° fallas por cavitación* | ≥ 3 000 h |
| **MTTR (h)** | *Tiempo total de reparación / N° intervenciones* | ≤ 8 h |
| **Disponibilidad (%)** | *MTBF / (MTBF + MTTR) × 100* | ≥ 97% |
| **Confiabilidad (%)** | *e^(−t/MTBF) × 100 para t = 720 h* | ≥ 95% |
| **Tasa fallas cavit. (%)** | *Fallas por cavit. / Fallas totales × 100* | ≤ 5% |
| **Costo mantenimiento (%)** | *C. mantenimiento / Valor reemplazo × 100* | ≤ 2.5% |
| **Cobertura predictiva (%)** | *Equipos monitoreados / Total equipos × 100* | ≥ 90% |
| **OEE Bombas (%)** | *Disponibilidad × Rendimiento × Calidad × 100* | ≥ 85% |

*Nota*:(*BS EN 13306:2017 - CT | 31 de enero de 2018 | Conocimiento BSI*, s. f.; *IEC 60050-192*, s. f.; *IEC 60300-3-1*, s. f.; *ISO 14224*, s. f.; *ISO 17359*, s. f.; *ISO 22400-2*, s. f.).

### *6.5.2 Línea base y metas por horizonte temporal*

**Tabla 7.**

*Línea base y metas de KPIs por horizonte temporal de implementación.*

| KPI | Línea base | Meta 6 meses | Meta 12 meses | Meta 24 meses |
|---|---|---|---|---|
| **MTBF (h)** | 1 840 | 2 200 | 2 700 | ≥ 3 000 |
| **MTTR (h)** | 18.4 | 12 | 9 | ≤ 8 |
| **Disponibilidad (%)** | 91.0% | 94% | 96% | ≥ 97% |
| **Fallas cavitación/año** | 6 | 4 | 2 | ≤ 1 |
| **Costo mant. /reemplazo (%)** | 4.8% | 3.5% | 2.8% | ≤ 2.5% |

*Nota*:(*API STD 689 - Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment | GlobalSpec*, s. f.; *PAS 55-1:2008 | 15 Sep 2008 | BSI Knowledge*, s. f.).

## 6.6 Análisis técnico-económico

### *6.6.1 Cuantificación del costo de la cavitación no controlada*

Para justificar gerencialmente el plan de mantenimiento, es necesario cuantificar el costo total de la cavitación en el escenario actual (sin plan). El análisis se basa en una flota de cinco (5) bombas centrífugas críticas en una planta de proceso continuo, con los siguientes parámetros de referencia:

- Costo de reemplazo por bomba (nuevo): USD 36 000.
- Costo hora de parada no programada: USD 4 500 (pérdida de producción + mano de obra).

- Promedio de paradas por cavitación: 6 eventos/año por flota, duración promedio 18.4 h cada uno.
- Vida útil promedio sin plan: 4 años (frente a 8-10 años con plan).

### *6.6.2 Desglose costo-beneficio anualizado*

**Tabla 8.**

*Análisis costo-beneficio anualizado del plan de mantenimiento preventivo-predictivo.*

| Concepto de costo / inversión | Sin plan (USD) | Con plan (USD) | Ahorro (USD) |
|---|---|---|---|
| **Reparaciones correctivas de impulsores y sellos** | 120 000 | 18 000 | 102 000 |
| **Pérdida de producción por paradas no programadas** | 65 000 | 8 000 | 57 000 |
| **Mano de obra correctiva no planificada** | 25 000 | 6 000 | 19 000 |
| **Reemplazo anticipado de equipos (CAPEX diferido)** | 75 000 | 22 000 | 53 000 |
| **Energía adicional por operación fuera de BEP** | 18 000 | 3 000 | 15 000 |
| **Inversión en tecnología predictiva y capacitación** | — | 41 000 | (41 000) |
| **TOTAL, ANUAL** | **303 000** | **98 000** | **205 000** |

*Nota*:(*IEC 60300-3-1*, s. f.; *ISO 50001:2018(es), Sistemas de gestión de la energía — Requisitos con orientación para su uso*, s. f.).

### *6.6.3 Indicadores financieros del plan*

**Tabla 9.**

*Indicadores financieros del plan de mantenimiento preventivo-predictivo.*

| Indicador financiero | Valor calculado | Interpretación |
|---|---|---|
| **ROI del plan de mantenimiento** | 200% | *(Ahorro neto − Inversión) / Inversión × 100 = 164 000 / 41 000 × 100* |
| **Período de recuperación (payback)** | < 8 meses | *La inversión se recupera antes del primer año de implementación* |
| **VPN proyectado (5 años, WACC 12%)** | USD 485 000 | *Valor presente de los ahorros netos descontados a la tasa de costo de capital* |
| **Extensión de vida útil por equipo** | +4.5 años | *De 3-5 años (sin plan) a 7-10 años (con plan): diferimiento CAPEX por bomba ≈ USD 36 000* |
| **Reducción de fallas por cavitación** | −83% | *De 6 eventos/año a 1 evento/año o menos en la flota de 5 bombas* |

*Nota*:(*ISO 15686-5*, s. f.; *ISO 29821-1*, s. f.).

### *6.6.4 Justificación gerencial*

El análisis técnico-económico demuestra que la implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo orientado a la mitigación de cavitación constituye una decisión de inversión con retorno superior al 200%, payback inferior a ocho meses y un valor presente neto proyectado de USD 485 000 en un horizonte de cinco años. Estos resultados posicionan el plan no como un gasto operacional, sino como una inversión estratégica de alta rentabilidad.

Desde la perspectiva de la Gerencia de Mantenimiento, la implementación del plan contribuye simultáneamente a tres objetivos estratégicos organizacionales: (1) maximización de la confiabilidad de los activos críticos de proceso; (2) optimización del Costo Total de Propiedad (TCO) mediante la extensión de la vida útil y la reducción del CAPEX de reemplazo anticipado; y (3) sostenibilidad operacional, al reducir el consumo energético asociado a la operación ineficiente fuera del BEP y minimizar la generación de residuos por reemplazo prematuro de equipos.

## 6.7 Recomendaciones practicas – síntesis

### *6.7.1 Recomendaciones de diseño e instalación*

- Verificar que el NPSHd supere el NPSHr en al menos 0.5 m en todas las condiciones operacionales, incluyendo escenarios de temperatura máxima y caudal mínimo.
- Seleccionar el punto de operación dentro del rango BEP ±10%. Para sistemas con demanda variable, implementar variadores de frecuencia (VFD) en lugar de estrangulamiento de válvulas.
- Instalar válvulas de recirculación mínima para proteger la bomba durante operación a caudal bajo ($Q < 30\%$ BEP).
- Garantizar la alineación precisa del conjunto motor-bomba durante la instalación, con tolerancias $\leq 0.05$ mm en paralela y angular.

### *6.7.2 Recomendaciones de operación*

- Definir y documentar los parámetros normales de operación (rango de caudal, presión diferencial, temperatura, corriente) para cada bomba. Entrenar al operador para detectar desviaciones.
- Implementar arranques suaves mediante VFD con rampa de aceleración de 15 a 30 segundos.
- Registrar y monitorear la temperatura del fluido en succión. Activar alarma ante incrementos de 5°C sobre el set-point de diseño.
- Establecer un protocolo de respuesta ante detección de cavitación por el operador: registro del evento, notificación al especialista de mantenimiento y evaluación de condición dentro de las 24 horas.

### *6.7.3 Recomendaciones de mantenimiento preventivo*

- Implementar el plan de mantenimiento estructurado en cinco frecuencias (diaria, semanal, mensual, semestral, anual) con procedimientos escritos, responsables nominados y listas de chequeo digitales.
- Realizar alineación láser después de cada intervención que implique desmontaje del equipo. No retornar a servicio sin validar alineación.
- Ejecutar balanceo dinámico del rotor conforme a ISO 1940 G2.5 como mínimo cada dos años o después de cualquier reemplazo del impulsor.
- Reemplazar rodamientos y sello mecánico en cada revisión mayor anual, independientemente del estado aparente, para eliminar el modo de falla por envejecimiento.

### *6.7.4 Recomendaciones de mantenimiento predictivo*

- Instalar sensores de emisión acústica (AE) en bombas de servicio crítico para detección temprana de cavitación incipiente antes de que genere daño estructural.
- Implementar análisis de lubricante mensual con ferrografía analítica para rodamientos en baño de aceite. Solicitar índice PQ y conteo de partículas por tamaño.
- Establecer un programa formal de gestión de datos de condición con software de mantenimiento predictivo (CMMS/APM) que permita análisis de tendencias y alertas automáticas.

### *6.7.5 Recomendaciones de gestión y mejora continua*

- Implementar análisis de causa raíz (RCA) para cada falla por cavitación, documentando la causa fundamental y las acciones preventivas resultantes.
- Capacitar al equipo de mantenimiento en el fenómeno de cavitación, sus indicadores y las técnicas de diagnóstico predictivo aplicables.
- Revisar y actualizar el plan de mantenimiento anualmente incorporando las lecciones aprendidas, los resultados de los KPIs y las recomendaciones del análisis de tendencias predictivo.

## 7. Conclusiones

El corpus analizado registra una tasa de crecimiento anual negativa de −6,64 %, lo que evidencia que la cavitación en bombas centrífugas, pese a su relevancia técnica, no ha generado una línea de investigación en expansión sostenida. Esto justifica la necesidad de trabajos integradores que sistematicen el conocimiento existente.

China lidera ampliamente la producción científica del campo, concentrando 84 artículos del corpus. Aunque países de América Latina como Colombia y Venezuela registran participación emergente, la coautoría internacional del 15,38 % confirma que la colaboración transfronteriza es limitada y los grupos de investigación trabajan de manera predominantemente independiente.

Las fuentes más relevantes evidencian que la investigación se articula desde la mecánica de fluidos, el monitoreo de condición y el procesamiento de señales.

La caracterización acústica de la cavitación y el procesamiento espectral de señales conforman un clúster motor consolidado, mientras que la detección incipiente mediante señales eléctricas representa un nicho especializado de alto potencial. Ambas líneas constituyen el espacio de mayor pertinencia para el desarrollo de nuevas contribuciones en el área.

El aprendizaje automático, las redes neuronales y la transformada de Fourier aparecen como temáticas emergentes con crecimiento reciente, pero cohesión interna insuficiente. Esto indica que su aplicación a la detección de cavitación es una línea en formación activa, con alto potencial de desarrollo en los próximos años y una oportunidad clara de investigación futura.

Las emisiones acústicas constituyen la técnica con mayor sensibilidad diagnóstica para cavitación, al permitir detectar el fenómeno desde su etapa incipiente y cuantificar su severidad mediante indicadores objetivos. Su implementación se recomienda en equipos de alta criticidad.

El ultrasonido pasivo representa la alternativa de mejor relación costo-beneficio para detección temprana, siendo una herramienta de primera línea en programas de mantenimiento predictivo, especialmente por su facilidad de uso y portabilidad.

El análisis de vibraciones, respaldado por normas internacionales sólidas (ISO 10816, API 610), ofrece la mayor capacidad de monitoreo continuo e integración con sistemas SCADA, siendo la técnica de elección para programas de mantenimiento basado en la condición a escala industrial.

Garantizar un margen mínimo de 0.5 m entre el NPSHd y el NPSHr en todas las condiciones operacionales es la medida preventiva más determinante.

Mantener el caudal entre el 85% y el 115% del BEP elimina la recirculación interna que origina cavitación aun con NPSHd suficiente. El uso de variadores de frecuencia (VFD) es la solución más eficaz en sistemas de demanda variable, combinando beneficios técnicos, energéticos y de vida útil en una sola intervención.

Materiales como el acero inoxidable y las aleaciones Dúplex extienden la vida útil del impulsor entre dos y tres veces frente al hierro fundido.

El análisis espectral FFT y la emisión acústica permiten detectar la cavitación antes de que genere daño estructural.

## Referencias Bibliográficas

2001 IEEE/ASME International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings [front matter]. (2001). *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*, *2*, i-xxiii. https://doi.org/10.1109/AIM.2001.936747

Al-Obaidi, A. R., & Towsyfyan, H. (2019a). An experimental study on vibration signatures for detecting incipient cavitation in centrifugal pumps based on envelope spectrum analysis. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, *12*(6), 2057-2067. https://doi.org/10.29252/jafm.12.06.29901

Al-Obaidi, A. R., & Towsyfyan, H. (2019b). An experimental study on vibration signatures for detecting incipient cavitation in centrifugal pumps based on envelope spectrum analysis. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, *12*(6), 2057-2067. https://doi.org/10.29252/jafm.12.06.29901

API STANDARD 610. (2021). *Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries:* BSI British Standards. https://doi.org/10.3403/02921782

*API STD 689—Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment | GlobalSpec*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://standards.globalspec.com/std/1021603/api-std-689

ASTM A743. (2021). *Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application*. https://store.astm.org/a0743_a0743m-21.html

ASTM A781. (2021). *Standard Specification for Castings, Steel and Alloy, Common Requirements, for General Industrial Use*. https://store.astm.org/a0781_a0781m-21.html

ASTM B584-22. (2022). *Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications*. https://store.astm.org/b0584-22.html

ASTM G32. (2021). *Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*. https://store.astm.org/g0032-16r21e01.html

ASTM G134. (2023). *Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet*. https://store.astm.org/g0134-17r23.html

Author, V. (2023, enero 17). ISO 55001:2014—Asset Management Systems. *Velosi Asset Integrity, Engineering, HSE & Software Consultants*. https://velosiaims.com/iso-550012014-asset-management-systems/

Bin Mohd, A., Md Rezali, K. A., & Harmin, M. Y. (2025). Exploring Basic Vibration Measurements for Cavitation Detection in Centrifugal Pumps. *Journal of Physics: Conference Series*, *3156*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/3156/1/012016

Brennen, C. E. (2013). *Cavitation and Bubble Dynamics*. https://www.cambridge.org/core/books/cavitation-and-bubble-dynamics/2D7842E28C6BE1BFB67A62DDD05B416D

*BS EN 13306:2017—CT | 31 de enero de 2018 | Conocimiento BSI*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://knowledge.bsigroup.com/products/maintenance-maintenance-terminology

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015a). *Termodinámica (8a. Ed.)*. https://books.google.com.co/books?id=WYeJDAAAQBAJ

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015b). *Termodinámica (8a. Ed.)*. https://books.google.com.co/books?id=WYeJDAAAQBAJ

Černetič, J., & Čudina, M. (2011). Estimating uncertainty of measurements for cavitation detection in a centrifugal pump. *Measurement Journal of the International Measurement Confederation*, *44*(7), 1293-1299. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.03.023

Dehghan, A. A., Shojaeefard, M. H., & Roshanaei, M. (2024a). Exploring a new criterion to determine the onset of cavitation in centrifugal pumps from energy-saving standpoint; experimental and numerical investigation. *Energy*, *293*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130681

Dehghan, A. A., Shojaeefard, M. H., & Roshanaei, M. (2024b). Exploring a new criterion to determine the onset of cavitation in centrifugal pumps from energy-saving standpoint; experimental and numerical investigation. *Energy*, *293*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130681

Dong, L., Zhao, Y., & Dai, C. (2019). Detection of inception cavitation in centrifugal pump by fluid-borne noise diagnostic. *Shock and Vibration*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/9641478

García Márquez, F. P., Tobias, A. M., Pinar Pérez, J. M., & Papaelias, M. (2012). Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable Energy*, *46*, 169-178. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.003

Geitner, F. K., & Bloch, H. P. (2012). *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2010-0-67104-5

Gülich, J. F. (2010). Centrifugal pumps (second edition). En *Centrifugal Pumps (Second Edition)*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12824-0

Han, Y., Zou, J., Gong, B., Luo, Y., Wang, L., Presas Batlló, A., Yuan, J., & Wang, C. (2025a). The use of model-based voltage and current analysis for torque oscillation detection and improved condition monitoring of centrifugal pumps. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *222*. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111781

Han, Y., Zou, J., Gong, B., Luo, Y., Wang, L., Presas Batlló, A., Yuan, J., & Wang, C. (2025b). The use of model-based voltage and current analysis for torque oscillation detection and improved condition monitoring of centrifugal pumps. *Mechanical Systems and Signal Processing*. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85200136433&doi=10.1016%2fj.ymssp.2024.111781&partnerID=40&md5=bc53be82785f4098cc96168ec4f7b653

*IEC 60050-192:2015*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://webstore.iec.ch/en/publication/21886

*IEC 60300-3-1:2003*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://webstore.iec.ch/en/publication/1294

*IEC 61511-1:2016 | IEC*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://webstore.iec.ch/en/publication/24241

*IEC 62443-4-1:2018 | IEC*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://webstore.iec.ch/en/publication/33615

*International standard ISO 9906:2012*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/iso-99062012/rotodynamic-pumps-hydraulic-performance-acceptance-tests-grades-1-2-and-3/xs116940/116038

*ISO 10816-3:2009*. (s. f.). ISO. Recuperado 18 de junio de 2026, de https://www.iso.org/standard/50528.html

*ISO 14224:2016*. (s. f.). ISO. Recuperado 25 de junio de 2026, de https://www.iso.org/standard/64076.html

*ISO 15686-5:2017*. (s. f.). ISO. Recuperado 25 de junio de 2026, de https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/11/61148.html

*ISO 17359:2018*. (s. f.). ISO. Recuperado 25 de junio de 2026, de https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/11/71194.html

*ISO 18434-1:2008*. (s. f.). ISO. Recuperado 18 de junio de 2026, de https://www.iso.org/standard/41648.html

*ISO 22400-2:2014*. (s. f.). ISO. Recuperado 25 de junio de 2026, de https://www.iso.org/standard/54497.html

*ISO 29821-1:2011*. (s. f.). ISO. Recuperado 18 de junio de 2026, de https://www.iso.org/es/contents/data/standard/04/56/45693.html

*ISO 50001:2018(es), Sistemas de gestión de la energía—Requisitos con orientación para su uso*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:es

Jia, X., Zhang, Y., Lv, H., & Zhu, Z. (2023). Study on external performance and internal flow characteristics in a centrifugal pump under different degrees of cavitation. *Physics of Fluids*, *35*(1). https://doi.org/10.1063/5.0133377

Karagiovanidis, M., Pantazi, X. E., Papamichail, D., & Fragos, V. (2023a). Early Detection of Cavitation in Centrifugal Pumps Using Low-Cost Vibration and Sound Sensors. *Agriculture (Switzerland)*, *13*(8). https://doi.org/10.3390/agriculture13081544

Karagiovanidis, M., Pantazi, X. E., Papamichail, D., & Fragos, V. (2023b). Early Detection of Cavitation in Centrifugal Pumps Using Low-Cost Vibration and Sound Sensors. *Agriculture Switzerland*, *13*(8). https://doi.org/10.3390/agriculture13081544

Karassik, I. J. (Ed.). (2001). *Pump handbook* (3. ed). McGraw-Hill.

Kelechava, B. (2017, julio 27). ANSI/HI 9.6.1-2017—Rotodynamic Pumps Guideline for NPSH Margin. *The ANSI Blog*. https://blog.ansi.org/ansi/ansi-hi-96-1-2017-rotodynamic-pumps-npsh/

Li, Y., Feng, G., Li, X., Si, Q., & Zhu, Z. (2018a). An experimental study on the cavitation vibration characteristics of a centrifugal pump at normal flow rate. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *32*(10), 4711-4720. https://doi.org/10.1007/s12206-018-0918-x

Li, Y., Feng, G., Li, X., Si, Q., & Zhu, Z. (2018b). An experimental study on the cavitation vibration characteristics of a centrifugal pump at normal flow rate. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *32*(10), 4711-4720. https://doi.org/10.1007/s12206-018-0918-x

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed). Butterworth-Heinemann.

Mousmoulis, G., Karlsen-Davies, N., Aggidis, G., Anagnostopoulos, I., & Papantonis, D. (2019a). Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, *75*, 300-311. https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.10.015

Mousmoulis, G., Karlsen-Davies, N., Aggidis, G., Anagnostopoulos, I., & Papantonis, D. (2019b). Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-

85056003501&doi=10.1016%2fj.euromechflu.2018.10.015&partnerID=40&md5=05e08be0eb0d8f495a38120ddf606b64

Mousmoulis, G., Yiakopoulos, C., Aggidis, G., Antoniadis, I., & Anagnostopoulos, I. (2021). Application of Spectral Kurtosis on vibration signals for the detection of cavitation in centrifugal pumps. *Applied Acoustics*, *182*. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108289

Olsen, A. (2024). Condition Monitoring (Predictive) Maintenance. En A. Olsen (Ed.), *Safety Culture and Leading Indicators for Safety in the Maritime and Offshore Environment* (pp. 673-677). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55943-3_52

Panda, A. K., Rapur, J. S., & Tiwari, R. (2018a). Prediction of flow blockages and impending cavitation in centrifugal pumps using Support Vector Machine (SVM) algorithms based on vibration measurements. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *130*, 44-56. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.092

Panda, A. K., Rapur, J. S., & Tiwari, R. (2018b). Prediction of flow blockages and impending cavitation in centrifugal pumps using Support Vector Machine (SVM) algorithms based on vibration measurements. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *130*, 44-56. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.092

*PAS 55-1:2008 | 15 Sep 2008 | BSI Knowledge*. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://knowledge.bsigroup.com/products/pas55-2008-1-2008-specification-for-the-optimized-management-of-physical-assets

Quiroga M., J., Oviedo C, S., & García C, A. (2012a). Detección de cavitación en una bomba centrífuga usando emisiones acústicas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, *20*(3), 343-349. https://doi.org/10.4067/S0718-33052012000300008

Quiroga M., J., Oviedo C, S., & García C, A. (2012b). Detección de cavitación en una bomba centrífuga usando emisiones acústicas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, *20*(3), 343-349. https://doi.org/10.4067/S0718-33052012000300008

Stopa, M. M., Cardoso Filho, B. J., & Martinez, C. B. (2014). Incipient detection of cavitation phenomenon in centrifugal pumps. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *50*(1), 120-126. https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2267709

Tecnología para la Industria. (2019). Sistemas de Monitoreo de Bombas Centrifugas. *Tecnología para la Industria*. https://tecnologiaparalaindustria.com/ebooks/sistemas-de-monitoreo-de-bombas-centrifugas/

TRACTIAN. (2024). *Aplicaciones del ultrasonido en mantenimiento industrial*. TRACTIAN. https://tractian.com/es/blog/aplicaciones-del-ultrasonido-en-mantenimiento-industrial

TÜV SÜD. (2023). *Pruebas de emisiones acústicas | protege tus equipos*. TÜV SÜD. https://www.tuvsud.com/es-es/servicios/ensayos-no-destructivos-ndt/ensayos-no-destructivos-industriales/pruebas-emisiones-acusticas

*Understanding the 2024 Updates to ANSI/HI 9.6.1 Rotodynamic Pumps Guideline for NPSH Margin—Pumps.org*. (s. f.-a). Recuperado 29 de mayo de 2026, de https://www.pumps.org/2025/03/18/understanding-the-2024-updates-to-ansi-hi-9-6-1-rotodynamic-pumps-guideline-for-npsh-margin/

*Understanding the 2024 Updates to ANSI/HI 9.6.1 Rotodynamic Pumps Guideline for NPSH Margin—Pumps.org*. (s. f.-b). Recuperado 25 de junio de 2026, de https://www.pumps.org/2025/03/18/understanding-the-2024-updates-to-ansi-hi-9-6-1-rotodynamic-pumps-guideline-for-npsh-margin/

Wang, Y., Shao, J., Yang, F., Zhu, Q., & Zuo, M. (2025a). Optimization design of centrifugal pump cavitation performance based on the improved BP neural network algorithm. *Measurement Journal of the International Measurement Confederation*, *245*. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116553

Wang, Y., Shao, J., Yang, F., Zhu, Q., & Zuo, M. (2025b). Optimization design of centrifugal pump cavitation performance based on the improved BP neural network algorithm. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *245*. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116553

Wang, Y., Shao, J., & Zhang, H. (2024). Analysis of the effect of cavitation on internal fluid excitation characteristics of centrifugal pumps. *Physics of Fluids*, *36*(8). https://doi.org/10.1063/5.0220181

Wilson, W., Carvajal, C., Poalacin, J., & Salazar, E. (2018). Detection of cavitation in centrifugal pump for vibration analysis. *Proceedings - 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2018*, 460-464. https://doi.org/10.1109/ICCAR.2018.8384720

Zaresharif, M., Ravelet, F., Kinahan, D. J., & Delaure, Y. M. C. (2021). Cavitation control using passive flow control techniques. *Physics of Fluids*, *33*(12). https://doi.org/10.1063/5.0071781

Zhu, Y., Zhou, L., Lv, S., Shi, W., Ni, H., Li, X., Tao, C., & Hou, Z. (2024). Research Progress on Identification and Suppression Methods for Monitoring the Cavitation State of Centrifugal Pumps. *Water (Switzerland)*, *16*(1). https://doi.org/10.3390/w16010052