

**Ciencia Latina**  
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2024,  
Volumen 8, Número 5.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i5](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5)

**EVALUAR EL EFECTO DE LA MÁXIMA AMPLITUD  
DE VIBRACIÓN DE UN SISTEMA CON  
AMORTIGUAMIENTO VISCOSO, GENERADA POR  
CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS**

**VALUATE THE EFFECT OF THE MAXIMUM VIBRATION  
AMPLITUDE OF A SYSTEM WITH VISCOUS DAMPING,  
GENERATED BY CAVITATION IN CENTRIFUGAL PUMPS**

**Gustavo Adolfo Fajardo Pulido**

Universidad Tecnológica de Cancún, México

**Juan Carlos Sandoval Villegas**

Universidad Tecnológica de Cancún, México

**Karla Vanesa Cabrera Castillo**

Universidad Tecnológica de Cancún, México

**José Francisco Quintal Vázquez**

Universidad Tecnológica de Cancún, México

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i5.14407](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14407)

## **Evaluar el Efecto de la Máxima Amplitud de Vibración de un Sistema con Amortiguamiento Viscoso, Generada por Cavitación en Bombas Centrífugas**

**Gustavo Adolfo Fajardo Pulido<sup>1</sup>**[gufajardo@utcancun.edu.mx](mailto:gufajardo@utcancun.edu.mx)<https://orcid.org/0000-0002-2034-4324>Universidad Tecnológica de Cancún  
México**Juan Carlos Sandoval Villegas**[jsandoval@utcancun.edu.mx](mailto:jsandoval@utcancun.edu.mx)<https://orcid.org/0000-0002-4767-4059>Universidad Tecnológica de Cancún  
México**Karla Vanesa Cabrera Castillo**[kcabrea@utcancun.edu.mx](mailto:kcabrea@utcancun.edu.mx)<https://orcid.org/0009-0005-3680-7249>Universidad Tecnológica de Cancún  
México**José Francisco Quintal Vázquez**[fquintal@utcancun.edu.mx](mailto:fquintal@utcancun.edu.mx)<https://orcid.org/0000-0002-5071-6459>Universidad Tecnológica de Cancún  
México

### **RESUMEN**

En toda gestión del mantenimiento, incluye los programas de Predictivo para reducir costos operativos, ahorrar energía y hacer eficientes la operación en los procesos industriales mediante su implementación, utilizando diversos métodos o técnicas, siendo una de ellas el análisis de vibración, optimizando la confiabilidad operativa. El presente estudio analiza el comportamiento de la amplitud de la frecuencia de vibración por cavitación en una bomba centrífuga, tiene como objetivos; evaluar la máxima amplitud de vibración de un sistema con amortiguamiento viscoso a partir de un modelo matemático en el dominio de la frecuencia y amplitud, así como la interpretación de los espectros de la transformada rápida de Fourier (FFT), generados por el analizador de vibración en tiempo real. Donde el incremento de la amplitud, generado por la frecuencia de paso de alabes en el impulsor de la bomba, produce un daño severo a los demás elementos mecánicos de la bomba, reduciendo su vida útil, pérdidas de energía y Juan Carlos Sandoval Villegas por consiguiente incremento de los costos de operación por mantenimiento correctivo.

**Palabras clave:** vibración, amplitud, frecuencia, cavitación

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [gufajardo@utcancun.edu.mx](mailto:gufajardo@utcancun.edu.mx)

# Valuate the Effect of the Maximum Vibration Amplitude of a System with Viscous Damping, Generated by Cavitation in Centrifugal Pumps

## ABSTRACT

In all maintenance management, it includes Predictive programs to reduce operating costs, save energy and make the operation in industrial processes efficient through their implementation, using various methods or techniques, one of them being vibration analysis, optimizing reliability operational. The present study analyzes the behavior of the amplitude of the vibration frequency due to cavitation in a centrifugal pump, its objectives are; evaluate the maximum vibration amplitude of a system with viscous damping from a mathematical model in the frequency and amplitude domain, as well as the interpretation of the fast Fourier transform (FFT) spectra, generated by the vibration analyzer in real time. Where the increase in amplitude, generated by the frequency of blade passage in the pump impeller, produces severe damage to the other mechanical elements of the pump, reducing its useful life, energy losses and consequently increased costs of operation for corrective maintenance.

**Keywords:** vibration, amplitude, frequency, cavitation

*Artículo recibido 10 septiembre 2024*

*Aceptado para publicación: 12 octubre 2024*



## **INTRODUCCIÓN**

En todo proceso industrial se utilizan diferentes tipos de maquinarias rotatorias, trabajan a diferentes velocidades de acuerdo con las necesidades del proceso industrial, estos equipos, presentan modos de falla, según los espectros de vibración (Marín, 2012).

Considerando que las fallas en bombas centrífugas en el sector industrial son por diversos problemas de vibración siendo el de problemas eléctricos, la cavitación y el desbalance rotatorio una de las causas más comunes de generación de vibración en las máquinas rotativas de acuerdo con datos estadísticos (Charlotte, 2020).

El presente estudio analiza el comportamiento de la amplitud de la frecuencia de vibración en maquinaria por cavitación, donde el efecto de la vibración se transmite a los demás elementos mecánicos de la maquinaria, incrementando la amplitud de vibración, esto reduce la vida útil de los componentes de la maquinaria, algunas de las partes de la máquina, ya sea en los sellos mecánicos, chumaceras, eje – rotor, por lo cual origina una falla prematura en la maquinaria, de acuerdo a las especificaciones del Fabricante.

Es decir, se traduce en una disminución de la integridad mecánica y confiabilidad, debido al incremento de la amplitud de vibración ya sea por desbalance rotatorio o diversos tipos de fallas en los equipos, por lo cual experimentan cambios del coeficiente de amortiguamiento viscoso ya sea con características de un sistema no amortiguado, críticamente amortiguado o un sistema sobre amortiguado (Rao, 2018).

### **Objetivo general**

Evaluar el efecto de la máxima amplitud de vibración de un sistema con amortiguamiento viscoso, generada por cavitación en bombas centrífugas.

### **Objetivos específicos**

- Analizar el comportamiento de un sistema vibratorio con amortiguamiento viscoso en el dominio de la frecuencia y amplitud.
- Determinar la máxima amplitud de vibración de un sistema vibratorio con amortiguamiento viscoso sometido a cavitación mediante un análisis de vibración.

## Alcance

Mediante un análisis de vibración obtener los espectros de vibración para la predicción de fallas en equipo crítico y optimizar la confiabilidad operativa de los equipos rotativos,

## Contribución

Implementar una metodología de análisis de un sistema vibratorio con amortiguamiento viscoso, a partir de un análisis de vibraciones, para la predicción de fallas de equipo crítico y optimizar la confiabilidad operativa mediante la gestión del mantenimiento predictivo.

Como resultado y meta se pretende comprender y evaluar el comportamiento de las variables de un sistema con amortiguamiento viscoso en el dominio de la frecuencia en bombas centrífugas a partir de un análisis de vibración.

## Estado del Arte

En plantas industriales la Ingeniería de mantenimiento utiliza diversos procedimientos o técnicas de mantenimiento predictivo, siendo el análisis de vibraciones una de las técnicas de mayor aplicación ya que realizan las mediciones y análisis de la vibración en tiempo real, analizar los espectros de vibración generados por la transformada rápida de Fourier(FFT) mediante un analizador de vibraciones (IRD Mechanalysis, 2010).

### Gráfico 1. Analizador de vibraciones.



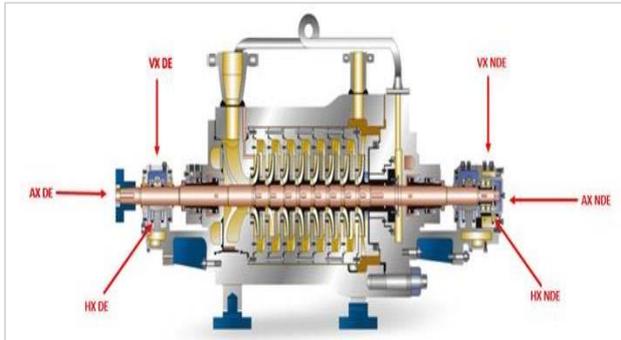
Fuente: Fluke modelo 810.

De acuerdo con la Norma API 610 12th edition, la cual establece que las lecturas de vibración no filtradas (**overall**) en bombas de succión frontal para velocidades menores a 3.600 RPM o potencias de 300 kW (400 HP) no debe superar los 3,0 mm/s RMS (0,12 in/s RMS).

Las mediciones de la amplitud en velocidad, se registran en tres direcciones: axial, horizontal y vertical en las chumaceras o cojinetes principales o extremos del bastidor del motor y bomba, el

gráfico 2, indica la colocación del acelerómetro de un analizador de vibración en la posición horizontal, vertical y axial.

**Gráfico 2.** Puntos de medición de vibración en bombas centrífugas multipaso.



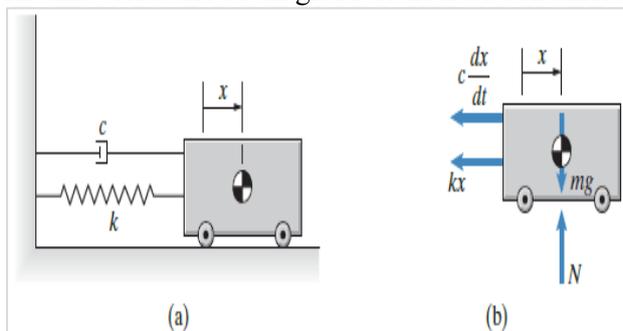
Fuente: CBM Connect, 2022.

El movimiento más sencillo que puede existir es el movimiento en una dirección, de una masa controlada por un resorte único, este sistema mecánico se representa mediante un modelo matemático masa - resorte, con un grado de libertad, el cual representa todos los detalles importantes del sistema con el objeto de derivar las ecuaciones matemáticas (o analíticas) que rigen el comportamiento del sistema.

Un sistema con amortiguamiento viscoso se considera como un parámetro de un sistema vibratorio, el cual se describe como la capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía (maurice L. Adams, 2005).

El gráfico 3 describe el modelo matemático y su diagrama de cuerpo libre de un sistema vibratorio con amortiguamiento, el cual representa una máquina rotatoria con cimentación.

**Gráfico 3.** Representación gráfica del Modelo matemático y diagrama de cuerpo libre (b) de un sistema vibratorio de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso.



De acuerdo con el análisis del diagrama de cuerpo libre del gráfico 3, a partir de la segunda ley de Newton, se obtiene la ecuación diferencial para un sistema vibratorio con amortiguamiento viscoso.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

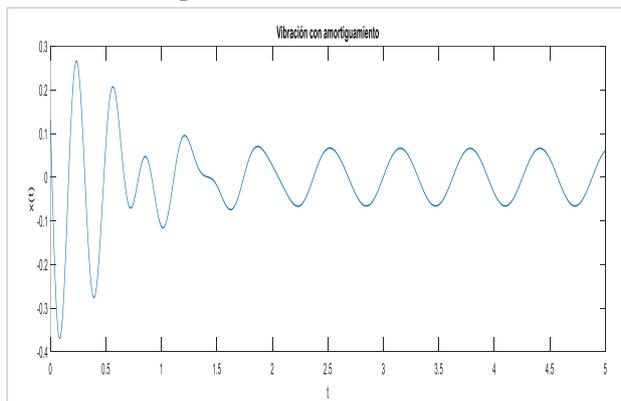
Donde  $m$  representa la masa en kg,  $c$  la velocidad en m/s,  $k$  rigidez en N/m<sup>2</sup>, de acuerdo con la segunda ley del movimiento de Newton, el producto de la masa y su aceleración son iguales a la fuerza aplicada a la masa, donde el trabajo es igual a la fuerza multiplicada por el desplazamiento en la dirección de la fuerza, y el trabajo realizado en una masa se almacena como energía cinética; en la mayoría de los casos se tiene que utilizar un modelo matemático para representar el sistema vibratorio real, y a menudo hay varios modelos posibles (Alsalaet, 2012).

La amplitud de vibración indica la gravedad del problema, la frecuencia de vibración indica la fuente del problema, las mediciones de velocidad y monitoreo de vibración es la unidad más común para identificar

diversos problemas o aceptabilidad tales como: desequilibrio, desalineación, holgura (estructuras de maquinaria, cimientos o cojinetes), armónicos y muchos otros problemas en el rango de frecuencia de la maquinaria y varios múltiplos de velocidad real (Trout, 2021).

La gráfica 4 describe la amplitud de vibración de un sistema con amortiguamiento viscoso.

**Gráfica 4.** Amplitud de vibración de un sistema vibratorio con amortiguamiento viscoso.



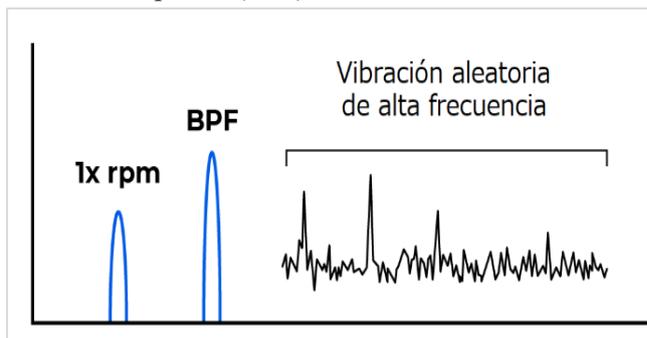
El valor de este intervalo se conoce por período, su inverso es llamado frecuencia, se llaman no periódicos, cuando no tienen aquellas características, se analiza el modelo matemático de un sistema vibratorio de un movimiento armónico simple, las características de desplazamiento, velocidad y aceleración en el análisis de vibraciones y sus características del amortiguamiento de sistemas vibratorios. Otro parámetro de medición en un análisis de vibración es la fase, el cual describe la desviación relativa de un componente vibrante respecto de un punto de referencia fijo en otro

componente vibrante, la fase se utiliza en la técnica de análisis de vibración en mantenimiento predictivo para interpretar los espectros de la transformada rápida de Fourier(FFT), el cual descompone una señal del dominio del tiempo en todas sus frecuencias en un analizador de vibraciones, para poder detectar, interpretar y determinar la característica y tipo de falla en maquinaria, donde dichos espectros se encuentran en el dominio del tiempo y frecuencia (Dhillon, 2020).

En el dominio de la frecuencia el análisis de espectro de vibración el resultado es la frecuencia – amplitud, para poder interpretar el tipo de falla con un analizador de vibración.

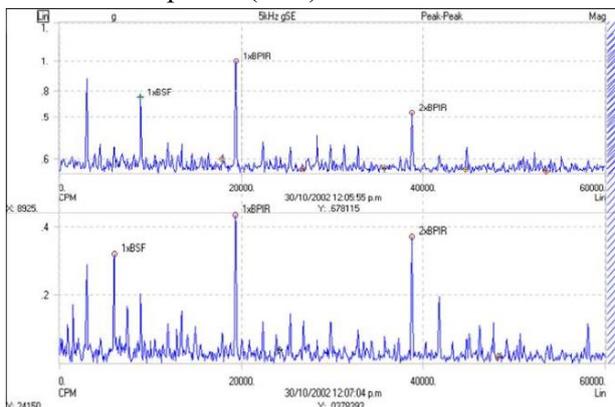
El gráfico 5, describe un espectro de vibración, en el dominio de la frecuencia y amplitud, en parámetro de medición de amplitud de vibración en aceleración para detectar fallas en rodamientos (SKF, 2023).

**Gráfico 5** espectro (FFT), alta frecuencia.



Fuente: Traction.

**Gráfico 5.** Espectro (FFT) en el dominio de la frecuencia y amplitud, en aceleración.



Fuente: SKF

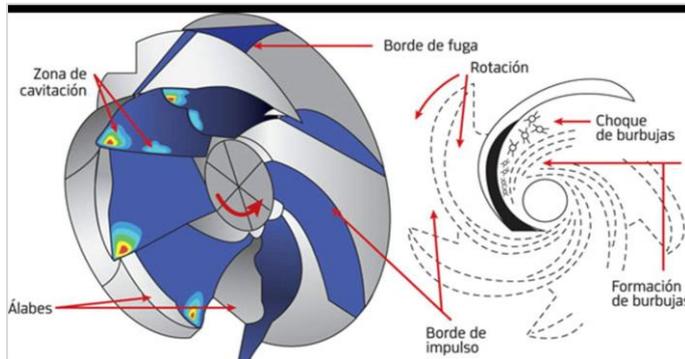
En bombas centrífugas, los problemas hidráulicos son variados y se suelen originar por cavitación, recirculación, turbulencia de flujo.

El impulsor de la bomba produce un impulso de presión en el fluido bombeado, cuando cada alabe pasa el puerto de salida (GRUNDFOS, 2023).

Este excita la frecuencia de vibración del paso de alabes en la tubería, y por lo general se transmite a través de la máquina (White, 2010).

La cavitación es un problema muy común en las bombas, especialmente en las centrífugas, ya que esta situación está directamente relacionada con el funcionamiento del impulsor de la bomba.

**Gráfico 6.** Fenómeno de cavitación en el impulsor de una bomba centrífuga.



Fuente: Tractian

La cavitación es la formación de vacíos parciales en un líquido por un cuerpo sólido en rápido movimiento (como una hélice) o por ondas sonoras de alta intensidad, además, la picadura y el desgaste de las superficies sólidas (como el metal o el hormigón) como resultado del colapso de estos vacíos en el líquido circundante (Xylem applied water system, 2015).

Cuando el líquido en ebullición sale por el lado de salida del impulsor, la presión más alta en ese lado hace que burbujas de vapor colapsen provocando una vibración excesiva, como el impulsor entra en contacto con los elementos mecánico no giratorias, como las placas o los anillos de desgaste, reduciendo la capacidad de bombeo (Cengel & John M. Cimbala, 2018).

En la gráfica 7, se muestra un impulsor con daños provocados por el fenómeno de cavitación.

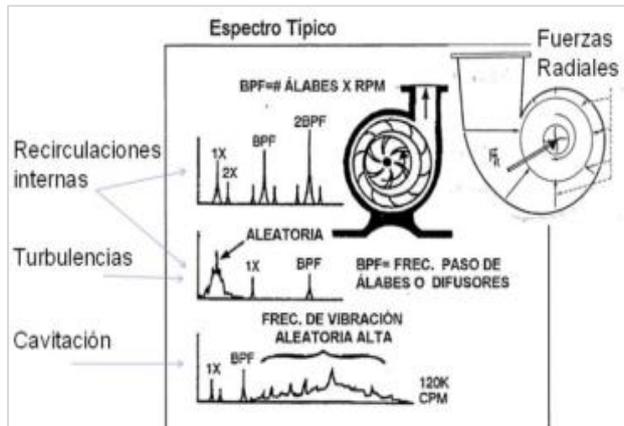
**Gráfico 7.** Impulsor con daño por cavitación.



Fuente: Instituto Asteco.

El gráfico 8, muestra la tabla de diagnóstico de vibración de fuerzas aerodinámicas e hidráulica, por recirculación, turbulencia y cavitación, en el dominio de amplitud – frecuencia.

**Gráfico 8.** Espectros (FFT), de fallas en bombas centrífugas.



Fuente: IRD Mechanalysis

Normalmente la cavitación genera energía aleatoria de banda amplia y mayor frecuencia, la que en ocasiones se superpone a las armónicas de frecuencias de paso de aspas.

En general, indica una insuficiente presión de succión, si no se corrige, la cavitación, puede ser sumamente nociva para los componentes internos de las bombas, en particular, puede corroer las aspas del rotor; cuando está presente, se escucha como si estuviera pasando ``grava`` por la bomba (Technical Associates of Charlotte P.C, 2020).

Sin embargo, en una bomba puede generar una gran amplitud de BFP(Best efficiency point) y armónicas, si el espacio entre las aspas de rotación y los difusores fijos no se mantiene uniforme durante su rotación.

En ocasiones, la BFP también puede coincidir con una frecuencia natural del sistema que está ocasionando una vibración elevada. También se puede generar una BFP alta si el anillo de desgaste del impulsor se atora con el eje (IRD Mechanalysis, 2010).

Las vibraciones en las bombas tienden a incrementarse y superar los límites considerados como normales debido a daños o defectos en la cimentación, desalineación entre la bomba y el equipo impulsor, desbalance del rotor, bajo NPSHA, vórtices, pulsaciones de presión, inestabilidad hidráulica, cavitación, resonancia, **holgura** excesiva, daños en los cojinetes y una serie de eventos adicionales (API, 2012).

La bibliografía actual en turbo maquinaria, provee mucha información sobre las vibraciones de naturaleza mecánica, sin embargo, discuten muy poco sobre la naturaleza de las vibraciones originadas por las fuerzas hidráulicas en una bomba, una buena práctica para evitar complicaciones hidráulicas que pudiesen generar altas vibraciones en las bombas centrífugas es operar las bombas a caudales próximos al BFP (Flowserve, 2024).

No mantener en servicio, bombas con flujo muy por arriba de su caudal de diseño y finalmente no operar bombas a muy bajo flujo, el API 610 establece un rango de operación preferencial de entre 70 y 120% del BEP.

Una manera para evitar la cavitación es asegurar una presión de entrada adecuada, verificar y ajustar la presión de entrada de la bomba para evitar que caiga por debajo de la presión de vapor del líquido, reducir la velocidad, de esta manera se obliga a que entre menos volumen en la bomba y eso disminuye la velocidad hasta un nivel aceptable en el que detenemos efectivamente la formación de cavitación (Armstrong, 2017).

Asegurarse de que los niveles de líquido sean adecuados para evitar la formación de vapor en la tubería de succión, a menudo, este nivel de flujo reducido aceptado termina siendo más volumen bombeado ya que evitamos activamente la cavitación.

## **METODOLOGÍA**

Para determinar las características del análisis de vibración se obtendrá la frecuencia de paso de aspas o paso de alabes (BFP) en CPM, la cual se determina a partir del número de aspas y los rpm de la bomba.

$$\text{BFP} = \text{Números de aspas} \times \text{rpm} \quad (2)$$

Efectuando el análisis de vibración con un analizador de vibraciones, se puede determinar la frecuencia de paso de alabes, esta frecuencia es propia de bombas y normalmente no presenta problemas,

Para efectos de análisis, se tiene los datos de una bomba centrífuga con un impulsor de 5 alabes a 3600 rpm, a partir de (2) se puede obtener la frecuencia de paso de alabes.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La cavitación es un problema común en los procesos industriales, puede causar daños significativos a los componentes mecánicos de una bomba centrífuga, si no implementa un programa de mantenimiento predictivo adecuadamente.

Los ingenieros deben comprender las causas de la cavitación y tomar medidas para prevenirla, como asegurar una presión de entrada adecuada y modificar el diseño de la bomba según sea necesario.

El monitoreo regular de la bomba y la detección temprana de la cavitación son clave para evitar problemas mayores y garantizar un funcionamiento eficiente del sistema de bombeo.

Al analizar el espectro de amplitud y frecuencia de vibración, considerando el cálculo de la frecuencia de paso de alabes del impulsor de una bomba centrífuga, evaluando si la amplitud generada se encuentra en la frecuencia de paso de alabes, así mismo interpretar la característica del espectro (FFT) corresponde a la falla por cavitación, así mismo poder implementar su corrección para evitar daños a los componentes mecánicos de la maquinaria y, por consiguiente reducir los costos de operación por mantenimiento.

### **Recomendaciones**

Implementar un mantenimiento basado en condiciones, así como un programa de mantenimiento predictivo mediante la técnica de análisis de vibraciones en tiempo real y condiciones de monitoreo, estableciendo las alarmas en máquinas de acuerdo a normativa vigente, evaluar las condiciones de operación de la bomba centrífuga para evitar la cavitación.

Necesariamente numeradas en forma correlativa que permitan su referencia inmediata en el texto. Con cabeceras apropiadas con sus títulos correspondientes. Leyendas explicativas que aclaren símbolos, abreviaturas, etc. así, también guías de datos, imágenes, estadísticas, etc. Al tratarse de las tablas, éstas determinarán claramente en cada columna un encabezamiento, precisando el tipo de datos que se registran en ella y las unidades de medida que se hubieren utilizado.

## **CONCLUSIONES**

No se repite lo anteriormente dicho. El autor expresa su criterio, su postura específica frente al tema y lo sustenta de conformidad con los datos obtenidos y una argumentación teórica con plena consistencia en aquellos.

No debe salirse de este rango, no debe caer en la subjetividad, evite argumentaciones sin evidencia fáctica-reflexiva de los mismos.

Y finalmente, en caso de que existan indicios o interrogantes no resueltos, plantéelos en este apartado compartiendo la tarea pendiente con otros investigadores que pueden acompañar y ampliar el estudio.

### **Agradecimientos**

A la Dirección de Ingeniería y Tecnología por todas las facilidades en la realización de este trabajo de investigación.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

Alsalaet, J. (2012). *Vibration analysis and diagnostic guide*. 65.

API. (2012). *API 610*. USA: API.

Armstrong. (2017). *What is pump cavitation?* Obtenido de

[https://blog.armstrongfluidtechnology.com/what-is-pump-cavitation-understand-how-cavitation-can-damage-your-system?utm\\_medium=ppc&utm\\_term=cavitation&utm\\_source=adwords&utm\\_campaign=AF\\_T\\_BlogTraffic\\_PumpCavitation:+North+America&hsa\\_kw=cavitation&hsa\\_acc=9](https://blog.armstrongfluidtechnology.com/what-is-pump-cavitation-understand-how-cavitation-can-damage-your-system?utm_medium=ppc&utm_term=cavitation&utm_source=adwords&utm_campaign=AF_T_BlogTraffic_PumpCavitation:+North+America&hsa_kw=cavitation&hsa_acc=9)

Cengel, Y. A., & John M. Cimbala. (2018). *Mecànica de Fluidos*. USA: McGraw Hill.

Charlotte, T. A. (2020). *Analisis de Vibraciones*. Carolina.

Dhillon, B. (2020). *Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineers*. New York: Taylor & Francis.

Flowserve. (2024). *Flowserve*. Obtenido de <https://www.flowserve.com/es/products/products-catalog/pumps/>

GRUNDFOS. (2023). *GRUNDFOS*. Obtenido de <https://www.grundfos.com/mx/support/faq/what-is-cavitation>

IRD Mechanalysis. (2010). *Analisis de Vibracion*. Mèxico: IRD.

Marín, E. P. (2012). *Análisis de Vibraciones*. México: Revertec.

maurice L. Adams, J. (2005). *Rotating Machinery Vibration*. NewYork: Headquarters.

Rao, S. S. (2018). *Mechanical Vibrations*. United Kingdom: Pearson.

SKF. (2023). *SKF*. Obtenido de <https://www.skf.com/mx>



Technical Associates of Charlotte P.C. (2020). *Vibration Diagnostic Handbook*. Charlotte.

Trout, J. (2021). *Análisis de Vibraciones*. USA: <https://cmc-latam.com/2020/02/19/anlasis-de-vibraciones-explicado/>

White, G. (2010). *Análisis de Vibraciones*. Woburn, USA: Azima DLI.

Xylem applied water system. (2015). Pump cavitation and how to avoid it.

