

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ANÁLISIS DE VIBRACIONES GENERADAS POR LAS PULSACIONES
DE PRESIÓN DE UNA BOMBA FUNCIONANDO A DIVERSOS
CAUDALES**

Informe de habilitación profesional presentado en conformidad a los
requisitos para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico.

Profesor guía:

Sr. Claudio Villegas Ulloa.

RODRIGO ALEJANDRO MUÑOZ GUTIÉRREZ
CONCEPCIÓN - CHILE

2017

SUMARIO

En el siguiente trabajo, se realizó el análisis de vibraciones generadas por las pulsaciones de presiones de una bomba funcionando a diferentes caudales, en el laboratorio de la Universidad del Bío-Bío.

En este análisis se utilizó el software LABVIEW, para determinar las señales a través de acelerómetros ubicados en la carcasa del rotor de la bomba, para luego extraer, mediante la programación realizada en este software, los valores espectrales y el valor RMS, con el fin de obtener alguna relación global entre el rendimiento y las pulsaciones de presión que son representadas por espectros específicos.

Se dispone de un banco de pruebas para determinar todas estas variables, haciendo uso de dos bombas centrífugas modelo EBARA y Century, acelerómetros, válvulas reguladoras, manómetros, amperímetros, etc.

De esta manera se obtuvieron los valores vibratorios de 3 ensayos por cada bomba, calculando los espectros y relacionándolos con la curva de rendimiento para cada una ellas. Concluyendo de esta forma para la bomba EBARA, que si existe una relación entre las vibraciones debido a las pulsaciones de presión, ya que las amplitudes vibratorias disminuyeron a medida que se acercaban al punto máximo de rendimiento, y con respecto a la bomba CENTURY, no se vio relación alguna, debido a que las vibraciones globales no se comportaron de la misma manera.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: VIBRACIONES EN BOMBAS CENTRÍFUGAS.	1
1.1) Introducción.	1
1.2) Origen del tema.	1
1.3) Objetivos	1
1.3.1) Objetivo general.....	1
1.3.2) Objetivos específicos	2
CAPÍTULO 2: MEDICIÓN DE VIBRACIONES MECÁNICAS	2
2.1) Introducción	2
2.2) Vibración mecánica	2
2.2.1) Vibración armónica simple	2
2.2.2) Desplazamiento, velocidad y aceleración vibratoria.....	3
2.2.3) Vibración global o total	3
2.2.4) Análisis de la vibración en dominio tiempo y frecuencia.	3
2.2.5) Valor pico, pico-pico, RMS, valor global de la vibración.	4
2.2.6) Amortiguamiento.	5
2.2.7) Vibración forzada.....	5
2.4.1) Análisis espectral.	7
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS VIBRACIONAL EN BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	8
3.1) Introducción	8
3.2) Funcionamiento y componentes de una bomba centrífuga.....	8
3.3) Fallas más comunes en bombas centrífugas.	9
3.3.1) Desbalanceo.	9
3.3.2) Desalineamiento.....	10
3.3.3) Solturas mecánicas.....	10
3.3.4) Rozamiento	11
3.3.5) Resonancia.	11
3.3.6) Cavitación	11
3.3.7) Pulsaciones de presión	12
3.3.8) Starvation o bajo nivel de llenado del rotor.	12
3.3.9) Turbulencias de flujo.	12
CAPÍTULO 4: MONTAJE DEL BANCO DE ENSAYOS Y EQUIPOS DE MEDICIÓN.	13

4.1) Introducción	13
4.2) Descripción del banco de ensayos y sus elementos.	13
4.2.1) Bomba EBARA	14
4.2.2) Bomba CENTURY.	14
4.2.3) Manómetro.	15
4.2.4) Válvula reguladora de caudal.	15
4.2.5) Amperímetros	16
4.2.6) Estanque de succión y de descarga.	16
4.3) Equipos de medición de vibraciones	17
4.3.1) Tarjeta de adquisición de datos.	17
4.3.2) Acelerómetros	18
CAPÍTULO 5: MEDICIONES Y RESULTADOS.....	18
5.1) Introducción	18
5.2) Ecuaciones.	18
5.3) Altura útil H (m) y Rendimiento η (%).....	19
5.3.1) Bomba EBARA.	19
5.3.2) Bomba CENTURY	22
5.4) Mediciones de espectros	24
5.4.1) Espectro bomba EBARA.	25
5.3.2) Espectro Bomba CENTURY.	26
5.4) Resultados Valor RMS, Frecuencia 1X y Frecuencia número de álabes.....	27
5.4.1) Bomba EBARA.	28
5.4.2) Bomba CENTURY.	31
5.5) Relación entre Rendimiento - Valor RMS, Espectro 1X y Espectro número de alabes	34
5.5.1) Bomba EBARA.	34
5.5.2) Bomba Century	36
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	38
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS	40

CAPÍTULO 1: VIBRACIONES EN BOMBAS CENTRÍFUGAS.

1.1) Introducción.

Dentro del área de la ingeniería, existen distintos tipos de máquinas, estas pueden estar en movimiento como al igual pueden ser máquinas estacionarias. Una de las máquinas utilizadas dentro como fuera de este ámbito, son las bombas centrífugas, las cuales, de cierta manera, se pueden monitorear para obtener datos significativos y así poder detectar cuando ésta debe ser intervenida por mal funcionamiento.

El análisis de las vibraciones, generalmente se hace en máquinas rotatorias, ya que pueden generar distintos tipos de fallas como son desgastes, desbalanceo, ruido, etc. Pero al mismo tiempo éstas vibraciones son el mejor indicador para saber en qué estado se encuentra la máquina, como lo son las bombas centrífugas en este caso.

Las señales vibratorias producidas por la máquina, resultan muy complejas al momento de analizar el comportamiento de esta, por ende, es necesario que las señales sean procesadas a través de la programación, utilizando herramientas matemáticas que permitan observar con mayor claridad el comportamiento de la máquina. Una de las herramientas más utilizadas es la transformada rápida de Fourier, que permite transformar la señal del dominio del tiempo al de frecuencia, de manera que se puedan ver solo los espectros característicos que indican el funcionamiento de la máquina.

1.2) Origen del tema.

El análisis de vibraciones ha sido fundamental tanto para prevenir fallas como para el diseño de elementos de máquinas, variando de acuerdo al funcionamiento de la máquina. El estudio se enfocará principalmente en analizar la relación que existe entre las pulsaciones de presión con respecto a las vibraciones globales en bombas centrífugas, de ésta manera ver el comportamiento e identificar los espectros vibratorios asociados, para luego facilitar y dar solución a problemas asociados a las pulsaciones de presiones generadas para este tipo de bombas.

1.3) Objetivos

1.3.1) Objetivo general

- Analizar las vibraciones generadas por las pulsaciones de presión de una bomba funcionando a diversos caudales.

1.3.2) Objetivos específicos

- Preparar los bancos de pruebas y corregir problemas de pérdidas de carga.
- Efectuar mediciones de presiones y vibraciones a diferentes caudales
- Determinar espectros característicos de la bomba a partir de espectro, calculado en LABVIEW.
- Verificar el valor vibratorio de las pulsaciones de presión con relación a las vibraciones globales.

CAPÍTULO 2: MEDICIÓN DE VIBRACIONES MECÁNICAS

2.1) Introducción

El análisis de vibraciones se utiliza en las industrias de manera frecuente, como técnica para diagnosticar fallas y así poder evaluar la condición en la que se encuentra la máquina. Al prevenir las posibles fallas de una máquina, se obtiene un mayor rendimiento en la producción que está sometida, así evitando detenciones no programadas.

Por lo general, las vibraciones no son buenas en las máquinas, ya que pueden generar distintas fallas. Algunas fallas pueden ser catastróficas, aun siendo intervenidas con anterioridad, ya que se conoce un cambio en la vibración de tal máquina.

2.2) Vibración mecánica

La vibración mecánica es el movimiento oscilatorio de una máquina, una estructura o alguna parte de ellas debido a una excitación.

2.2.1) Vibración armónica simple

El movimiento armónico es la forma más simple de vibración, se puede obtener haciendo vibrar libremente un sistema masa-resorte o un péndulo, como se indica en la Figura N°1

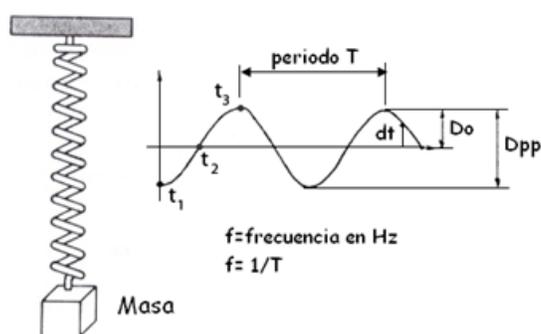


Figura N°1: Vibración armónica simple (ref:[1])

En la posición de equilibrio, las fuerzas sobre la masa se anulan y por lo tanto este tiende a permanecer en reposo en esa posición. Si el cuerpo se saca de su posición de equilibrio desplazándolo hacia abajo, y luego se suelta, este comenzará a vibrar con un movimiento armónico.

Si se grafica su posición con respecto a su posición de equilibrio que va teniendo el cuerpo en diferentes instantes de tiempo, se obtiene una curva sinodal. [1]

2.2.2) Desplazamiento, velocidad y aceleración vibratoria

El desplazamiento vibratorio es la posición instantánea del punto de medición respecto a la posición de equilibrio.

La velocidad vibratoria es la medida de la rapidez con la cual se está moviendo en un punto mientras esta vibrando.

La aceleración vibratoria es la rapidez de cambio de la velocidad con el tiempo. Según la segunda ley de Newton, la aceleración $a = \frac{F}{m}$, donde F es la fuerza resultante que actúa sobre la masa. Por ende mientras mayor sea el cambio de rapidez de la velocidad, mayor será la fuerza aplicada sobre la masa. [1]

2.2.3) Vibración global o total

La vibración de una máquina, rara vez es armónica simple. Lo más probable es que su forma sea compleja, ya que tiene diferentes sentidos, en forma horizontal, vertical o axial.

El sensor de vibraciones capta simultáneamente las vibraciones que llegan a él, provenientes de diferentes fuentes de excitación. La vibración resultante se llama vibración global, y las vibraciones que la componen se llaman componentes. [1]

2.2.4) Análisis de la vibración en dominio tiempo y frecuencia.

La medición de la vibración medida experimentalmente, es muy difícil de analizar en el dominio del tiempo, por lo tanto para analizarlas hay que transformarlas al dominio de la frecuencia. Al

descomponer la vibración global en sus componentes que la forman, se llama análisis frecuencia y se realiza como se indica en la figura 2, con un analizador de vibraciones.

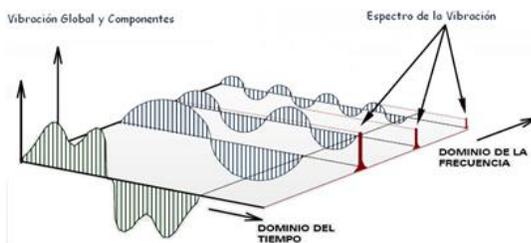


Figura N°2: Vibración global. (Ref: [1])

2.2.5) Valor pico, pico-pico, RMS, valor global de la vibración.

Existen magnitudes para medir la vibración global, el valor pico, pico-pico y valor RMS, como se definen en la figura 3. El valor pico es necesario cuando se quiere caracterizar vibraciones de naturaleza impulsiva o cuando se requieren evaluar la sobrecarga que generan estas en descansos hidrodinámicos. El valor pico-pico, se utiliza cuando se necesita medir desplazamientos relativos. El valor RMS (Root Mean Square, o raíz del valor medio de las velocidades instantáneas al cuadrado) toma en cuenta todo el historial de la vibración y entrega una estimación de la energía de la vibración. [1]

Para una vibración senoidal, los valores antes nombrados están descritos en la figura 3, cuando no es senoidal la vibración, estos no tienen relación.

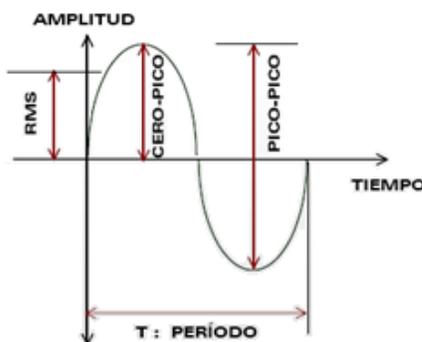


Figura N°3: Valor pico, pico-pico y valor RMS. (Ref: [6])

2.2.6) Amortiguamiento.

Si en el modelo masa-resorte, no hay fuerzas que disipen energía, el sistema vibrara libremente con amplitud constante. En la práctica siempre hay disipación de energía o amortiguamiento, lo que hace que las vibraciones siempre disminuyan sus amplitudes hasta detenerse. En las máquinas, existen varias causas de disipación de energía como rozamiento, resistencia al movimiento de un impulsor de fluido, etc. Entre mayor sea la disipación de energía, es mayor la disminución de la amplitud de las vibraciones. El amortiguamiento, se cuantifica con un factor de amortiguamiento. Los rotores tienen un factor entre 0.01 y 0.15. Si este factor es mayor a 0.2, se considera un valor grande. [1]

2.2.7 Vibración forzada.

Se hablado de vibraciones libres, en donde el sistema se mueve por un impacto inicial, luego de hacerlo vibrar, no se interviene, deteniéndose lentamente debido al amortiguamiento.

Sin embargo, en las vibraciones forzadas, la vibración es mantenida por la acción de una fuerza externa. Esta fuerza externa puede ser producida por un rotor desbalanceado, que entrega energía para compensar las pérdidas por amortiguamiento, de manera que se mantiene una amplitud de vibración estacionaria. [1]

2.3) Medición de la vibración.

2.3.1) Composición de una cadena de medición.

Al realizar una medición de vibración de algún equipo mecánico, la señal que capta el sensor, pasa por varias etapas antes de que esté disponible para verla en gráficos o registrar su valor RMS. Cabe mencionar que en algunas ocasiones, las etapas pueden estar refundidas en una sola. Las etapas que conforman una cadena de medición de vibraciones, son las siguientes. [1]

- Etapa transductora.
- Etapa de acondicionamiento de la señal.
- Etapa de procesamiento.
- Etapa de registro.

2.3.2) Transductores de vibraciones

Un transductor de vibraciones o sensor es un dispositivo electrónico que mide una cantidad física tal como la vibración, temperatura o presión y la convierte en una señal eléctrica (voltaje).

La relación entre la señal eléctrica de salida y la magnitud física de entrada se define como la sensibilidad del transductor. [1]

El transductor es el primer eslabón de la cadena de medición, este debería reproducir exactamente las características de la magnitud que se desea medir. De aquí que la selección y el montaje del transductor sea una de las decisiones más importantes en el análisis de vibraciones.

Si la señal que entrega el sensor es inexacta, con ruido, o contiene errores debido a la selección del transductor, al montaje o las conexiones eléctricas, entonces ni con el mejor equipo de análisis de vibraciones se obtendrán resultados correctos, simplemente no se pueden obtener buenos resultados de malas señales vibratorias medidas.[1]

Hay cuatro tipos de sensores transductores de vibraciones:

- Sensores de desplazamiento sin contacto.
- Sensores de desplazamiento con contacto.
- Velocímetros.
- Acelerómetros.

2.3.2.1) Acelerómetro.

El sensor de aceleración más usado es el de tipo piezoeléctrico. Estos transductores utilizan las propiedades piezoeléctricas de ciertos materiales cerámicos como el cuarzo. Dichos materiales tienen una distribución asimétrica de carga interna, de manera que al aplicarles una fuerza externa en la dirección de su polarización se desarrolla una carga eléctrica entre sus superficies, generando una diferencia de potencial entre ellas. La carga (y voltaje) es proporcional a la fuerza aplicada. Estos acelerómetros son diseñados para trabajar en los dos modos, modo compresión y modo de corte.

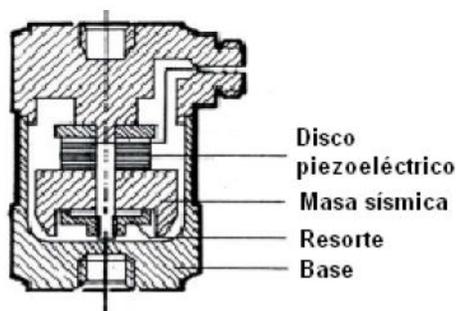


Figura N°4: Acelerómetro. (ref:[1])

2.3.3) Acondicionamiento de la señal.

Todos los datos usados en el monitoreo de la condición de las máquinas rotatorias contienen algún tipo de acondicionamiento de la señal. Para entender el comportamiento y características de esta instrumentación, es importante que el analista de vibraciones se familiarice con algunos términos básicos comúnmente encontrados en el acondicionamiento de la señal. [1]

2.4) Técnicas de análisis de vibraciones.

El objetivo del análisis de vibraciones es poder extraer el máximo de información relevante que ella posee. Para esto existen diferentes técnicas de análisis tanto en el dominio tiempo, como en el de frecuencia, las cuales tienen sus propias ventajas para algunas aplicaciones en particular. A continuación se presenta algunas de las técnicas más utilizadas en la inspección de máquinas:

2.4.1) Análisis espectral.

La esencia del análisis espectral es descomponer la señal vibratoria en el dominio del tiempo en sus componentes espectrales en frecuencia. Esto permite, en el caso de las máquinas, correlacionar las vibraciones medidas, generalmente en sus descansos, con las fuerzas que actúan dentro de ella. En la figura 4 ilustra lo anterior. Las vibraciones corresponden a una bomba centrífuga de 5 alabes. Las componentes de frecuencia 1x rpm y 2x rpm se las asocia a un grado de desalineamiento de la bomba con el motor y al desbalanceamiento residual del rotor. La componente de frecuencia 5x rpm proviene de las pulsaciones de presión que genera este tipo de máquinas.[1]

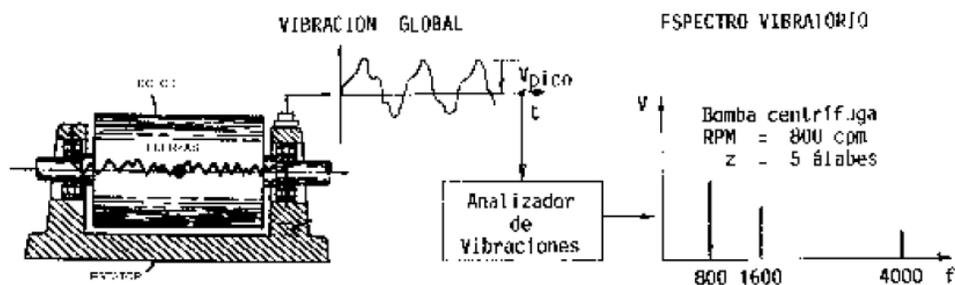


Figura N°5: Análisis espectral.([1])

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS VIBRACIONAL EN BOMBAS CENTRÍFUGAS.

3.1) Introducción

Cuando se habla de análisis vibracional, es una herramienta que se usa principalmente, para prevenir diferentes problemas mecánicos relacionados con los procesos productivos de una planta. Antes en la industria solamente se analizaban máquinas rotatorias con velocidades relativamente grandes, pero los tiempos han cambiado y ahora se pueden analizar hasta máquinas rotatorias de velocidad muy bajas, hasta de 10 rpm.

Para poder realizar un buen estudio del análisis de las vibraciones, se debe saber diferenciar de qué tipo de vibraciones se trata, ya que muchas veces en máquinas rotatorias de plantas productivas el problema no está en la máquina misma, sino que viene de un problema externo.

El análisis en las bombas centrífugas, se vuelve un poco complejo ya que los problemas principalmente son asociados a los problemas de las máquinas rotativas, como lo son desbalanceamiento, desalineamiento, rozamiento, cavitación, flujo inadecuado, etc. Además de que estos problemas traen consigo un deterioro de la máquina que pueden ser captados con anterioridad de que ocurra una falla aún mayor.

3.2) Funcionamiento y componentes de una bomba centrífuga.

Las bombas centrífugas, son siempre rotativas y son de un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor.

Una bomba centrífuga es una máquina que consiste de un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja o cárter, o una cubierta o coraza.

Se denominan así porque la cota de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza de esta misma acción. [2]

Es aquella máquina que incrementa la energía de velocidad del fluido mediante un elemento rotatorio, aprovechando la acción de la fuerza centrífuga, y transformándola a energía cinética, a consecuencia del cambio de sección transversal por donde circula el fluido en la parte estática, la cual tiene forma de voluta o difusor.[2]

3.3) Fallas más comunes en bombas centrífugas.

Las máquinas rotatorias, por lo general pueden clasificar el origen de las vibraciones en dos grupos, que son las vibraciones propias del mismo equipo y el otro por fuerzas externas. Sin embargo la clasificación en bombas se divide en tres grupos, el primero por vibraciones inherentes al funcionamiento del equipo por ejemplo: frecuencia del paso de los álabes, el segundo grupo por fallas comunes por ejemplo: desbalanceo, desalineamiento, etc, y el tercer grupo por fallas por punto de funcionamiento fuera del óptimo, por ejemplo: mal dimensionamiento de ductos, trabajo con bajo caudal, cavitación, etc.

3.3.1) Desbalanceo.

El desbalanceo es la principal fuente de vibración en las máquinas rotatorias y siempre estarán presentes, esto se debe a que el centro de masas de las diferentes secciones transversales de la pieza que componen el equipo no se encuentran sobre el eje de rotación, esto genera fuerzas centrífugas cuando el impulsor gira, lo que lo hace vibrar.[2]

Características:

- La frecuencia de la vibración que genera es a 1X. La falta de linealidad del sistema genera frecuentemente pequeños armónicos
- Las piezas en voladizo pueden generar la segunda armónica 2X y si el desbalanceamiento es demasiado severo, pueden generar hasta la tercera y cuarta armónica.
- La forma de la onda vibratoria debiera ser aproximadamente senoidal, de amplitud constante.
- La diferencia de fase entre la vibración horizontal y vertical será aproximadamente 90° o 270°, debido a la rotación de la fuerza centrífuga que genera la vibración.

3.3.2) Desalineamiento

El desalineamiento de acoplamiento en el conjunto se produce cuando el eje de la bomba que va unido al motor eléctrico no coincide. El desalineamiento puede ser paralelo o angular. [2]

Características:

- El desalineamiento normalmente genera una vibración compuesta por la componente sincrónica 1X y su segunda armónica 2X y ya en menor grado la tercera armónica 3X, aunque un desalineamiento mayor, generará más armónicos nX
- La onda vibratoria puede tener diferentes formas según el número de armónicos que contenga. Los armónicos tienen su origen en la respuesta no lineal del descanso y del acoplamiento debido a la precarga existente.
- El desalineamiento genera una vibración axial significativa, a pesar de que la fuerza axial es pequeña.
- Las vibraciones pueden aumentar, disminuir o permanecer constante al variar la velocidad de giro.
- Las vibraciones radiales son predominantes en la dirección del desalineamiento, es decir si el desalineamiento es vertical, la vibración radial predominante será la vertical.

3.3.3) Solturas mecánicas

Las solturas mecánicas solo permiten que haya mayor vibración, dentro de las solturas mecánicas tenemos los siguientes casos. [2]

- Pernos de sujeción de la bomba a la base sueltos.
- Juego radial excesivo en los descansos hidrodinámicos o rodamientos
- Grieta en la estructura de la máquina o en el pedestal que soporta el descanso.
- Impulsor suelto en el eje, o con suficiente ajuste por interferencia.
- Otros componentes del equipo suelto.
- Insuficiente apriete de la camisa del descanso

Características

- Las solturas mecánicas se caracterizan generalmente por un espectro vibratorio con gran cantidad de armónicos, mientras mayor sea la soltura, mayor serán los armónicos.

- Las soldaduras mecánicas a veces también generan subarmónicas a fracciones enteras de la velocidad de giro por ejemplo $1/2X$ o $1/3X$ y múltiplos de ellos.
- Rodamientos sueltos en su alojamiento o con mucho juego radial.
- Las vibraciones son generalmente radiales
- Forma de onda en el tiempo irregular.

3.3.4) Rozamiento

Muchas máquinas son susceptibles a la presencia de rozamientos. Este fallo puede ser debido al roce del eje contra el metal antifricción de un casquillo de cojinete, los rodillos o un elemento rodante rozando contra las pistas, o alguna parte del rotor rozando contra la carcasa. [2]

Características.

- Ocurre en frecuencias muy bajas
- Es casi seguro el fallo de la máquina, ya que muchos sistemas de monitoreo no detectan el defecto ya que no captan frecuencias muy bajas.

3.3.5) Resonancia.

Se produce cuando la frecuencia de las fuerzas de excitación coinciden con alguna frecuencia natural de vibrar de algún elemento. [2]

Características.

- La frecuencia de la vibración a las velocidades críticas es a $1X$.
- La forma de onda es senoidal para sistema con poco amortiguamiento donde se generan vibraciones a la frecuencia de resonancia.
- Al aumentar o disminuir la velocidad del equipo las vibraciones disminuirán significativamente.

3.3.6) Cavitación

Cuando un líquido fluye a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, el líquido hierve y forma burbujas de vapor. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de alta presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, aplastándose bruscamente las burbujas. [2]

La vibración generada es aleatoria, y posee gran cantidad de armónicos.

3.3.7) Pulsaciones de presión

Esta es principalmente originada por cambios en el rango de presión, lo cual da origen al desarrollo de una fuerza hidráulica, presente no solo en bombas sino también en compresores y ventiladores. La explicación del fenómeno radica en que un álabe al pasar cada vez por una parte fija, en este caso al difusor, la parte estacionaria genera un cambio en la presión. [2]

3.3.8) Starvation o bajo nivel de llenado del rotor.

La hambruna de una bomba, ocurre cuando un líquido no llena completamente el interior del impulsor en una revolución, produciéndose un desbalanceamiento de masa del fluido dentro del rodete. Tiene un espectro aleatorio, con una componente armónica 1X muy elevada. [2]

3.3.9) Turbulencias de flujo.

La razón principal se asocia a un mal diseño de ductos y cañerías. La causa son los cambios bruscos de dirección, la componente no presenta una gran componente en amplitud, a no ser que se presente resonancia. El espectro vibratorio es similar al de cavitación, pero la componente armónica 1X es de menor valor. [2]

CAPÍTULO 4: MONTAJE DEL BANCO DE ENSAYOS Y EQUIPOS DE MEDICIÓN.

4.1) Introducción.

A continuación se realizan dos ensayos en un banco de pruebas, considerando dos bombas centrífugas para este experimento, y para luego analizar cada una de las variables en estudio, con el fin de determinar el comportamiento que se generan al variar el caudal.

Luego, se verificara qué relación existe con los Espectros 1X y Espectro número de álabes y el valor RMS para cada una de las bombas en estudio (modelo EBARA y Century), con respecto a la curva de rendimiento, de esta manera ver cómo afecta las pulsaciones de presiones en las vibraciones mecánicas.

4.2) Descripción del banco de ensayos y sus elementos.

Se dispone de un banco de ensayos (Figura N°6), el cual está preparado de manera que no presente mayores pérdidas de carga en el tramo de succión y salida (pérdidas singulares y regulares), así poder obtener una menor incertidumbre de las mediciones y lograr un mejor análisis de las variables en estudio.



Figura N°6: Banco de ensayo.

4.2.1) Bomba EBARA

Las especificaciones técnicas de esta bomba son; bomba centrífuga, modelo EBARA con un motor monofásico de 0.5HP, con H útil máx. 22 m y min 15m. Esta se encuentra anclada a una base para con soportes de goma.

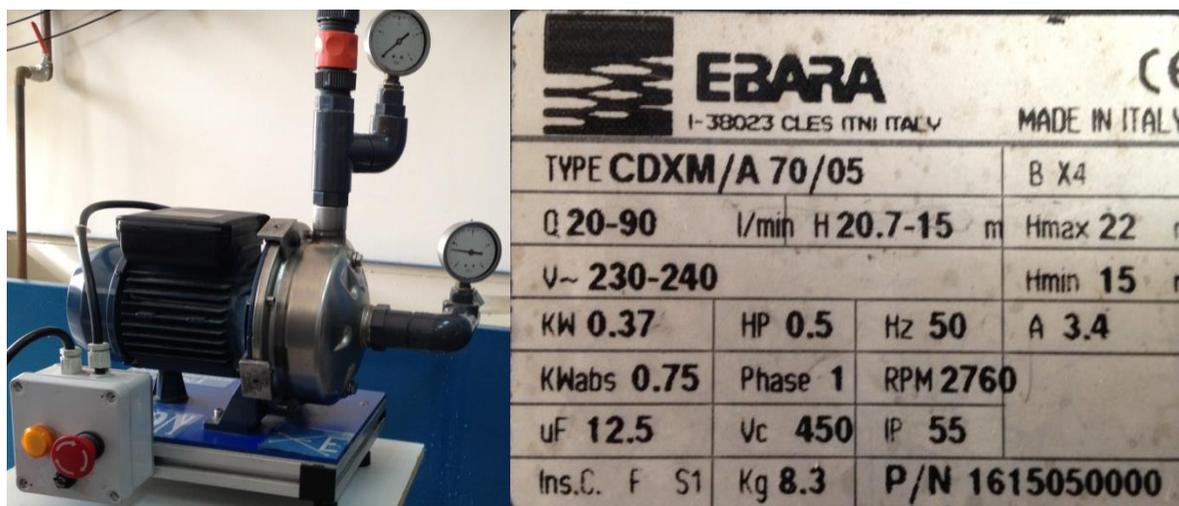


Figura N°7: Bomba EBARA. [3]

4.2.2) Bomba CENTURY.

El sistema está compuesto por una bomba centrífuga, modelo CENTURY, con un motor monofásico de 0.5HP, anclada a una base de madera no muy aislada. Esta bomba a diferencia de otras está unida a un machón para que la potencia del motor pase a ella.



Figura N°8: Bomba CENTURY.[3]

4.2.3) Manómetro.

A la salida y a la entrada de agua de las bombas se disponen de manómetros, en la entrada se necesita un manómetro de succión, es decir, un manómetro con presiones en vacío. Los manómetros se encuentran en Bar.



Figura N°9: Manómetros y vacuomanómetro. [3]

4.2.4) Válvula reguladora de caudal.

En la salida de las bombas centrífugas, hay una válvula reguladora que permite variar los caudales al momento de medir.



Figura N°10: Válvula reguladora de caudal.[3]

4.2.5) Amperímetros

Para medir la potencia suministrada, se utilizan 2 Amperímetros, uno análogo y otro digital para poder comparar y además obtener una buena medición de esta, la corriente suministrada es de 220V.



Figura N°11: Amperímetros. [3]

4.2.6) Estanque de succión y de descarga.

Este estanque consta de dos compartimientos, uno de succión que contiene suficiente agua para el ensayo y otro de descarga que va indicando el nivel de llenado (salida de la bomba), en este último compartimiento se realiza el aforo volumétrico variando el caudal.

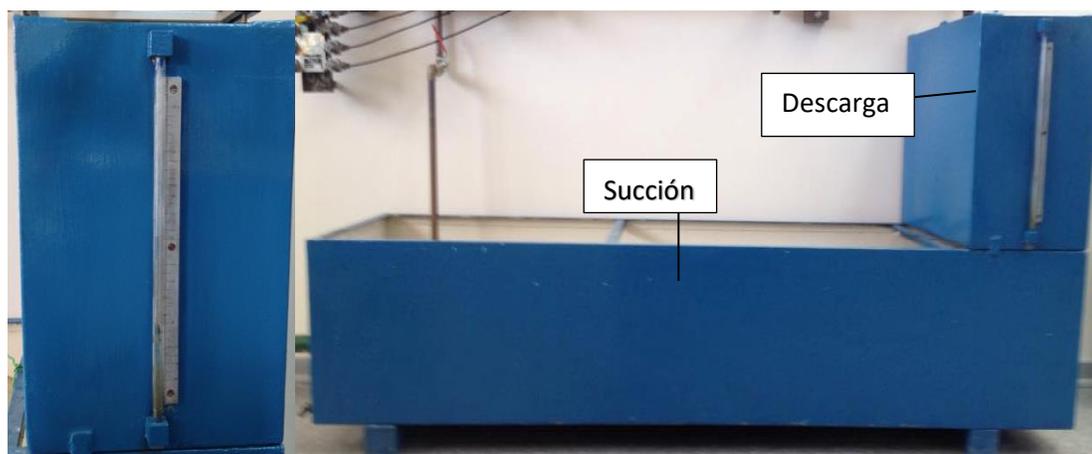


Figura N°12: Estanque de succión y descarga. [3]

4.3) Equipos de medición de vibraciones [4]

Para la medición de vibraciones por lo general se usan acelerómetros en tres direcciones, horizontal (x), vertical (y) y axial (z), pero para este caso se mide solo en 2 direcciones horizontal y vertical, ubicando los acelerómetros en la zona perimetral superficial del rotor de la bomba mostrado en la figura N°13, el cual estos acelerómetros captan la señal, enviándolas a una tarjeta de adquisición de datos mostrado en la figura N°14, y por consiguiente a la computadora para ser procesados a través del software “labview de la National Instruments.”



Figura N°13 Ubicación de los acelerómetros en forma horizontal y vertical.

4.3.1) Tarjeta de adquisición de datos.



NI 9234



Figura N°14 Tarjeta adquisición de datos NI 9234 National instruments.

4.3.2) Acelerómetros



Figura nº15: Acelerómetro 2769-3096.[5]

CAPÍTULO 5: MEDICIONES Y RESULTADOS.

5.1) Introducción

Luego de tener todo el equipo montado, se mide haciendo variar el caudal para 3 ensayos diferentes para cada una de las bombas, y determinar a partir de ellos las variables de interés (Caudal, H útil, rendimiento, valor RMS, espectros 1X y número de álabes, etc.), haciendo uso de la mecánica de fluidos, que a continuación se muestran las ecuaciones a utilizar, y para los valores generados por las vibraciones, se obtienen a través del software LABVIEW, mencionado anteriormente.

5.2) Ecuaciones. [5]

- Cálculo de H útil (m)

$$H = \frac{P_s - P_e}{\gamma_{\text{agua}}} \quad (\text{m}) \quad (\text{ec. 1})$$

Dónde: P_s : Presión de salida de la bomba.

P_e : Presión de entrada de la bomba.

γ_{agua} : Peso específico del agua.

- Cálculo de caudal Q (m^3/s)

$$Q = \frac{V}{t} \quad \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \quad (\text{ec. 2})$$

Dónde: V : volumen (m^3).

t : tiempo (s)

- Cálculo de Volumen $V(m^3)$

$$V = Ancho\ af. \times Largo\ af. \times Altura\ af \quad (ec\ 3)$$

- Calculo potencia del fluido $Pf (W)$

$$Pf = H * Q * \gamma (W) \quad (ec. 4)$$

- Calculo de potencia eléctrica $Pelec (W)$

$$Pelec = 220 * I (W) \quad (ec. 5)$$

Dónde: I: intensidad de la corriente (A)

- Calculo de Rendimiento $\eta (\%)$

$$\eta = \frac{Pf}{Pelec} * 100 (\%) \quad (ec. 6)$$

5.3) Altura útil H (m) y Rendimiento $\eta (\%)$

5.3.1) Bomba EBARA.

En las siguientes tablas N°1, N°2, N°3 se muestra los valores obtenidos de 3 series de mediciones correspondientes. A partir de ellas se determinan las curvas H útil (m) y Rendimiento $\eta (\%)$ versus caudal.

Medición 1 Bomba EBARA										
Q (m ³ /s)	h (cm)	V (V)	Pe (bar)	Ps (bar)	I (A)	t (s)	H útil (m)	Nf (W)	Pelec (W)	Rend (%)
7,97E-04	2	220	-0,90	0	2,5	5,11	9,00	71,72	550	13,04
8,41E-04	2	220	-0,80	0,3	2,6	4,84	11,00	92,55	572	16,18
7,61E-04	2	220	-0,80	0,5	2,8	5,35	13,00	98,95	616	16,06
7,47E-04	2	220	-0,68	0,8	2,6	5,45	14,80	110,59	572	19,33
6,79E-04	2	220	-0,38	1	2,4	6	13,80	93,66	528	17,74
5,58E-04	2	220	-0,35	1,4	2,4	7,3	17,50	97,62	528	18,49
5,34E-04	2	220	-0,30	1,5	2,4	7,62	18,00	96,20	528	18,22
2,90E-04	1	220	-0,18	1,8	2,25	7,01	19,80	57,51	495	11,62
1,40E-04	1	220	-0,09	2	2,1	14,54	20,90	29,27	462	6,34

Tabla N°1 Medición 1 Bomba EBARA.

Medición 2 Bomba EBARA										
Q (m³/s)	h (cm)	V (V)	Pe (bar)	Ps (bar)	I (A)	t (s)	H útil (m)	Nf (W)	Pelec (W)	Rend (%)
9,43E-04	2	220	-0,95	0	2,6	4,32	9,50	89,55	572	15,66
9,36E-04	2	220	-0,82	0,3	2,4	4,35	11,20	104,85	528	19,86
9,11E-04	2	220	-0,82	0,5	2,6	4,47	13,20	120,26	572	21,02
7,89E-04	2	220	-0,72	0,8	2,6	5,16	15,20	119,96	572	20,97
7,70E-04	2	220	-0,59	1	2,6	5,29	15,90	122,40	572	21,40
6,88E-04	2	220	-0,40	1,3	2,5	5,92	17,00	116,94	550	21,26
6,10E-04	2	220	-0,30	1,5	2,4	6,68	18,00	109,73	528	20,78
3,82E-04	2	220	-0,20	1,8	2,2	10,66	20,00	76,40	484	15,79
1,82E-04	1	220	-0,10	2	2,1	11,19	21,00	38,21	462	8,27

Tabla N°2. Medición 2 Bomba EBARA.

Medición 3 Bomba EBARA										
Q (m³/s)	h (cm)	V (V)	Pe (bar)	Ps (bar)	I (A)	t (s)	H útil (m)	Nf (W)	Pelec (W)	Rend (%)
8,70E-04	2	220	-0,95	0	2,6	4,68	9,50	82,66	572	14,45
8,26E-04	2	220	-0,80	0,4	2,6	4,93	12,00	99,12	572	17,33
7,95E-04	2	220	-0,80	0,6	2,6	5,12	14,00	111,35	572	19,47
8,61E-04	2	220	-0,65	0,8	2,6	4,73	14,50	124,84	572	21,82
7,21E-04	2	220	-0,58	1	2,6	5,65	15,80	113,88	572	19,91
6,47E-04	2	220	-0,40	1,3	2,6	6,29	17,00	110,06	572	19,24
5,45E-04	2	220	-0,30	1,5	2,6	7,47	18,00	98,13	572	17,16
3,19E-04	1	220	-0,20	1,8	2,2	6,38	20,00	63,83	484	13,19
1,55E-04	1	220	-0,10	2	2,1	13,16	21,00	32,49	462	7,03

Tabla N°3. Medición 3 Bomba EBARA.

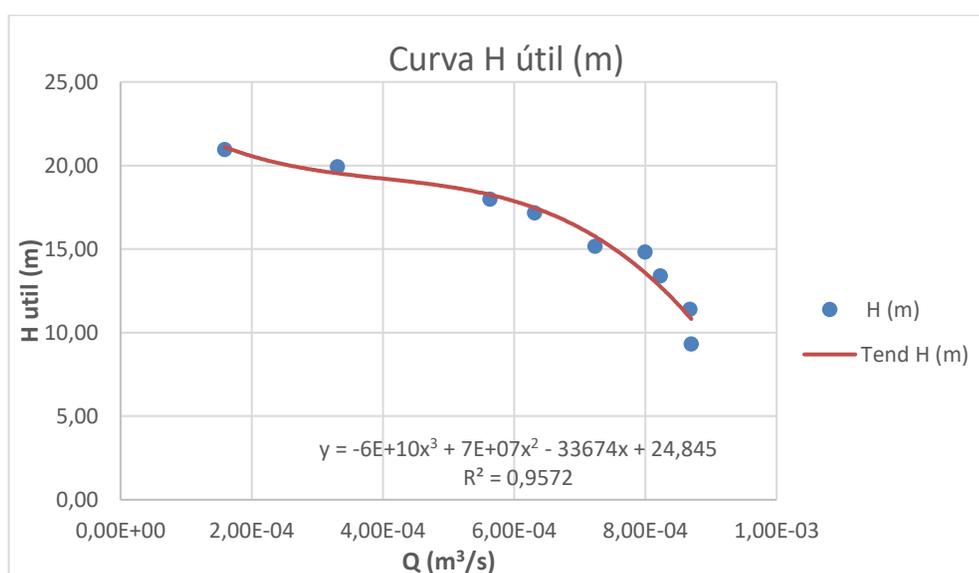


Figura N°16: Curva Caudal (m³/s) vs H útil (m) de la bomba EBARA.

A partir de todas la mediciones, se realiza un gráfico de dispersión para todos los datos ordenados, generando un polinomio de grado 3 para la curva de H útil que se muestra en la Figura N° 16, con un R^2 igual a 0,84.

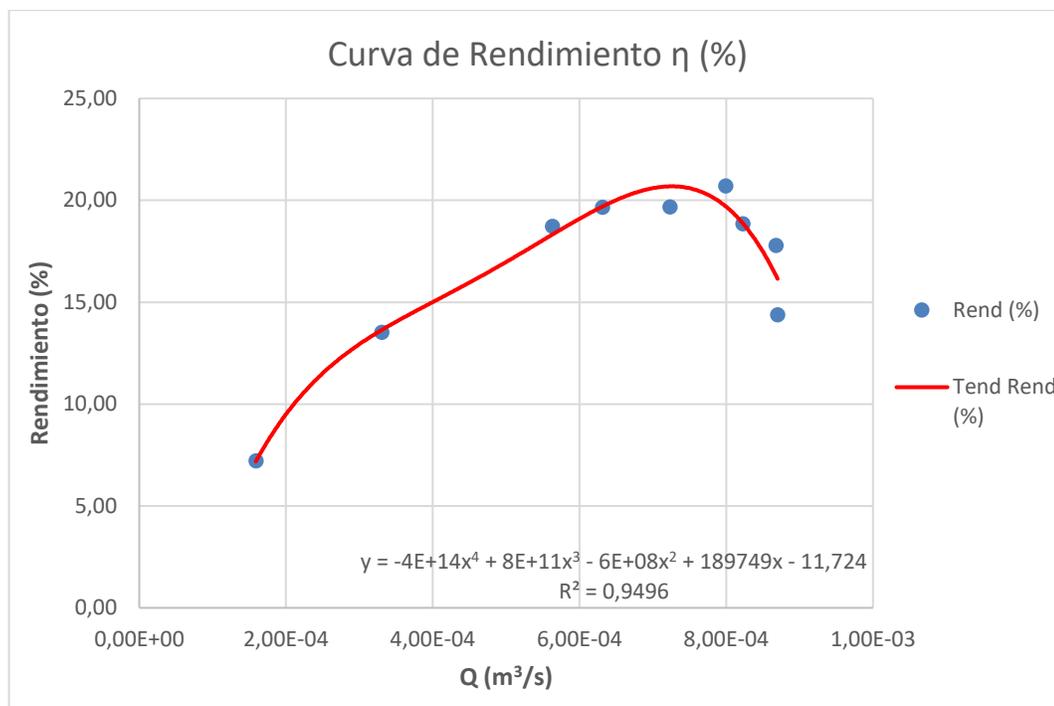


Figura N°17: Curva Rendimiento, para la bomba EBARA

En la figura N°17, se muestra una curva de dispersión para todos los datos ordenados de rendimiento v/s Caudal, además se puede observar en la zona de altos caudales, una mayor incertidumbre, por ende presentando una mayor desviación estándar y error, debido a las condiciones de medición poco precisas (tiempo de medición aforo volumétrico en los altos caudales, etc.)

5.3.2) Bomba CENTURY

En las siguientes tablas N°4, N°5, N°6 se muestra los valores obtenidos de 3 mediciones correspondientes, que a partir de ellas se determina las curvas H útil (m) y Rendimiento η (%) versus caudal Q (m³)

Medición 1 Bomba Century											
Q (m ³ /s)	h (cm)	V (V)	Pe (in hg)	Pe (bar)	Ps (bar)	I (A)	t (s)	H útil (m)	Nf (W)	Pelec (W)	Rend (%)
3,70E-04	2	220	-6	-0,20	0,5	4,1	11	7,03	26,03	902	2,89
3,38E-04	2	220	-5	-0,17	1	4,2	12,05	11,69	39,52	924	4,28
2,87E-04	2	220	-4	-0,14	1,5	4,2	14,17	16,35	47,00	924	5,09
2,37E-04	2	220	-4	-0,14	2,1	4,1	17,18	22,35	52,99	902	5,87
2,16E-04	1	220	-4	-0,14	2,4	4,25	9,41	25,35	54,86	935	5,87
1,70E-04	1	220	-4	-0,14	2,7	4,25	12	28,35	48,11	935	5,15
1,68E-04	1	220	-4	-0,14	3	4,3	12,13	31,35	52,63	946	5,56
1,37E-04	1	220	-3,5	-0,12	3,4	4,3	14,88	35,19	48,15	946	5,09
1,34E-04	1	220	3,5	0,12	3,6	4,35	15,2	34,81	46,64	957	4,87

Tabla N°4 Medición 1 Bomba Century

Medición 2 Bomba Century											
Q (m ³ /s)	h (cm)	V (V)	Pe (in hg)	Pe (bar)	Ps (bar)	I (A)	t (s)	H útil (m)	Nf (W)	Pelec(W)	Rend (%)
4,52E-04	2	220	-5,8	-0,20	0	4,05	9	1,96	8,89	891	1,00
3,72E-04	2	220	-5,3	-0,18	0,6	4,1	10,95	7,80	28,99	902	3,21
3,70E-04	2	220	-5	-0,17	1	4,1	11	11,69	43,29	902	4,80
3,09E-04	1	220	-4	-0,14	1,5	4,15	6,6	16,35	50,46	913	5,53
2,62E-04	1	220	-3,8	-0,13	2,1	4,2	7,76	22,29	58,48	924	6,33
2,18E-04	1	220	-3,2	-0,11	2,4	4,2	9,35	25,08	54,63	924	5,91
1,88E-04	1	220	-3	-0,10	2,8	4,2	10,82	29,02	54,60	924	5,91
1,45E-04	1	220	-2,8	-0,09	3,2	4,2	14	32,95	47,92	924	5,19
1,28E-04	1	220	-2,2	-0,07	3,62	4,2	15,95	36,95	47,16	924	5,10

Tabla N°5 Medición 2 Bomba Century

Medición 3 Bomba Century											
Q (m ³ /s)	h (cm)	V (V)	Pe (in hg)	Pe (bar)	Ps (bar)	I (A)	t (s)	H útil (m)	Nf (W)	Pelec(W)	Rend (%)
4,27E-04	2	220	-5,8	-0,20	0	3,9	9,54	1,96	8,39	858	0,98
3,66E-04	2	220	-5	-0,17	0,5	3,9	11,13	6,69	24,49	858	2,85
3,29E-04	2	220	-4	-0,14	1	3,95	12,39	11,35	37,32	869	4,29
2,77E-04	1	220	-4	-0,14	1,5	4	7,36	16,35	45,25	880	5,14
2,43E-04	1	220	-3,8	-0,13	2	4	8,38	21,29	51,72	880	5,88
1,90E-04	1	220	-3,2	-0,11	2,4	4,05	10,72	25,08	47,64	891	5,35
1,74E-04	1	220	-3	-0,10	2,8	4,05	11,68	29,02	50,58	891	5,68
1,41E-04	1	220	-2,6	-0,09	3,2	4,1	14,47	32,88	46,27	902	5,13
1,24E-04	1	220	-2,2	-0,07	3,6	4,1	16,44	36,75	45,51	902	5,05

Tabla N°6 Medición 3 Bomba Century.

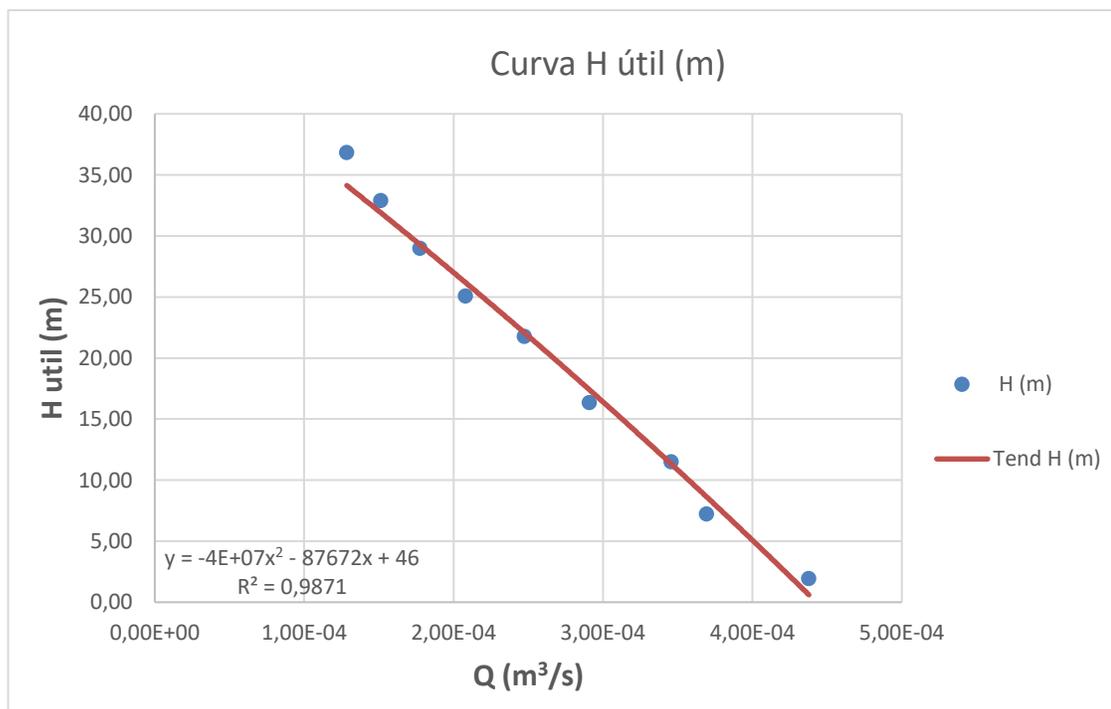


Figura N°18. Curva Caudal (m³/s) vs H útil (m), de la bomba CENTURY.

A diferencia de la curva anterior (Figura N°16), se puede destacar de esta curva una baja dispersión de los valores, dando como producto un R² de 0,96 siendo una tendencia bastante aceptable.

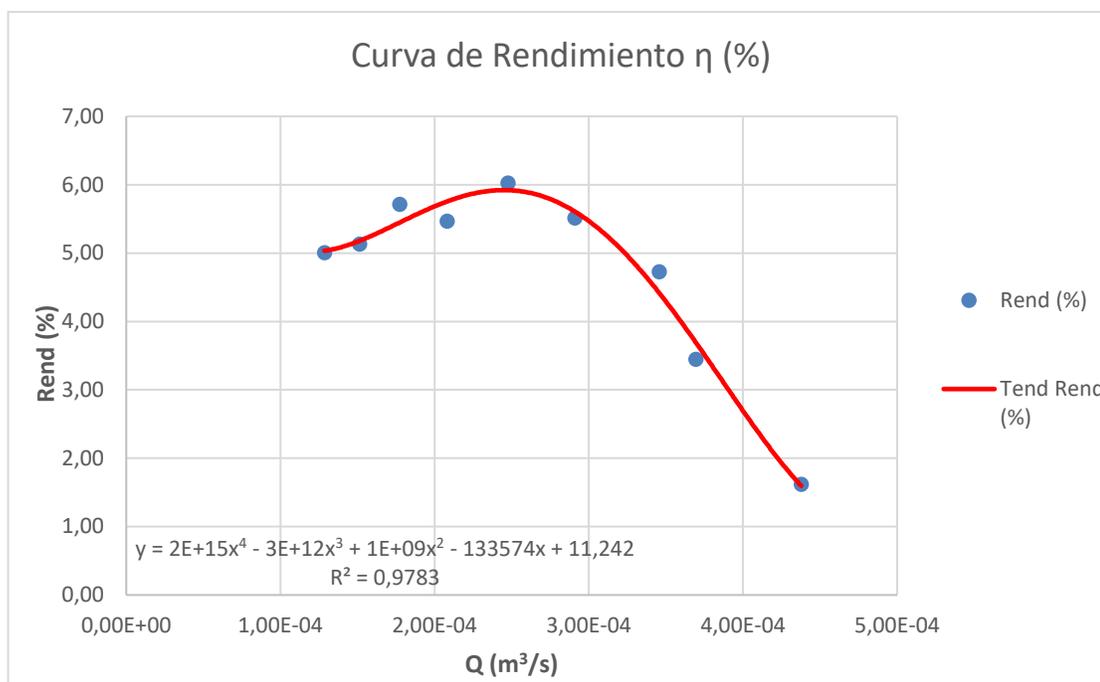


Figura N°19: Curva Rendimiento, de la bomba CENTURY

Para la figura N°19 presenta un mayor rendimiento para caudales medios a bajos a diferencia de la bomba anterior (Figura N°17). Además la bomba CENTURY en general posee menor rendimiento, ya que la bomba EBARA posee un máximo rendimiento de 20,7% a comparación de esta que posee un 6 % de máximo rendimiento.

5.4) Mediciones de espectros

Para determinar los valores de los espectros, se utiliza el software LABVIEW, el cual lee los datos obtenidos de cada señal en aceleración, y por medio de la programación se integran estas señales arrojando como resultado la velocidad en mm/s, para luego ser trasformada en función de las frecuencias por medio de la FFT (transformada rápida de Fourier) y de esta manera determinando los espectros para cada bomba a diferentes caudales.

Luego de obtener los valores espectrales, se estudia solo los valores de los espectros 1X y número de álabes, el cual a partir de ellos determinar si existe alguna relación con respecto al rendimiento, y de forma más particular ver qué relación tienen las pulsaciones de presiones generadas en el espectro número de álabes.

A continuación se muestra como se determina la frecuencia paso de los álabes F_p (hz), y de ésta manera identificar la amplitud de cada gráfico como se muestra en la figura N°20.

$$F_p = Z * n \text{ (Hz)} \quad [2]$$

Dónde:

F_p = Frecuencia al paso de los álabes.

Z = Número de álabes.

n = RPM del motor.

N° de álabes	
Bomba	N°
EBARA	5
Century	6

Estos son los valores de frecuencias 1X y paso de los alabes para cada una de las bombas EBARA y Century que corresponden al armónico 5X y 6X respectivamente.

Bomba	RPM	1X (Hz)	F_p (Hz)
EBARA	2760	46	230
Century	2940	49	294

Tabla N°7: Frecuencia 1X y paso de los álabes.

5.4.1) Espectro bomba EBARA.

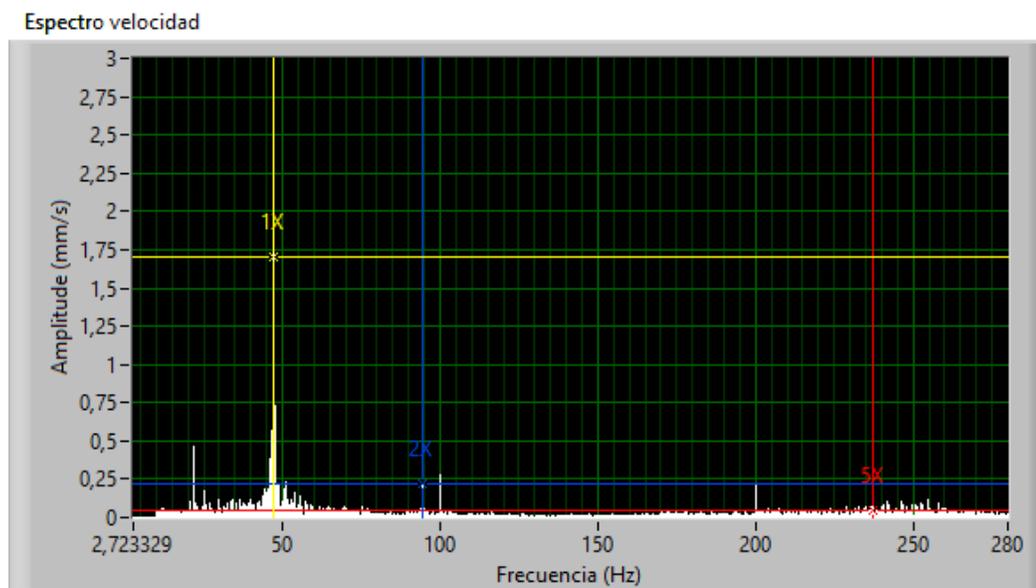


Figura N°20: Espectro horizontal de la bomba EBARA

Para esta bomba centrífuga se analiza los espectros hasta los 280 Hz, mostrado en la Figura N°20, presentado los dos armónicos que interesan identificar, los cuales son el 1X (velocidad de rotación) y 5X (espectro del número de alabes), en este último no se pudo identificar claramente, debido a su amplitud es más baja.

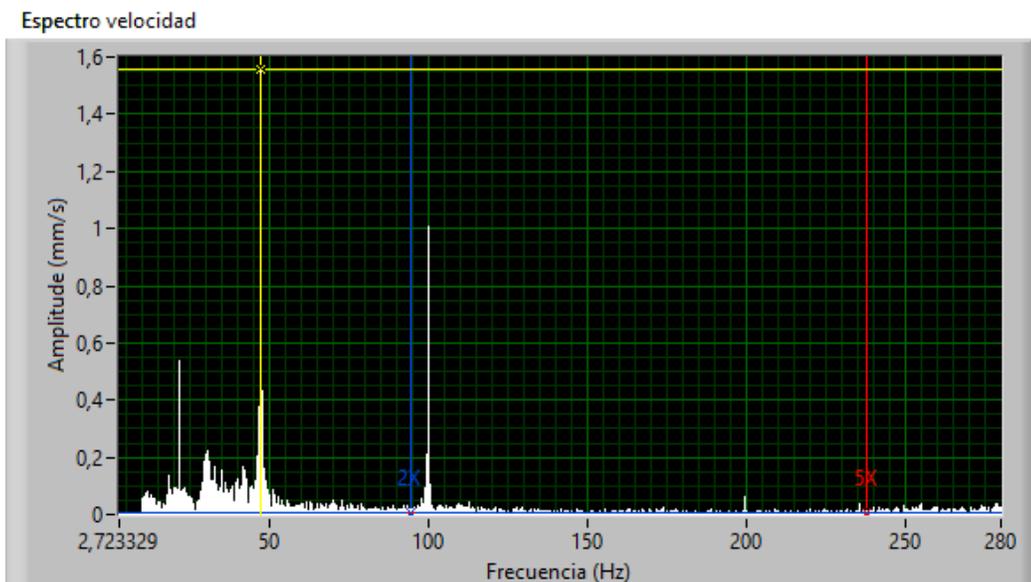


Figura N°21: Espectro vertical de la bomba EBARA.

De la figura N°21 se ve claramente el espectro 1X pero el 5X al igual que en los espectros horizontales, no presenta una amplitud elevada que incluso no se distingue con claridad, indicando que las pulsaciones de presión son poco significativas en este caso.

5.3.2) Espectro Bomba CENTURY.

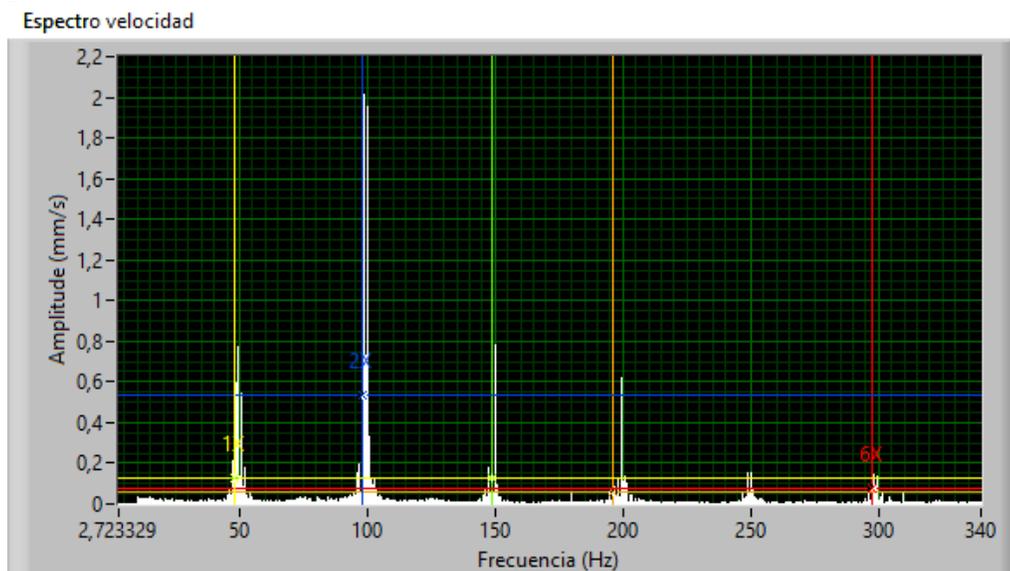


Figura N°22: Espectro horizontal de la bomba CENTURY.

De la figura N°22, se analiza solo hasta 340 Hz, en donde se observa el espectro 1X y 6X (espectro número de álabes) con una amplitud bastante baja, pero a medida que se va regulado el caudal estas comienzan a variar en su amplitud como se muestra en las tablas N° 11, 12 y 13.

Obs: los espectros 1X, 2X, 3X y 4X como se muestran en la figura N°22, están un poco alejados de las barras que presentan mayores amplitudes, ya que estas alteraciones son provocadas por algún problema eléctrico, debido a que la corriente eléctrica circula a una frecuencia de 50 Hz.

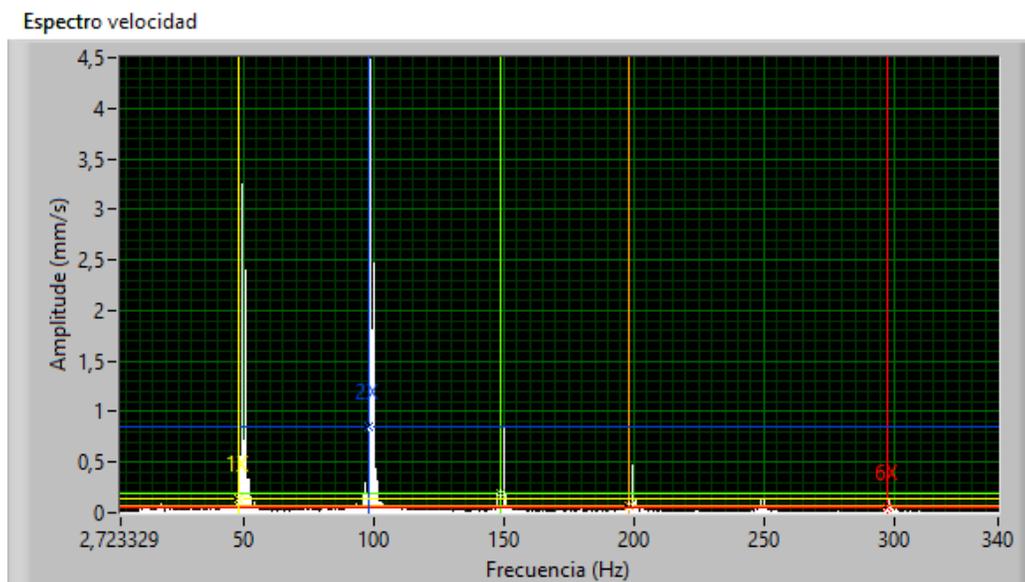


Figura N°23: Espectro vertical de la bomba CENTURY.

5.4) Resultados Valor RMS, Frecuencia 1X y Frecuencia número de álabes.

Para los siguientes resultados se toman tres mediciones para cada bomba en estudio, extrayendo los valores RMS, espectro 1X y espectro número de álabes con sus respectivas frecuencias, siendo todas las variables directamente relacionadas a los diferentes caudales que se muestran en la tabla N°1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Cada uno de estas variables (valor RMS, espectro 1X y número de álabes) se ordenan con respecto a los caudales de forma descendente, y como se trata de un estudio experimental se requiere una mayor veracidad, determinando el grado de incertidumbre que poseen cada una de estas variables, haciendo uso de métodos estadísticos básicos, los cuales son; desviación estándar y Δ error.

5.4.1) Bomba EBARA.

A continuación, en tablas N° 8, 9, 10 se muestran las mediciones correspondiente a valor RMS, espectros 1X y 5X (espectro N° de álabes), por consiguiente, las curvas de cada una de ellas mostrando la incertidumbre a través de las barras de Δ error.

Medición 1 Bomba EBARA de espectros y valor RMS							
Vrms h (mm/s)	Vrms v (mm/s)	1x h (mm/s)	1x v (mm/s)	5x h(mm/s)	5x v (mm/s)	Frec 1X (hz)	Frec 5X (hz)
2,15733	3,09871	1,97861	2,959545	0,081856	0,039461	47,25	235,75
1,14858	1,60190	1,26342	1,722317	0,055477	0,026743	47,25	236
1,22844	1,84444	1,26884	1,827407	0,049773	0,011971	47,25	236,25
1,47290	2,05238	1,56228	2,038621	0,042342	0,019534	47	235,5
1,91921	2,97170	2,18707	3,339314	0,037597	0,019488	47,25	235,5
1,97649	3,61247	2,35527	4,410929	0,032133	0,015717	47,25	236,75
1,41775	2,28155	1,77078	2,814361	0,015172	0,007696	47,5	235,25
0,86925	1,13728	1,03029	1,299310	0,013976	0,011182	47,75	236
0,64328	0,72815	0,44685	0,391295	0,017401	0,013610	48	236,5

Tabla N° 8 Medición 1 Bomba EBARA de espectros y valor RMS.

Medición 2 Bomba EBARA de espectros y valor RMS							
Vrms h (mm/s)	Vrms v (mm/s)	1x h (mm/s)	1x v (mm/s)	5x h(mm/s)	5x v (mm/s)	Frec 1X (hz)	Frec 5X (hz)
1,57503	1,96672	1,2025098	1,55842641	0,089701	0,037575	47,25	235,75
1,22163	1,70242	1,44902529	1,94928624	0,041085	0,028370	47,25	236
1,25755	1,88212	1,35710559	1,96578666	0,040005	0,015153	47,25	236,25
1,44713	2,10341	1,49836959	2,07519759	0,030531	0,019953	47	235,5
1,87515	2,67541	1,91009529	2,62215414	0,039450	0,018161	47	235,5
1,98853	3,72657	2,64455037	4,95075384	0,041309	0,016510	47,25	236,5
1,60524	2,79953	2,07928836	3,51613944	0,028452	0,013784	47,25	236,5
1,03756	1,27532	1,15791354	1,53078183	0,026446	0,019864	47,75	238,75
0,99347	0,85921	0,63822879	0,65620071	0,030016	0,023802	48	239,75

Tabla N° 9 Medición 2 Bomba EBARA de espectros y valor RMS.

Medición 3 Bomba EBARA de espectros y valor RMS							
Vrms h (mm/s)	Vrms v (mm/s)	1x h (mm/s)	1x v (mm/s)	5x h(mm/s)	5x v (mm/s)	Frec 1X (hz)	Frec 5X (hz)
2,73962	4,23069	2,75470686	4,36066272	0,074012	0,041347	47,25	237,25
1,07552	1,50137	1,07780508	1,49534811	0,069870	0,025116	47,25	235,75
1,19933	1,80675	1,18056483	1,68902694	0,059541	0,008788	46,75	236
1,49867	2,00135	1,62619389	2,00204442	0,054152	0,019115	47	235,5
1,96326	3,26798	2,46403656	4,05647424	0,035745	0,020815	47,25	236
1,96444	3,49836	2,065986	3,87110448	0,022956	0,014925	47,25	236,75
1,23026	1,76356	1,46226879	2,1125835	0,001891	0,001608	47,5	235,25
0,70093	0,99923	0,90266715	1,06783812	0,001507	0,002501	47,75	236
0,29309	0,59708	0,25546613	0,1263891	0,004787	0,003417	48	236,5

Tabla N°10 Medición 3 Bomba EBARA de espectros y valor RMS.

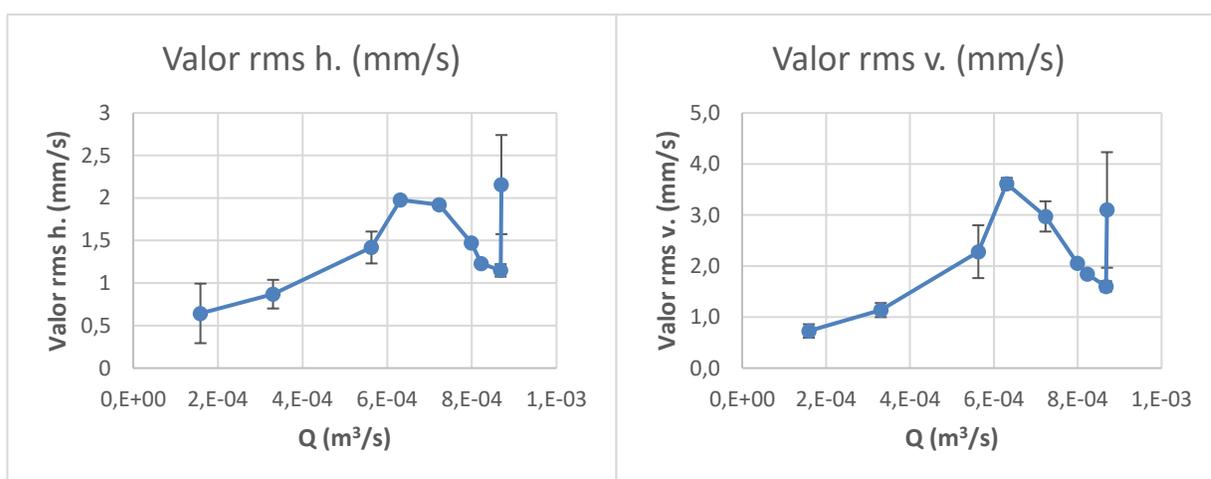


Figura N°24 Curvas Valor RMS, horizontal y vertical de la bomba EBARA.

De la figura N°24 se puede observar en el ámbito estadístico en ambas curvas tanto vertical como horizontal, una tendencia a presentar un mayor Δ error para el caudal $8,7E-4$ (m^3/s), y un menor error para el caudal $6,31E-4$ (m^3/s). En el ámbito vibratorio, la máxima amplitud ocurre en el caudal $6,31E-4$ (m^3/s) con un valor máximo de $3,61$ (mm/s), el mínimo valor ocurrió en caudal $8,68 E-4$ (m^3/s).

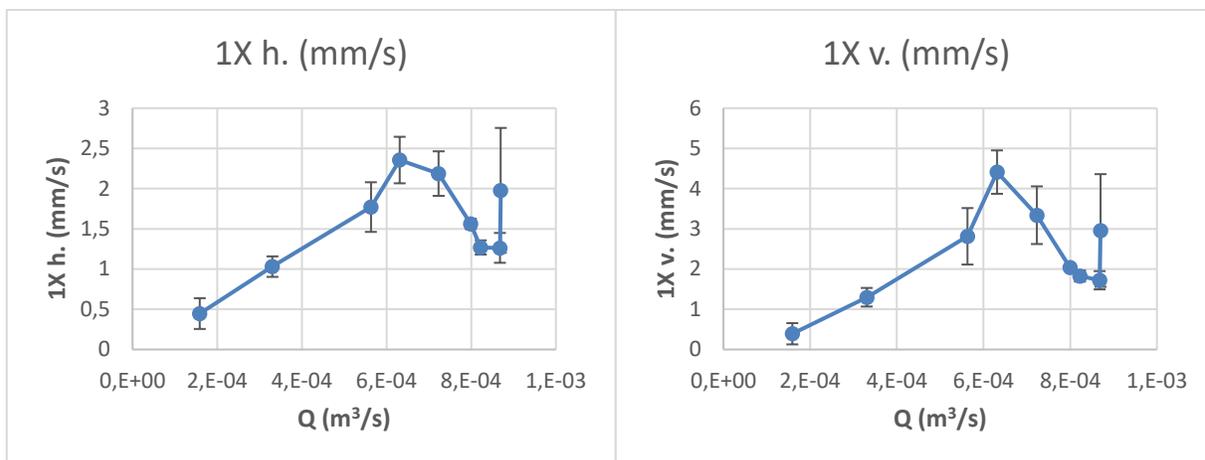


Figura N°25 Curvas Espectro 1X, horizontal y vertical de la bomba EBARA.

Para las curvas mostradas en la figura N°25, se observa al igual que la figura N°24 presenta un mayor Δ error en los mismos caudales, y en el ámbito vibratorio al igual que el caso anterior, la amplitud del espectro 1X disminuye a medida que el caudal disminuye, desde pick máximo que se encuentra a los 6,31E-4 (m³/s).

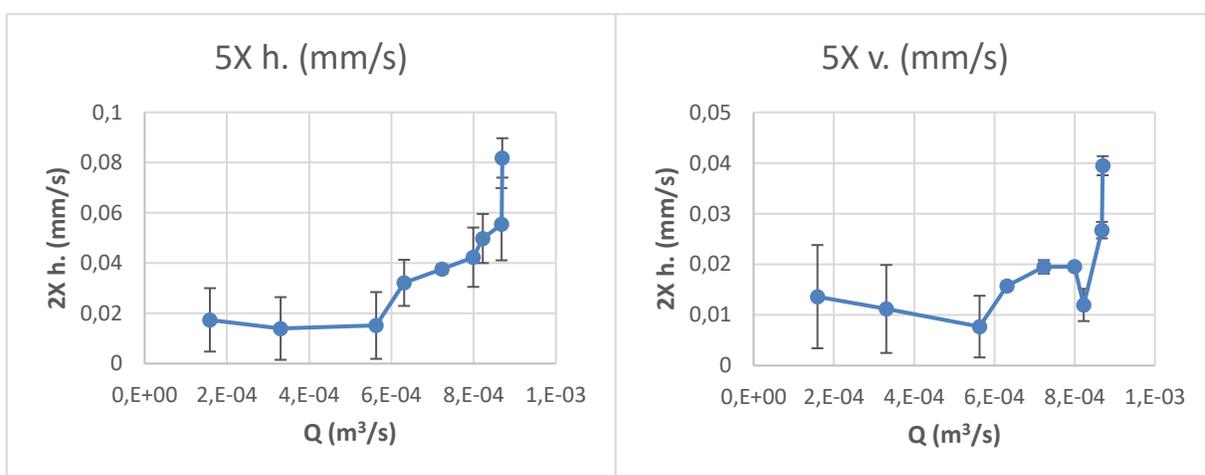


Figura N°26 Curvas Espectro número de álabes (5X), horizontal y vertical de la bomba EBARA.

El comportamiento de los espectros 5X que presenta la figura N°26 se asemeja con respecto a los espectros 1X mostrado en la figura N°25, disminuyendo de forma gradual la amplitud de estos a medida que disminuye el caudal, el mínimo valor de amplitud se encuentra en el caudal de 8,23E-4 (m³/s) con una velocidad de 0,011 (mm/s).

Con respecto a la incertidumbre de esta variable, presenta una mayor Δ error en los caudales de menor valor.

5.4.2) Bomba CENTURY.

A continuación, en tablas N° 11, 12, 13 se muestran las mediciones correspondiente a valor RMS, espectros 1X y 5X (espectro N° de álabes), por consiguiente, las curvas de cada una de ellas mostrando la incertidumbre a través de las barras de Δ error.

Medición 1 bomba Century espectros de espectros y valor RMS							
Vrms h (mm/s)	Vrms v (mm/s)	1x h (mm/s)	1x v (mm/s)	6x h(mm/s)	6x v (mm/s)	Frec 1X (hz)	Frec 6X (hz)
3,42523	5,54739	2,0275906	1,9447316	0,0561786	0,0525094	49,25	298
3,31833	6,50468	1,3800556	2,711121	0,0803227	0,0670369	49,25	297
3,63696	7,07839	1,015084	2,4894156	0,0670862	0,0714971	49,25	296,5
3,60137	7,7429	1,2131028	3,6169546	0,0785347	0,0854033	49	296
3,76493	8,17151	1,1099774	2,9239378	0,0587439	0,0851087	49	296
3,72306	8,02586	0,688352	2,111361	0,0637269	0,123184	49	295,75
3,73079	8,0626	0,6389502	2,0145566	0,04347	0,102959	49	296
3,87956	8,35424	0,5695074	0,555807	0,0453008	0,104589	49	295,5
3,73039	6,21912	1,1818702	0,9569602	0,0723537	0,0909377	48,75	297,75

Tabla N° 11 Medición 1 bomba Century espectros de espectros y valor RMS

Medición 2 Bomba Century espectros de espectros y valor RMS							
Vrms h (mm/s)	Vrms v (mm/s)	1x h (mm/s)	1x v (mm/s)	6x h(mm/s)	6x v (mm/s)	Frec 1X (hz)	Frec 6X (hz)
2,66099	5,39527	0,77412552	3,2454464	0,0745137	0,0520879	49,5	297,25
3,21918	7,25872	1,83309	6,1876318	0,132521	0,16332	49,5	297,75
3,27544	7,58589	1,9825008	7,0513646	0,151558	0,209313	49,25	297,25
3,29406	7,69443	2,1065688	7,6424908	0,147711	0,170522	49,25	297,25
3,58822	8,52559	2,3462964	7,9279648	0,105153	0,172907	49,25	296,75
3,76083	9,35389	1,8327274	5,5656748	0,164665	0,236747	49	296,5
4,09872	11,3874	1,962499	7,1507562	0,239084	0,207688	49	296,25
3,60133	11,0529	1,3134058	6,3916384	0,188933	0,169849	49	296,25
4,14391	10,4071	0,89977818	4,6944058	0,135814	0,136536	48,75	295,5

Tabla N° 12 Medición 2 Bomba Century espectros de espectros y valor RMS

Medición 3 Bomba Century espectros de espectros y valor RMS							
Vrms h (mm/s)	Vrms v (mm/s)	1x h (mm/s)	1x v (mm/s)	6x h(mm/s)	6x v (mm/s)	Frec 1X (hz)	Frec 6X (hz)
4,11757	5,81898	1,0539116	1,947456	0,0637944	0,0880547	49,5	297,75
4,0021	6,01716	1,1290286	1,5602286	0,0812609	0,0626921	49,5	297
4,25994	6,90441	0,75128662	1,7206448	0,157584	0,150609	49,25	297,5
4,46611	7,47709	0,72843596	2,286879	0,141081	0,126293	49,25	297,75
4,13173	9,17812	1,2782532	5,6538356	0,195956	0,137046	49,25	297,25
4,51406	8,94122	0,88846604	3,9671086	0,395046	0,159181	49,25	296,5
4,53116	8,91048	1,0666516	4,6139772	0,247685	0,0976921	49	296
4,19814	8,86396	0,50300852	3,1159394	0,234364	0,0838622	48,75	295,5
4,47817	8,65618	1,0029222	2,6690104	0,330057	0,0980238	48,75	295,25

Tabla N°13 Medición 3 Bomba Century espectros de espectros y valor RMS

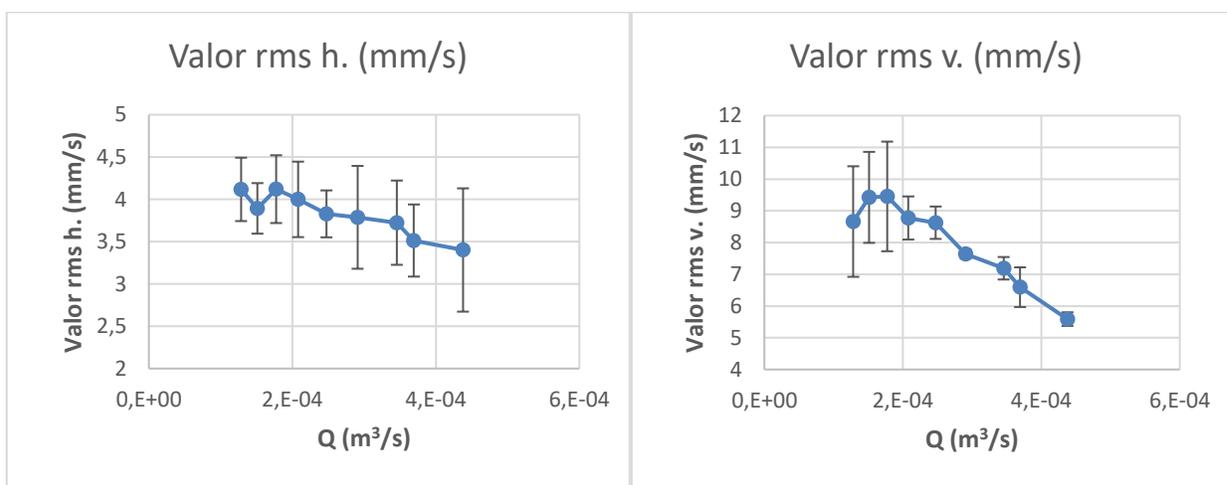


Figura N°27 Curvas Valor RMS, horizontal y vertical de la bomba CENTURY

Con respecto al valor RMS de la figura N°27 se puede observar una mayor incertidumbre para todo los valores horizontales ya que todas presentan un Δ error prácticamente igual en cada uno de los caudales, en donde el mayor valor de Δ error es 0.7 a los 4,38E-4 (m³/s). Ahora con respecto a los valores verticales en los tres primeros caudales el Δ error es más alto, generando una mayor incertidumbre en aquellos valores.

Al analizar el comportamiento se puede apreciar tanto en la curva vertical como la horizontal tiende a disminuir los Valores RMS a medida que el caudal aumenta.

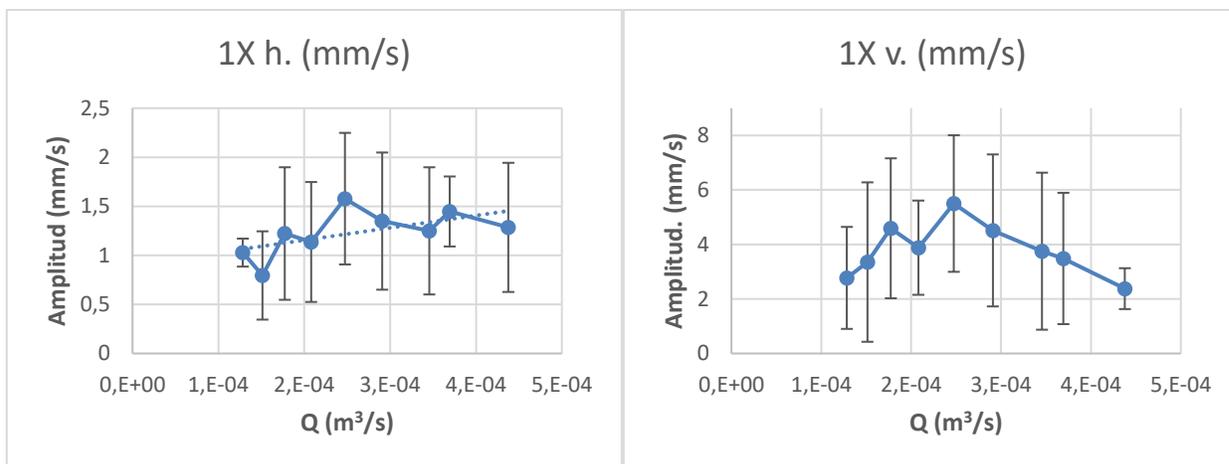


Figura N°28 Curvas espectro 1X, horizontal y vertical de la bomba CENTURY.

Los espectros 1X observados de la figura N°28 al igual que los valores RMS presentan un gran incertidumbre en los valores horizontal y vertical.

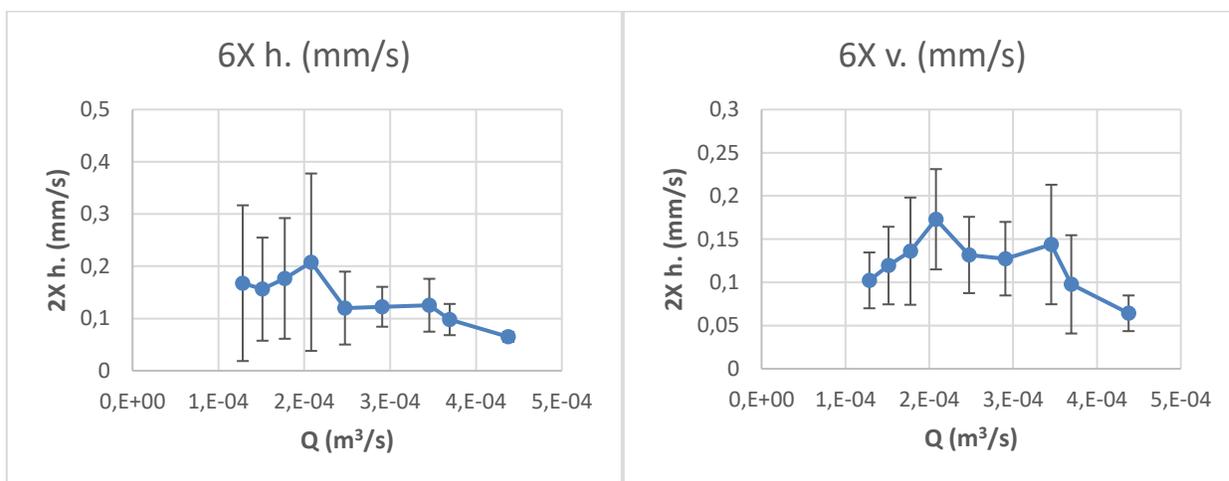


Figura N° 28 Curvas espectro número de alabes (6X), horizontal y vertical de la bomba CENTURY.

El espectro número de álabes de la figura N°28, presenta gran incertidumbre en los valores de amplitud al igual que los espectros 1X, aun así mantienen una tendencia a disminuir las amplitudes a medida que disminuye el caudal

5.5) Relación entre Rendimiento - Valor RMS, Espectro 1X y Espectro número de alabes

Luego de obtener todos los datos y curvas respectivas, se realiza a continuación el análisis que hay entre las variables en estudio (Valor RMS, Espectro 1X y Espectro número de álabes) con respecto al rendimiento de cada una de las bombas, y determinar si existe alguna relación global entre las pulsaciones de presión representado en el espectro número de álabes ubicado en la frecuencia f_p (frecuencia paso de álabes).

5.5.1) Bomba EBARA.

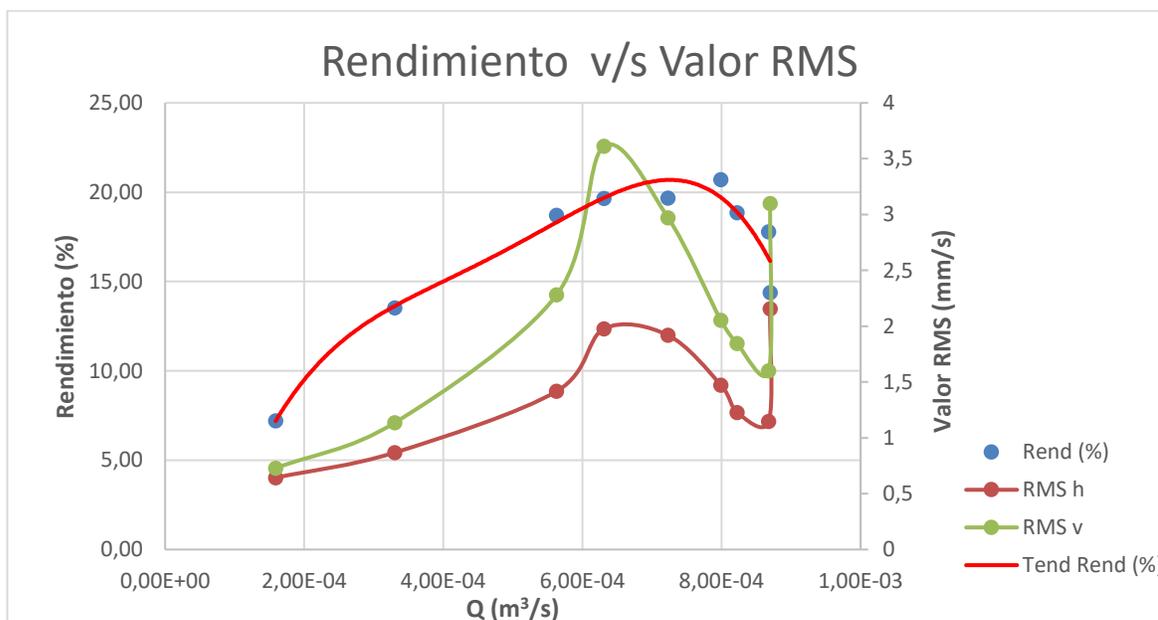


Figura N°29 Curva de relación entre rendimiento y valor RMS de la bomba EBARA.

Al analizar el comportamiento de la curva de la figura N°29, se observa en el punto de máximo rendimiento comienza a disminuir el valor RMS (horizontal y vertical) en el caudal $7,99E-4 m^3/s$ coincidiendo con la máxima altura de 20 m aproximadamente que puede elevar esta bomba, lo que en rigor tiene coherencia porque mientras menor sean las vibraciones, menor pérdida de energía y como consecuencia mayor rendimiento.

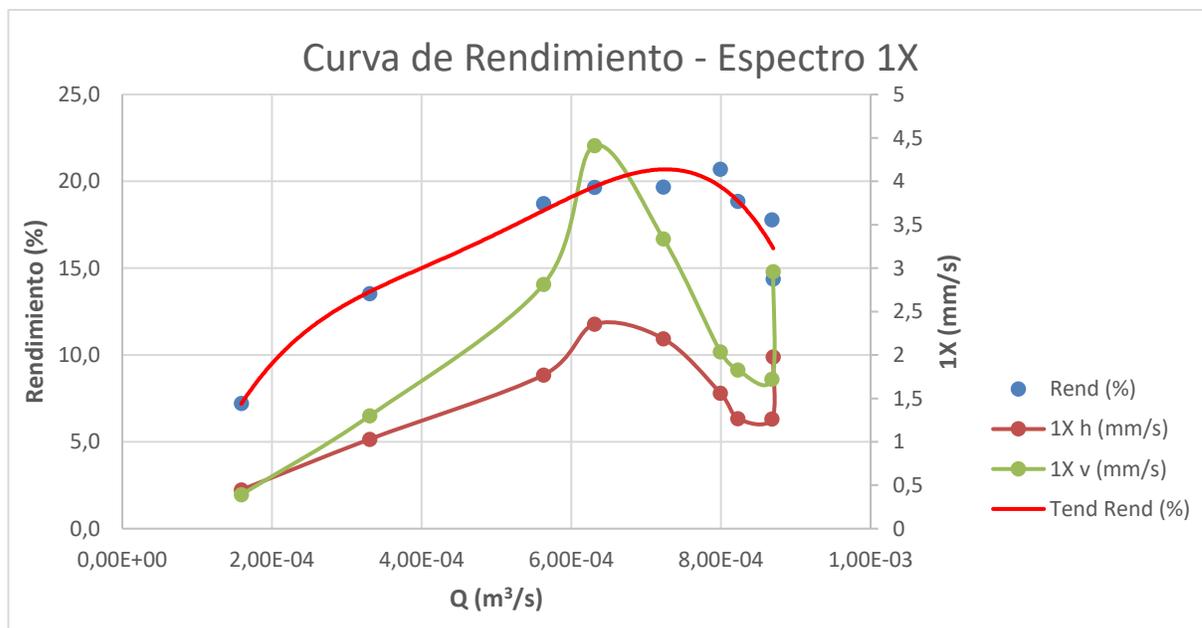


Figura N°30 Curva de relación entre rendimiento y espectro 1X de la bomba EBARA.

De la figura N°30 se muestra la relación entre el espectro al 1X y el rendimiento, y al igual que la gráfica anterior el espectro 1X tiende a disminuir en el punto óptimo de operación con un caudal de $7,99E-4 m^3/s$.

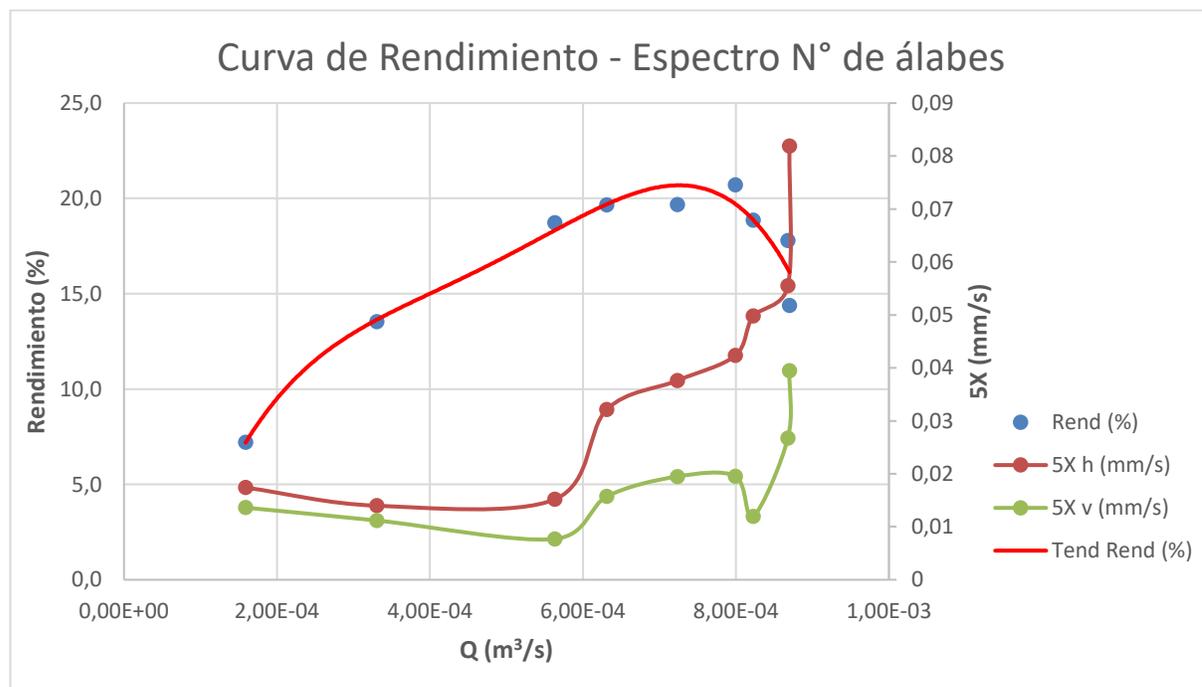


Figura N°31 Curva de relación entre rendimiento y espectro número de álabes 5X de la bomba EBARA.

De la figura N°31, se observa que las amplitudes de los espectros 5X va disminuyendo a medida que baja el caudal y con respecto al punto óptimo comienza a disminuir con un caudal aproximado de $7,99 \text{ E-}4 \text{ (m}^3\text{/s)}$ que al parecer no es el mínimo valor de amplitud, pero tampoco es el máximo valor. La amplitud en sentido vertical baja considerablemente en el punto máximo de operación con un caudal de $8,23\text{E-}4 \text{ (m}^3\text{/s)}$.

5.5.2) Bomba Century

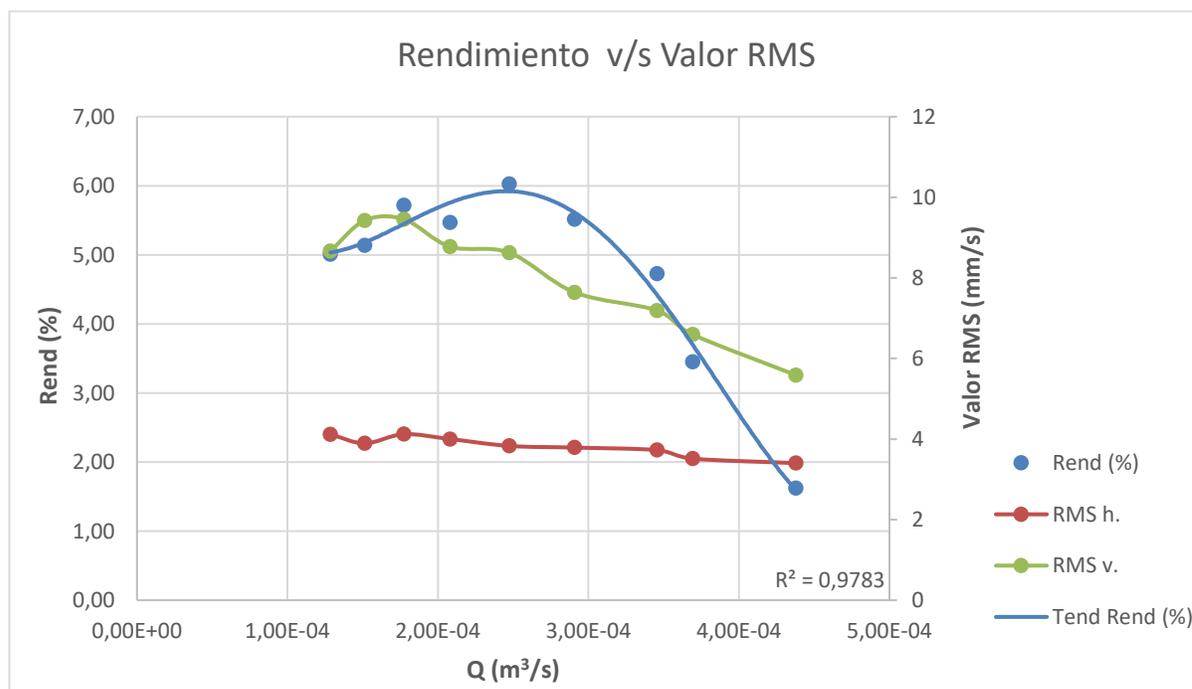


Figura N°32 Curva de relación entre rendimiento y valor RMS de la bomba CENTURY.

Con respecto a la figura N°32 el valor RMS de ambas curvas mantienen un valor constante a medida que el rendimiento varía, y en el punto máximo de operación el valor RMS tiende a disminuir un poco, esto es más visible en el valor vertical.

Obs: Con esta bomba en especial los valores que se obtuvieron presentaron mucha incertidumbre, por ende se debe discrepar en algunos valores. Como se ha mencionado en las observaciones anteriores en particular esta bomba presenta problemas diversos en las vibraciones, una de ellas en los apoyos no anclados y desalineamiento en el acople del motor a la bomba.

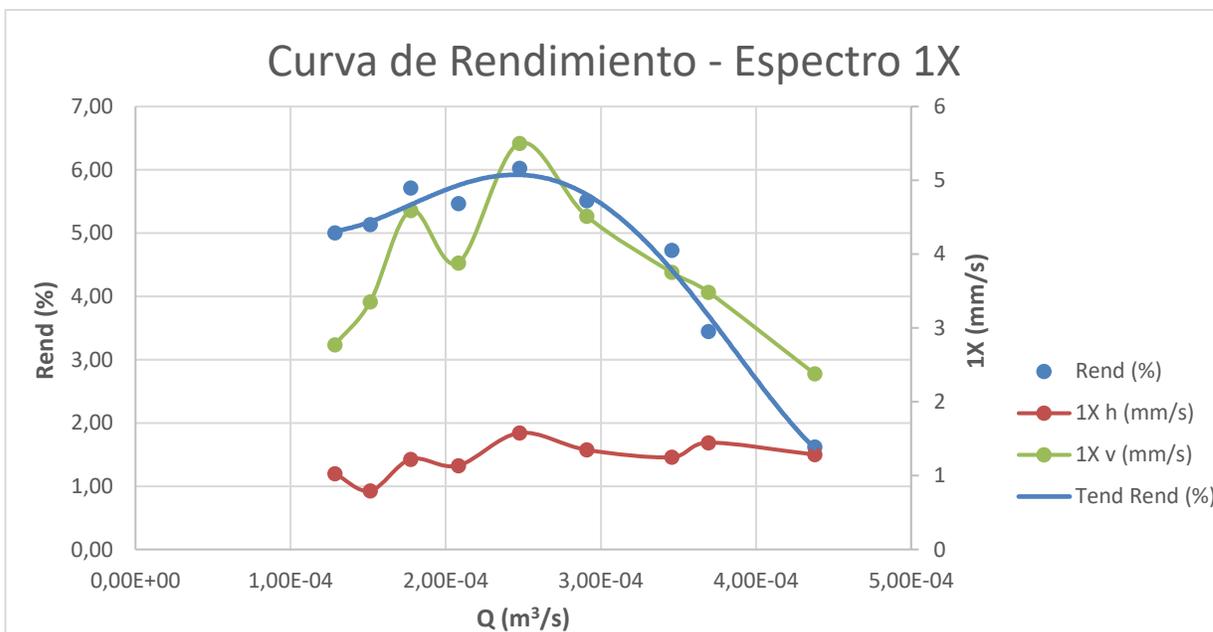


Figura N°33 Curva de relación entre rendimiento y espectro 1X de la bomba CENTURY.

De la figura N°33, al igual que la curva anterior los espectros 1X disminuyen en el punto máximo de operación con un caudal de 2,08E-4 (m³/s), pero a medida que se aleja de este punto los espectros 1X tiende a aumentar y luego a disminuir.

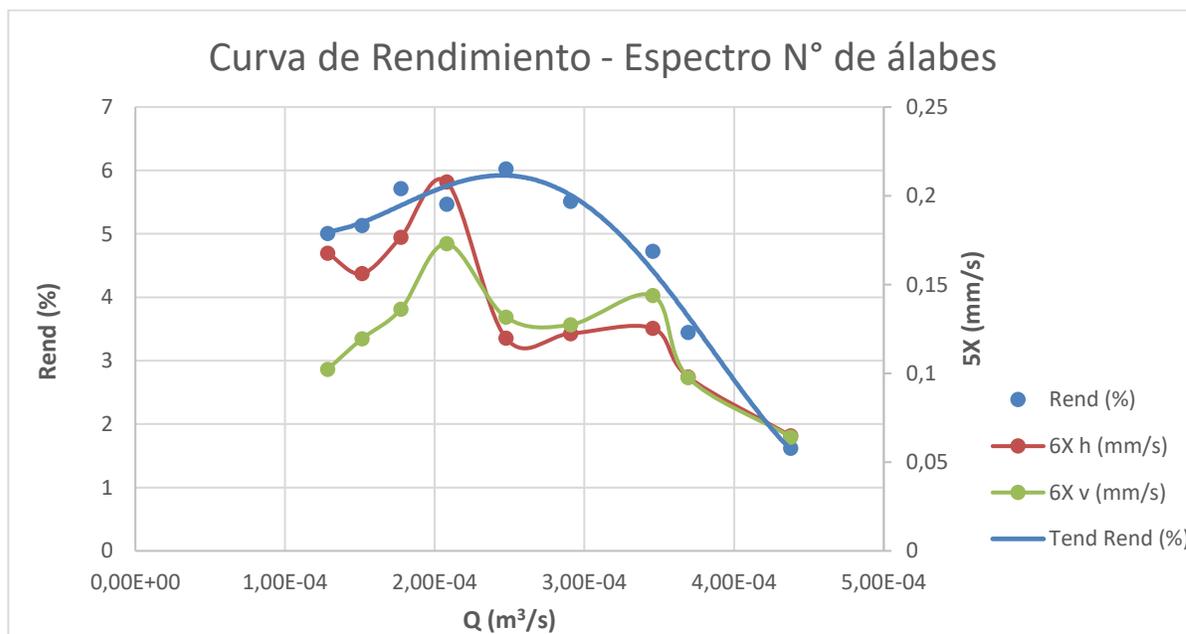


Figura N°34 Curva de relación entre rendimiento y espectro número de álabes 5X de la bomba CENTURY.

Con respecto a la relación rendimiento mostrado en la figura N°34, el espectro 6X en el punto máximo de operación comienza a disminuir su amplitud entre el caudal $2,08E-4$ (m^3/s) y $2,47$ (m^3/s), luego disminuyendo gradualmente a medida que aumenta el caudal.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.

A partir de los resultados obtenidos por los 3 ensayos, se concluye lo siguiente, para cada una de las bombas.

Con respecto a la bomba EBARA se concluye lo siguiente:

- Respecto a las curvas generadas por los valores vibratorios, los espectros 1X, 5X y el valor RMS presentaron algunos errores, esto se pudo observar de la figura N°24, unas barras de error muy elevadas en algunas de las amplitudes de los valores RMS, que conlleva tener incertidumbre en aquellos valores. Esto se pudo haber solucionado aumentando el número de ensayos, ya que la muestra aumentaría y como consecuencia las barras de error disminuirían.
- La relación entre el rendimiento y el espectro 5X, la cual es representada por las pulsaciones de presión mostradas en la figura N°31, se puede observar que medida que se acerca al caudal de $7,99E-4$ (m^3/s), en donde aproximadamente se encuentra el punto de máximo rendimiento, las amplitudes vibratorias del espectro 5X tanto para la horizontal, que presentan mayores amplitudes, como para el vertical que posee menores amplitudes, tienden a disminuir parcialmente.
- Al verificar las vibraciones globales, se pudo identificar una similitud en el comportamiento de las curvas de los espectros 1X, 5X y el valor RMS (horizontal y vertical) con respecto al punto máximo de rendimiento, ya que en todas estas curvas, las amplitudes vibratorias (horizontal y vertical) disminuyen a medida que se acercan al máximo de rendimiento, ubicado alrededor del caudal de $7,99E-4$ (m^3/s) mostrado en las figuras N°29, 30 y 31, de esta manera se puede afirmar que si existe una relación entre ellas.

- En general, se puede concluir que la bomba EBARA si presenta una relación entre las pulsaciones de presiones con respecto al punto de máximo rendimiento, debido a que hay una disminución de amplitud vibratoria cercano a este punto, como se muestra en las figuras N°29, 30 y 31.
- Respecto a la norma ISO 2372 [6] esta bomba en algunas ocasiones se encuentra en el rango C (insatisfactoria), pero a medida que se acerca al punto máximo de rendimiento, el valor RMS tanto para la horizontal, que presenta mayor amplitud vibratoria, como para la vertical, en donde su amplitud es inferior, no supera los 1,8 (mm/s), el cual lo hace estar dentro del rango B (satisfactorio), por ende no habría problemas en el análisis.

Con respecto a la bomba Century se concluye lo siguiente:

- El mayor problema se presentó en la medición de las vibraciones, en donde aparecieron muchos espectros como el 1X, 2X, 3X y 4X, que no son inherentes al flujo, por ende no intervienen mayormente en este análisis.
- Con respecto a la relación que existe entre los valores vibratorios globales, los espectros 1X, 6X y el valor RMS (horizontal y vertical) no presentan relación entre ellos, ya que al comparar con la curva de rendimiento mostrado en las figuras N°32, 33, 34, las amplitudes vibratorias de cada una éstas, no coinciden a medida que se acercan al punto de máximo rendimiento, por ende no se puede ver una relación con el valor vibratorio de las pulsaciones de presión
- En general esta bomba presenta bastantes problemas vibratorios según la norma ISO 2372 [6] esta bomba se ubica en el rango D (inaceptable) debido que su valor RMS tanto para la vertical, como a para la horizontal, superaron los 7,1 (mm/s) en amplitud vibratoria, a pesar de que estar en el punto máximo de rendimiento, mostrado en la figura N°32.

En definitiva para la bomba EBARA si presenta relación entre las pulsaciones de presión y el punto de máximo rendimiento, y para el caso de la bomba CENTURY no se ve relación alguna, esto pudo deberse al tipo de bomba, o por problemas generados por las vibraciones o por falta de números de ensayos, etc.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS

- [1] Saavedra P. Análisis de vibraciones nivel I.
Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [2] Vibración en equipos de bombeo, estudio y soluciones.
Jaime Alberto Castillo Moraga.
UBB, 2004
- [3] Análisis de vibraciones de una bomba centrífuga con respecto a su curva característica.
Jorge Luis Andrés González Ibacache
UBB, 2015
- [4] Medición y análisis de vibraciones de máquinas rotatorias con analizador de vibraciones DSP Logger MX-300 y software labview.
Leonardo David Aja Cabezas
Freddy Andrés Cartes Toledo
UBB, 2007
- [5] Mecánica de fluidos (sexta edición)
Robert L. Montt.
Pearson educación, México 2006.
- [6] Normativa sobre Vibraciones.
Departamento de ingeniería mecánica, energética y de materiales
2016, http://www.imem.unavarra.es/EMyV/pdfdoc/vib/vib_normativa.pdf.

