

**BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA  
CENTRÍFUGA MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS**

**LUIS ENRIQUE BARRERA SANDOVAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA  
2010**

**BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA  
CENTRÍFUGA MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS**

**LUIS ENRIQUE BARRERA SANDOVAL**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico**

**Director  
Msc. JABID QUIROGA MENDEZ**

**Codirector  
Mgr. ALFONSO GARCÍA CASTRO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA  
2010**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres por su incondicional apoyo, paciencia y cariño a distancia, por sus oraciones y el amor que me dio fuerza para seguir adelante.

A todas las personas que de una u otra forma me aportaron para alcanzar esta meta. Al profesor Nesto D´Croz por su invaluable colaboración y a los profesores Jabid y Alfonso.

A las espectaculares personas que durante este trayecto me brindaron su amistad, a los amigos del Socorro, especialmente a Darío por acompañarme en momentos de gloria y difíciles, a Harol, Fabel, Victor, Alex, Santiago, Esteban, Jairo (por ayudarme con Matlab) y a German. A Mono, Robin y Freddy que desde Duitama estuvieron pendientes de mí y de mi destino, a Washington, Sergio y Danilo en ESSI por la colaboración y la buena energía. A mi familia en general, siempre ha sido grato recordarlos a través de estos años.

A Soledad por estar siempre ahí, muchas gracias por la confianza y la ayuda que me brinda de forma sincera.

A Yadira por el amor y especialmente por la paciencia que me tuvo durante esta etapa de mi vida, por enseñarme a ser mejor persona.

A Dios y a los que compartieron conmigo un trozo de esto que llaman vida.

...Ahí estaré....

**Dedicado desde lo más profundo de mi alma a mis padres  
y al ángel Sebastián allá en el cielo**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES BOMBAS CENTRÍFUGAS	17
1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y COMPONENTES	17
1.2 CONCEPTOS HIDRÁULICOS RELACIONADOS CON BOMBAS CENTRÍFUGAS	17
1.2.1 Caudal	17
1.2.2 Cabeza de la bomba y del sistema	18
1.2.3 Cabeza de pérdidas en tuberías circulares	19
1.2.4 Cabeza de pérdidas en accesorios	20
1.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS	21
1.3.1 Curva característica de una bomba centrífuga Q Vs.HB	21
1.3.2 Curva característica de una instalación	22
1.3.3 Interacción entre las curvas de la bomba y del sistema	23
2. CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS	24
2.1 DEFINICIÓN	24
2.2 CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS	24
2.2.1 Cabeza de succión positiva neta disponible (NPSHd)	26
2.2.2 Cabeza de succión positiva neta requerida (NPSHr)	28
2.2.3 Criterios de cavitación en bombas centrífugas	28
2.3 CONSECUENCIAS DE LA CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS	30
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	32
3.1 PROPÓSITO DEL BANCO DE PRUEBAS	32
3.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL BANCO DE PRUEBAS	32
3.3 SELECCIÓN Y DISEÑO DE COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS	33
3.3.1 Selección de la bomba centrífuga	33

3.3.2 Selección de la tubería y accesorios	39
3.3.3 Selección de las válvulas del sistema	40
3.3.4 Diseño de los soportes	42
4. ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL BANCO DE PRUEBAS	48
4.1 INSTRUMENTACIÓN	48
4.1.1 Registro de presión	48
4.1.2 Registro de caudal	48
4.2 PRUEBAS REALIZADAS	49
4.2.1 Caracterización de la bomba centrífuga	49
4.2.2 Inducción de cavitación por estrangulamiento	53
5. ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN BOMBA CENTRÍFUGA INSTALADA EN BANCO DE PRUEBAS	60
5.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINARIA ROTATIVA	60
5.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES EN EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES	60
5.2.1 Vibraciones en dominio de tiempo	61
5.2.2 Vibraciones en dominio de frecuencia	61
5.3 PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE VIBRACIONES IMPLEMENTADO EN BANCO DE PRUEBAS	62
5.4 INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA EN ANÁLISIS DEL BANCO	63
5.4.1 Determinación de la velocidad de rotación del eje de la bomba	63
5.4.2 Adquisición de señales vibratorias	64
5.5 PRUEBAS VIBRATORIAS EN BOMBA CENTRÍFUGA	65
5.5.1 Condiciones de las pruebas	65
5.5.2 Resultados obtenidos	68
5.5.3 Análisis y conclusiones	74
5.5.4 Recomendaciones	76
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXOS	78

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema de los factores que definen las cabezas totales de la bomba y del sistema	18
Figura 2. Curva característica Q vs. $H_B$ de una bomba centrífuga	21
Figura 3. Curvas de la bomba y el sistema y punto de operación de una bomba centrífuga	23
Figura 4. Comportamiento de la presión en una bomba centrífuga. Sin cavitación; b) Con cavitación	25
Figura 5 . Variables para cálculo de NPSHd	27
Figura 6. Determinación de NPSHr según <i>ANSI/HI 1.6 Centrifugal Pump Tests</i>	29
Figura 7. Fotografías del patrón de flujo durante la cavitación y erosión causada por esta en el impulsor de una bomba centrífuga	31
Figura 8. Bomba centrífuga seleccionada para el banco de pruebas	39
Figura 9. Válvula de globo usada en el banco de pruebas	41
Figura 10. Abrazadera de acero. Imagen tomada de la norma MSS SP-69	43
Figura 11. Fotografías del vástago del soporte para tubería	44
Figura 12. Soporte de tubería instalado en el banco de pruebas	44
Figura 13. Banco de pruebas para el estudio de cavitación mediante análisis de vibraciones mecánicas instalado en el laboratorio	47
Figura 14. Medición de caudal en banco de pruebas	49
Figura 15. Configuración 1. Banco de pruebas para caracterización de la bomba centrífuga	50
Figura 16. Curva característica de la bomba	53
Figura 17. Configuración 2. Banco de pruebas para inducción de cavitación por estrangulamiento	55
Figura 18. Gráfica NPSHd vs. $H_B$ y punto de disminución de $H_B$ en 3%	58
Figura 19. Ejemplo de señal en dominio de tiempo u oscilograma	61
Figura 20. Ejemplo de señal en dominio de frecuencia o espectro	62

Figura 21. Procedimiento de análisis de vibraciones llevado a cabo en banco de pruebas	63
Figura 22. Analizador de vibraciones y acelerómetro usados en pruebas	65
Figura 23. Ubicación de puntos y direcciones de medición en la bomba centrífuga	66
Figura 24. Parámetros de pruebas vibratorias en bomba centrífuga para espectros	67
Figura 25. Parámetros de pruebas vibratorias en bomba centrífuga para señal en dominio de tiempo	68
Figura 26. Oscilogramas captados en el punto de succión. Dirección axial	69
Figura 27. Oscilogramas captados en el punto de succión. Dirección radial	69
Figura 28. Oscilogramas captados en el punto de descarga. Dirección axial	70
Figura 29. Espectros captados en el punto de succión. Dirección axial	71
Figura 30. Espectros captados en el punto de succión. Dirección radial	72
Figura 31. Espectros captados en el punto de descarga. Dirección axial	73
Figura 32. Espectros captados en punto de voluta lado descarga. Dirección axial	74
Figura 33. Espectros captados en el punto rodamiento 1. Dirección radial	74

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Numero de Re y factor de fricción calculados para diferentes caudales en las condiciones del sistema	35
Tabla 2. Accesorios en la succión y coeficientes de pérdidas	36
Tabla 3. Accesorios en la descarga y coeficientes de pérdidas	37
Tabla 4. Cálculo de cabeza de pérdidas en el sistema y potencia requerida para diferentes caudales	38
Tabla 5. Características de la bomba centrífuga seleccionada	39
Tabla 6. Características de la tubería seleccionada	40
Tabla 7. Características de la válvula usada en el banco de pruebas	41
Tabla 8. Tabla de espaciamiento recomendado entre soportes.	45
Tabla 9. Cálculo de longitud equivalente de tubería recta entre soportes por accesorios	46
Tabla 10. Características prueba de caracterización de bomba	50
Tabla 11. Velocidad medida, caudal calculado, presiones en los puntos 1 y 2 y cálculo de cabeza de la bomba $H_B$ para diferentes ángulos de cierre de V2	52
Tabla 12. Características prueba de inducción de cavitación por estrangulamiento	54
Tabla 13. Valores de presión en los puntos 1 y 2 del sistema durante prueba de inducción de cavitación para diferentes ángulos de cierre de V1	56
Tabla 14. Cabeza de la bomba $H_B$ y NPSHd calculados durante prueba de inducción de cavitación para diferentes ángulos de cierre de V1	57
Tabla 15. Condiciones de las válvulas para lograr los estados requeridos en la succión	59

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1</b> ESQUEMA DE DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS	78
<b>ANEXO 2</b> COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS	79
<b>ANEXO 3</b> DIMENSIONES GENERALES DEL BANCO DE PRUEBAS	80
<b>ANEXO 4</b> CURVAS CARÁCTERÍSTICAS Y DATOS DE LA BOMBA CENTRÍFUGA DEL BANCO DE PRUEBAS	81
<b>ANEXO 5</b> PROCEDIMIENTO PARA LLEVAR A CABO EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL BANCO DE PRUEBAS	82

## RESUMEN

**TÍTULO:**

BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS\*

**AUTOR:** LUIS ENRIQUE BARRERA SANDOVAL\*\*

**PALABRAS CLAVE:**

Bomba centrífuga, Cavitación, Análisis de vibraciones mecánicas.

**DESCRIPCIÓN**

El mantenimiento basado en condición o predictivo es una filosofía de mantenimiento orientada a la optimización de los procesos de producción de una planta mediante la adquisición de información de parámetros de funcionamiento en equipos críticos del ciclo. Con base en estos datos se determinan síntomas de degradación en elementos, causas de falencias en la calidad de un proceso y tiempos de trabajo bajo condiciones de confiabilidad operativa y económica.

Las bombas centrífugas son equipos de amplio uso en el ámbito industrial, las cuales se ven afectadas por el fenómeno de cavitación bajo condiciones inadecuadas en la succión. Esta anomalía provoca vibraciones con rasgos particulares en dominio de frecuencia que al ser analizados permiten detectarla de forma oportuna.

Para determinar los parámetros vibratorios que caracterizan la cavitación se diseñó y construyó un banco de pruebas que permite operar una bomba centrífuga de ½ hp en estado normal e inducir situaciones de falla moderada y desarrollada mediante estrangulamiento del flujo en la succión. Bajo estos escenarios se tomaron lecturas vibratorias en diferentes puntos de la bomba que mostraron en el espectro bajo cavitación avanzada la excitación a la frecuencia de paso de álabes y vibraciones aleatorias en el rango de 1 a 2,5 KHz. En falla moderada se notan en el espectro leves perturbaciones en el rango de frecuencia mencionado que pueden ser consideradas como cavitación al compararlos con lecturas tomadas bajo funcionamiento normal del equipo. Las lecturas tomadas en dirección axial y en el puerto de succión del equipo arrojaron los espectros de vibración que mostraban con mayor claridad el fenómeno de interés.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Director: Msc. Jabid Quiroga M. Codirector: Mgr. Alfonso García C.

## ABSTRACT

### TITLE

TEST BENCH FOR CAVITATION STUDY IN A CENTRIFUGAL PUMP THROUGH MECHANICAL VIBRATION ANALYSIS\*

**AUTHOR:** LUIS ENRIQUE BARRERA SANDOVAL\*\*

### KEY WORDS

Centrifugal pump, Cavitation, Mechanical vibration analysis

### DESCRIPTION

Condition based maintenance or predictive maintenance is a philosophy aimed at optimizing production processes of a plant through the acquisition of information equipment operating parameters critical cycle. Based on these data are determined symptoms of degradation factors, causes of shortcomings in the quality of a process and working time under conditions of economic and operational reliability.

Centrifugal pumps are wide used equipment at industrial field, which are affected by cavitation phenomenon under unsuitable suction conditions. These anomaly induce vibration with individual signs in frequency domain that when are tested allow to detect it in a timely manner. In order to determine vibratory parameters that characterize cavitation, was designed and built a test bench that allows to perform a ½ hp centrifugal pump under normal condition and induce moderate and hard failure state by throttling the flow at suction line. Vibration readings were taken under these situations at different pump locations which showed a high peak at vane pass frequency and random vibration form 1 to 2,5 KHz range in hard cavitation spectrum. Working at moderate cavitation, are noticeable in spectrum mild perturbations at frequency range mentioned, they could be considered as failure state when you compare them with vibration readings taken under equipment normal running.

Axial direction and suction eye pump readings gave vibration spectrums that showed the focus phenomenon most clearly.

---

\* Degree project

\*\* Physic-Mechanical Engineerings Faculty, Mechanical Engineering School  
Advisor: Msc. Jabid Quiroga M.      Coadvisor: Mgr. Alfonso García C.

## INTRODUCCIÓN

Aproximadamente la mitad de los costos operativos en procesos de fabricación y manufactura son atribuidos a actividades de mantenimiento. Este factor motiva a realizar estudios sobre cualquier medio que permita disminuir estos costos y brinde resultados en términos de confiabilidad. El monitoreo de condición y diagnóstico de fallas aplicado a equipos críticos de un ciclo es uno de estos medios.

Las bombas centrífugas son máquinas ampliamente utilizadas en el ámbito industrial, por ejemplo, de los equipos de bombeo instalados en una planta típica de petróleo del 80 al 90% son bombas centrífugas. Se caracterizan por la simplicidad en su diseño, alta eficiencia, amplio rango de capacidad y mantenimiento sencillos. Entre las fallas de tipo hidráulico que se presentan con mayor frecuencia en bombas centrífugas se encuentra la cavitación. Esta anomalía, producto de deficiencias en la instalación u operación del sistema ocasiona: Impulsos de vibración, ruido, desgaste de componentes de la bomba como impulsor, voluta o sellos, flexiones del eje y disminución e irregularidad en la entrega de líquido, entre otras alteraciones que finalmente repercuten en la vida útil de la máquina.

El análisis de vibraciones es un método no intrusivo que se usa para determinar la condición operativa de la máquina y su mayor ventaja radica en la identificación de problemas en desarrollo antes de que causen una parada no programada del equipo. En el análisis vibratorio cada tipo de falla ha sido caracterizada de acuerdo a un comportamiento típico en el dominio de frecuencia o espectral que permite diferenciar individualmente cada falla.

Mediante la implementación de análisis de vibraciones mecánicas en una bomba centrífuga es posible detectar de forma precisa fallas como la cavitación, teniendo como base previo conocimiento de las frecuencias o rangos de frecuencia que este anomalía altera en el comportamiento vibratorio de un equipo.

# 1. GENERALIDADES BOMBAS CENTRÍFUGAS

## 1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y COMPONENTES

Las bombas centrífugas son equipos de bombeo ampliamente utilizados en el ámbito industrial, se caracterizan por la simplicidad en su diseño, alta eficiencia, amplio rango de capacidad, operación y mantenimiento sencillos.

Son máquinas hidrodinámicas en las que un elemento rotativo llamado impulsor transmite continuamente energía a un fluido acelerándolo y desplazándolo dentro de él mismo, conduciéndolo hacia la descarga de la bomba. El proceso energético se realiza en dos etapas: En primera instancia el movimiento rotativo produce el aumento de la energía cinética del fluido, en la segunda etapa, la energía cinética es convertida en energía potencial de presión a medida que el fluido pasa a través de los canales que forman los álabes del impulsor cuya sección transversal varía en aumento.

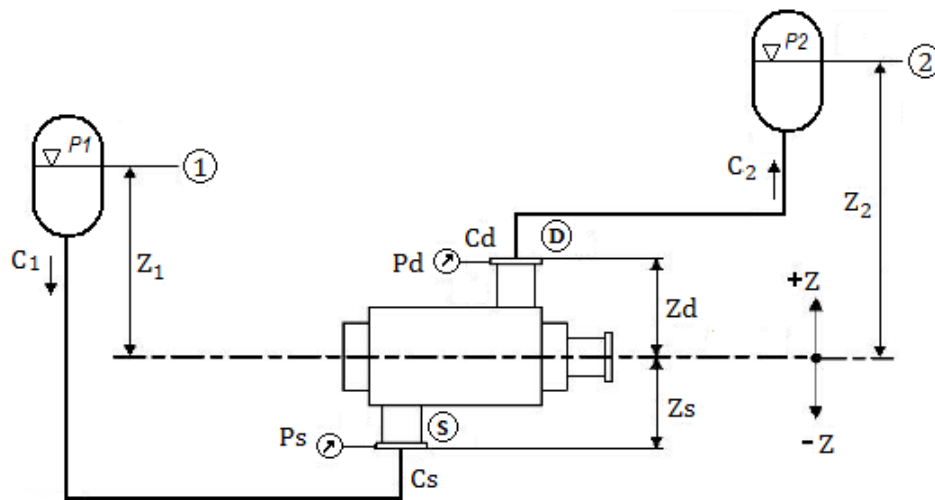
## 1.2 CONCEPTOS HIDRÁULICOS RELACIONADOS CON BOMBAS CENTRÍFUGAS

**1.2.1 Caudal.** El líquido bombeado es medido en términos de flujo volumétrico por unidad de tiempo o caudal, denotado generalmente por la letra Q, cuyas unidades usadas comúnmente son m<sup>3</sup>/s o galones por minuto gpm. Cabe anotar que para un punto de operación definido de la bomba el caudal entregado es el mismo para cualquier líquido.

$$Q = \frac{U}{A}$$

Donde:  $U$  = Velocidad del flujo en m/s     $A$  =Área transversal de la tubería en  $m^2$

**1.2.2 Cabeza de la bomba y del sistema.** La presión de un líquido puede ser expresada en términos equivalentes de longitud, metros o pies, que representa la presión generada por una columna de líquido de dicha altura. Este concepto es conocido como cabeza de presión  $H$ .



**Figura 1. Esquema de los factores que definen las cabezas totales de la bomba y del sistema**

Las bombas centrífugas elevan la presión de un fluido de un valor a otro. De esta forma la cabeza de presión desarrollada por una bomba resulta de la diferencia de energía entre la succión y la descarga del equipo (Puntos S y D, figura 1), y es denominada como *cabeza diferencial* o total de la bomba:  $H_B = H_D - H_S$ .

$$H_B = \frac{P_d - P_s}{\rho g} + Z_d - Z_s + \frac{C_d^2 - C_s^2}{2g}$$

La cabeza diferencial desarrollada por una bomba es la misma independiente del fluido a transportar lo cual no significa que desarrolle el mismo aumento de presión

para cada sustancia ya que éste viene dado por  $\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$ , es decir, el cambio de presión depende directamente de la densidad ( $\rho$ ) del fluido de trabajo.

De otra parte la cabeza total del sistema  $H_T$  representa el valor total de presión que la instalación impone y que debe ser vencido por la bomba. Viene formulada de la aplicación de la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 (figura 1) adicionando las pérdidas por rozamiento a lo largo de la tubería.

$$H_T = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + Z_2 - Z_1 + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2g} + \Delta H_{1-S} + \Delta H_{D-2}$$

Los términos que intervienen en las ecuaciones expuestas se muestran en la figura 2 y son los componentes de las cabezas totales de la bomba y del sistema:

- Cabezas de presión,  $P/(\rho \cdot g)$
- Cabezas de energía potencial,  $Z$ .
- Cabezas de velocidad o energía cinética,  $C^2/2g$ .
- Cabezas de pérdidas de presión en el sistema,  $\Delta H_{1-S}$  y  $\Delta H_{D-2}$ .

**1.2.3 Cabeza de pérdidas en tuberías circulares.** Para tuberías de sección transversal circular y que estén completamente llenas, la cabeza de pérdidas ( $H_p$ ) puede ser calculada de acuerdo a la relación propuesta por DARCY-WEISBACH:

$$H_p = f \frac{l \cdot U^2}{D \cdot 2g}$$

Donde  $f$  = Coeficiente de fricción  $l$  = Longitud de la tubería  
 $D$  = Diámetro de la tubería  $U$  = Velocidad del flujo promedio

El coeficiente de fricción es determinado a partir de número adimensional de Reynolds, el cual se define como:

$$Re = \frac{D \cdot U}{\nu}$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática en  $m^2/s$ .

Para  $Re < 2320$ , flujo laminar, se aplica la ley HAGEN-POISSEUILLE que concluye que el valor del coeficiente de fricción es:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Para  $Re > 2320$ , flujo turbulento, hay una relación consistente mediante la cual calcularlo planteada por COLEBROOK- WHITE, aplicable para los materiales y diámetros de tubería usualmente usados, caudales y fluidos de cualquier viscosidad,:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} + \frac{\epsilon/D}{3.71} \right)$$

**1.2.4 Cabeza de pérdidas en accesorios.** Las pérdidas de carga en accesorios (codos, válvulas, divisiones en T, juntas de expansión) se pueden expresar como una longitud equivalente de tubería recta o mediante la siguiente relación:

$$H_{P_{acc}} = K \frac{U^2}{2g}$$

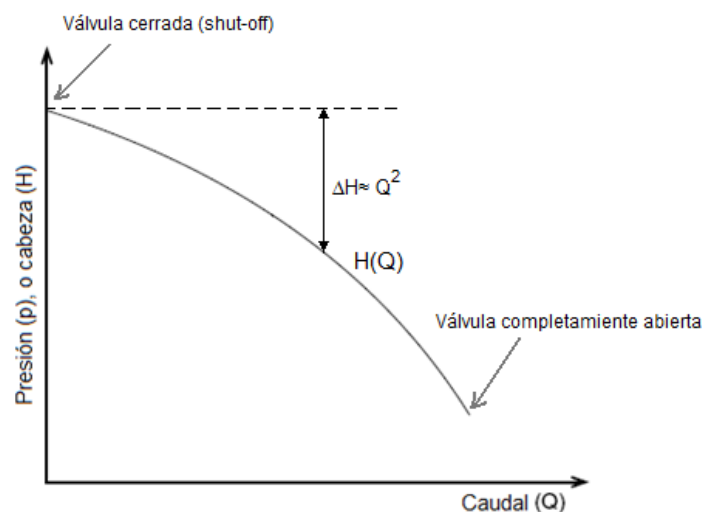
Donde K es el coeficiente de pérdidas del accesorio y U la velocidad promedio a través de la sección de referencia en m/s. Las pérdidas totales en accesorios se pueden expresar de la siguiente forma, siempre y cuando el diámetro nominal de estos sea el mismo.

$$H_{p_{acc}} = \Sigma K \frac{U^2}{2g}$$

Los coeficientes de pérdidas se encuentran tabulados en diferentes publicaciones para cada tipo de accesorio en función de su diámetro.

### 1.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

**1.3.1 Curva característica de una bomba centrífuga Q Vs.H<sub>B</sub>.** La curva Q vs. H<sub>B</sub> es una gráfica que indica el comportamiento de la cabeza diferencial de la bomba bajo la variación de las condiciones de caudal, a velocidad de rotación constante. Esta curva se construye estrangulando progresivamente la válvula de *descarga* con el fin de obtener diferentes valores de caudal y mediante el uso de manómetros determinar la cabeza desarrollada por la bomba. De esta forma a cada valor de caudal corresponde un valor de cabeza diferencial.



**Figura 2. Curva característica Q vs. H<sub>B</sub> de una bomba centrífuga**

La curva  $H=f(Q)$  toma importancia en la selección de la bomba, ya que a partir de ésta se determina que bomba satisface las necesidades de presión y caudal impuestas por la instalación.

**1.3.2 Curva característica de una instalación.** La curva del sistema  $H_s=f(Q)$  es una característica de la instalación que representa la resistencia que el sistema ofrece a diferentes caudales de operación de una bomba.

Dos componentes la definen, uno que depende de la altura geométrica a la que el fluido se va a elevar (estática) y otro operativo, que depende de las características de la tubería y los accesorios del sistema (dinámica).

Esta curva se construye al utilizar la ecuación de Bernoulli en el sistema bomba tubería, arrojando como resultado la siguiente expresión:

$$H_S = Z + \Sigma \Delta H_{tub} + \Sigma \Delta H_{acc}$$

$Z$  = Altura vertical entre los niveles de los depósitos de succión y descarga

$\Sigma \Delta H_{tub}$  = Pérdidas en los tramos de tubería recta

$\Sigma \Delta H_{acc}$  = Pérdidas en accesorios del sistema

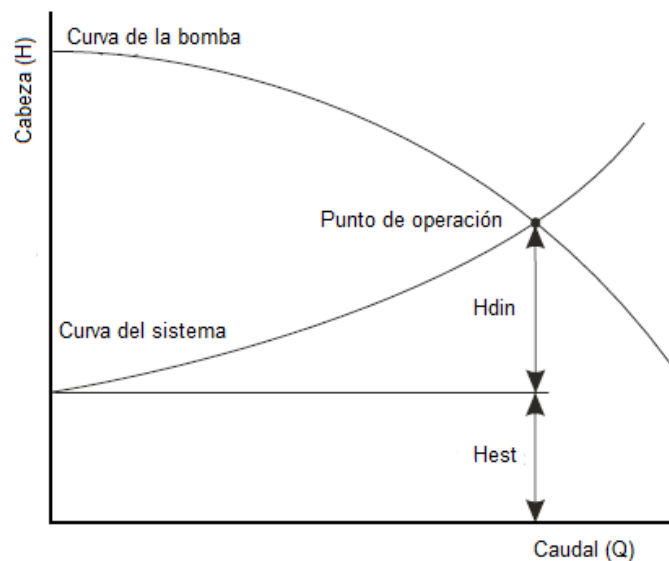
Haciendo los reemplazos respectivos para dejar esta expresión en función de  $Q$  se obtiene la siguiente expresión:

$$H_S = Z + \left( \Sigma f \frac{L_i}{D_i} + \Sigma K_i \right) \frac{Q^2}{2gA^2}$$

En forma general la curva del sistema es una parábola de la forma  $A+BQ^2$  que abre hacia arriba como aparece esquematizada en la figura 3.

**1.3.3 Interacción entre las curvas de la bomba y del sistema.** La condición o punto de operación de una bomba es aquel en que la cabeza total generada por la bomba es igual a la cabeza requerida por la instalación, es decir, en la intersección de las curvas características de la bomba y el sistema,  $H(Q)$  y  $H_s(Q)$ , respectivamente (fig.3).

De esta forma se puede determinar el caudal de entrega al sistema y los valores correspondientes de presión, potencia absorbida, eficiencia, NPSHr y NPSHd; estos últimos conceptos se tratarán a fondo en el capítulo siguiente.



**Figura 3. Curvas de la bomba y el sistema y punto de operación de una bomba centrífuga**

## 2. CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

### 2.1 DEFINICIÓN

La cavitación es un fenómeno de gran relevancia en el ámbito de los sistemas hidráulicos. Se define la cavitación como la evaporación parcial de un líquido en un sistema, y se caracteriza por la *formación* y posterior colapso de las burbujas formadas o cavidades. El término formación engloba la creación de una nueva cavidad o la expansión de una preexistente hasta un tamaño en el que puedan ser observados efectos macroscópicos.

Existen 2 formas para inducir el crecimiento de la burbuja de vapor:

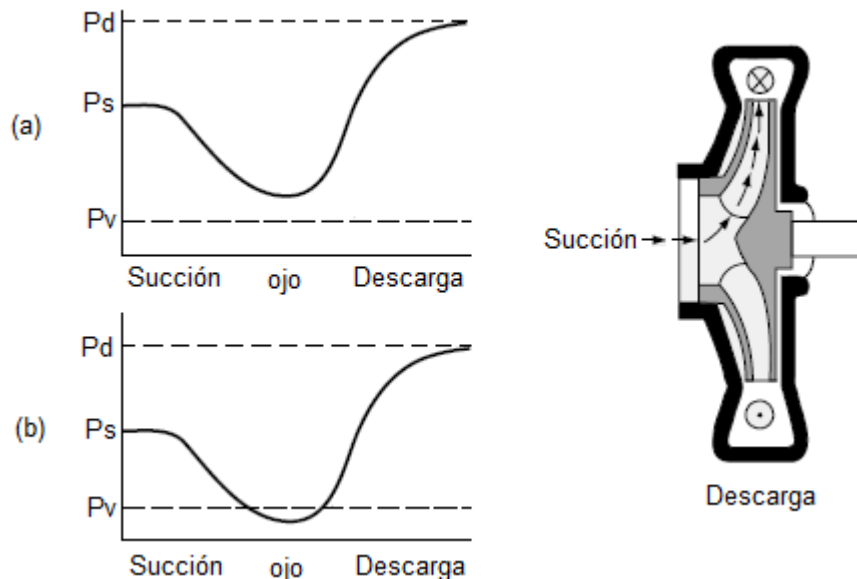
1. Mediante aumento de temperatura hasta el punto de evaporación, lo cual se conoce como ebullición.
2. Mediante una expansión hasta alcanzar la presión de vapor, lo cual se conoce como cavitación.

### 2.2 CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

Como ya se explicó en el primer capítulo las bombas centrífugas en la zona de succión aumentan la energía cinética del fluido lo cual genera una caída de presión local del líquido bombeado, si la presión en el líquido a la entrada de la bomba disminuye hasta la presión de vapor la cavitación empieza a ocurrir (Figura 4b).

A medida que el flujo (compuesto de 2 fases) recorre los álabes del impulsor, entra en la zona de alta presión ocasionando que su presión local se eleve ahora por

encima de la presión de vapor, condensando una gran cantidad de burbujas y provocando su implosión contra los elementos internos de la bomba.



**Figura 4<sup>1</sup>. Comportamiento de la presión en una bomba centrífuga.  
Sin cavitación; b) Con cavitación**

Para evitar que se presente cavitación en una bomba centrífuga, se deben asegurar en el ojo de succión condiciones que garanticen que el efecto de la caída de presión a la entrada de la bomba no provoque el descenso de esta por debajo de la  $P_v$  (figura 4a). El riesgo de que haya cavitación aumenta con la velocidad de operación de la bomba y en puntos de operación de la bomba a grandes o bajos caudales.

Con el fin de comprender la cavitación en bombas centrífugas se deben introducir dos conceptos conocidos como NPSH, de sus siglas en inglés, Net Positive Suction Head o *cabeza de succión positiva neta*.

<sup>1</sup> Tomada de GIRDHAR, Parish; MONIZ Octo. Practical Centrifugal Pumps. Design, Operation and Maintenance. Burlington, MA. Elsevier. 2005. Pág. 62

**2.2.1 Cabeza de succión positiva neta disponible (NPSHd).** La NPSHd representa las condiciones de presión en la entrada de la bomba y está definida como la diferencia entre la presión disponible en el ojo de succión y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo,  $P_s - P_v$ . Este parámetro es independiente de la bomba, depende directamente de la configuración de la tubería de succión (longitud, diámetro, accesorios, altura del nivel del líquido) y de las propiedades de la sustancia a la temperatura de bombeo.

En la figura 5 aparecen las diferentes situaciones que se pueden presentar en la succión de un sistema respecto a la bomba, de acuerdo a la nomenclatura indicada se puede evaluar la NPSHd para instalaciones en funcionamiento de la forma:

$$NPSHd = \frac{P_{at} - P_v}{\rho \cdot g} + \frac{P_s}{\rho \cdot g} \mp Z_{ps} + \frac{U^2}{2g}$$

O para sistemas que se encuentran en fase de diseño el valor de NPSHd se puede estimar a partir de la relación:

$$NPSHd = \frac{P_t - P_v}{\rho \cdot g} \mp Z - H_f$$

Las ecuaciones enunciadas proporcionan valores en unidades de longitud, metros o pies, utilizando en el cálculo unidades consistentes para cualquiera de los sistemas.

Los valores de las variables que se usan para evaluar la NPSHd son:

$P_{at}$  = Presión atmosférica absoluta

$P_s$  = Presión indicada por el manómetro ubicado en la succión

$P_t$  = Presión absoluta sobre la superficie del líquido en el depósito

$P_v$  = Presión de vapor a la temperatura del líquido bombeado

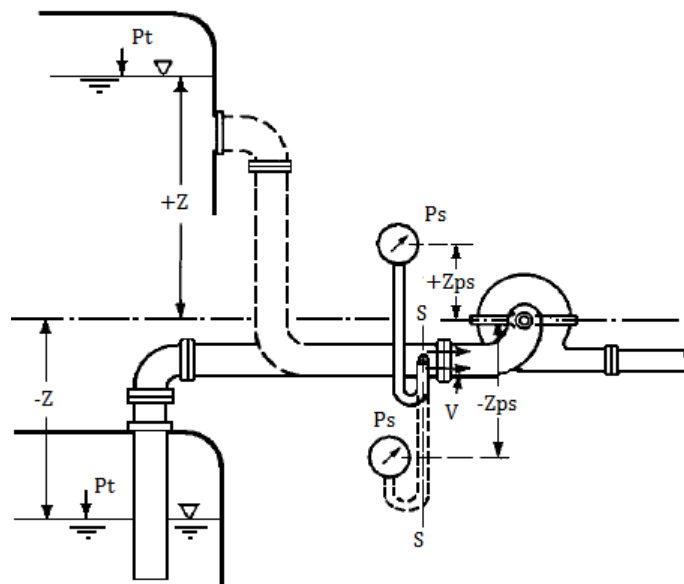
$H_f$  = Cabeza de pérdida debida a la fricción entre el tanque y la succión de la bomba

$Z$  = Distancia vertical entre el eje del ojo de succión de la bomba y el nivel del líquido en el depósito de succión.

$Z_{ps}$  = Distancia vertical entre el eje del ojo de succión de la bomba y el centro del manómetro ubicado en la succión.

$\rho \cdot g = \gamma$  = Peso específico del líquido a la temperatura de bombeo

Dado que las pérdidas en la succión varían con el cuadrado del caudal el valor de NPSHd también disminuye de esta forma como se muestra en la figura 16.



**Figura 5<sup>2</sup>. Variables para cálculo de NPSHd**

<sup>2</sup> Tomada de KARASSIK, Igor J.; MESSINA, Joseph P.; COOPER, Paul; HEALD, Charles. Pump Handbook. 3<sup>a</sup> ed. New York. Mc Graw-Hill. 2008. 1853 pág. 2.350

**2.2.2 Cabeza de succión positiva neta requerida (NPSHr).** La NPSHr indica el valor mínimo de presión que debe haber a la entrada de la bomba ó NPSHd para que esta funcione en condiciones normales y por debajo del cual se encontrará funcionando bajo efecto de cavitación. Es una característica inherente de la bomba que depende principalmente de la geometría de la entrada del impulsor, la velocidad de rotación, propiedades del fluido y caudal.

La NPSHr se obtiene experimentalmente en lo que se denomina un test de succión, el cual consiste en la disminución gradual de la presión a la entrada de la bomba a caudal y velocidad de rotación constante, ya sea estrangulando en la tubería de succión o haciendo vacío en el depósito.

A medida que el flujo es estrangulado son calculadas NPSHd y la cabeza de la bomba  $H_B$  a partir de los datos obtenidos de los instrumentos de medición del banco, al graficar  $H_B$  vs. NPSHd se obtiene una curva en la que la cabeza se mantiene prácticamente constante hasta un punto en el cual empieza a caer (figura 6). Esta disminución en la cabeza es fácilmente perceptible e indica presencia de cavitación.

De esta forma la NPSHr se determina de acuerdo a diferentes criterios que existen para definir estados de cavitación en bombas centrífugas. La misma prueba se realiza para diferentes caudales y así se traza la curva de NPSHr.

### **2.2.3 Criterios de cavitación en bombas centrífugas**

- *Inicio de la cavitación:* En este valor de cabeza disponible en la succión (NPSHd) se puede observar la formación de las primeras burbujas que aparecen en los álabes del impulsor. Se hace de modo experimental con volutas fabricadas en materiales transparentes, aunque teóricamente existe

cavitación no se producen alteraciones captables en el desempeño de la bomba.

- *Inicio caída de presión:* En este valor de NPSHd la cabeza total de la bomba ( $H_B$ ) empieza a caer debido al bloqueo generado por las burbujas de la cavitación en los álabes, es definido como  $NPSH_{r0\%}$ . En esta condición las alteraciones en el desempeño de la bomba empiezan apenas a manifestarse mientras otros efectos aún no son diferenciables del estado normal de la bomba.
- 3% de caída: En este valor de NPSHd la cabeza total de la bomba se reduce en un 3% (fig.6). Es usado por el HI (*Hydraulic Institute*) para definir el mínimo valor de presión a la entrada de la bomba para evitar cavitación ( $NPSH_{r3\%}$ ) y es el calculado bajo norma por los fabricantes. A partir de este punto las cavidades alcanzan un tamaño significativo
- Cavitación completa: Para este valor de NPSHd la cabeza total de la bomba cae de forma abrupta. Los efectos e indicios en la bomba son evidentes.

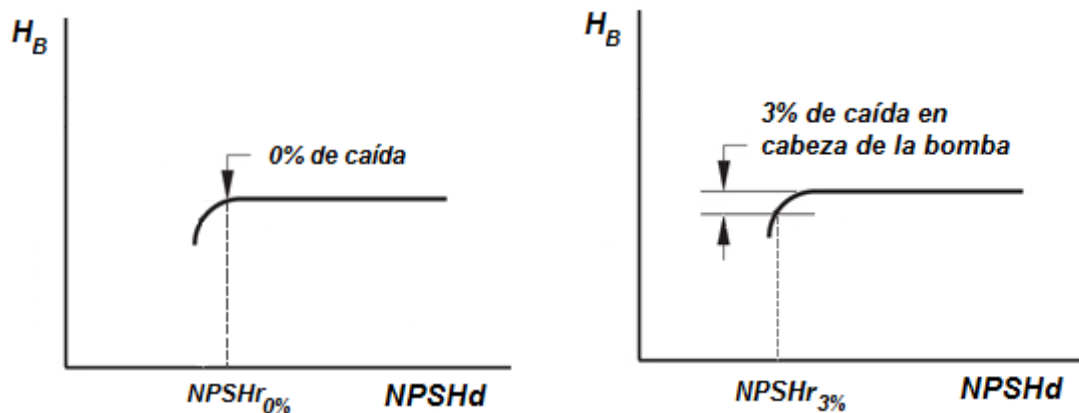


Figura 6. Determinación de NPSHr según *ANSI/HI 1.6 Centrifugal Pump Tests*

Será entonces el criterio de  $NPSH_{r3\%}$  el referente utilizado en el presente trabajo a partir del cual se analizará el estado vibratorio del equipo bajo condiciones de cavitación.

### 2.3 CONSECUENCIAS DE LA CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

La presencia de cavitación en una bomba centrífuga origina alteraciones que afectan el funcionamiento, desempeño e integridad de algunos componentes de la máquina que finalmente repercuten en la vida útil del equipo.

La formación de las cavidades de vapor disminuye el espacio utilizable para el paso de líquido lo cual altera el rendimiento volumétrico de la bomba ya que el volumen de cada burbuja es cientos de veces mayor al de la sustancia en estado líquido, además la cabeza total de la bomba  $H_B$  también disminuye cuando las cavidades son lo suficientemente grandes por lo que la eficiencia hidráulica también se ve afectada.

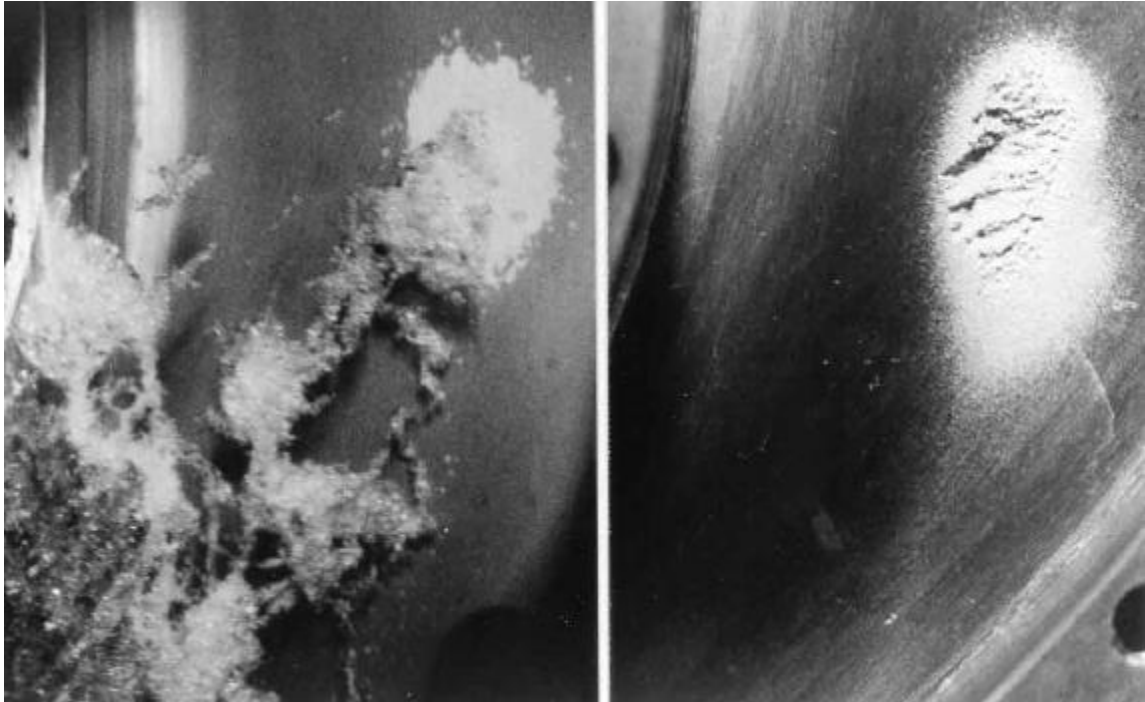
Por otra parte, la implosión continua de las burbujas cerca de una superficie genera altísimas presiones localizadas (del orden de 1000 bar)<sup>3</sup> que conllevan al desprendimiento de material de las superficies en las partes involucradas, especialmente álabes del impulsor y voluta, lo cual se conoce como erosión o *pitting*, véase figura 7.

La cavitación induce pulsos de presión emitidos por la implosión de las burbujas que generan ruido y vibraciones anómalas en el equipo. Las vibraciones pueden conllevar a formas de daño estructural o en rodamientos, sellos y empaquetaduras; mientras el ruido, el cual se asemeja a un sonido arenoso en la

---

<sup>3</sup> GULLICH, Johann. Centrifugal Pumps. 6ª ed. Leipzig. Springer Berlin Heidelberg, 2008. Pág 260.

voluta del equipo, es un indicio claro de su presencia. Ambos efectos se caracterizan por manifestarse en rangos de alta frecuencia (20-10KHz) dependiendo de las condiciones de operación de la bomba.



**Figura 7. Fotografías del patrón de flujo durante la cavitación y erosión causada por esta en el impulsor de una bomba centrífuga<sup>4</sup>**

---

<sup>4</sup> Imágenes tomadas de EARLS B. Christopher; Hydrodynamics of Pumps, Concepts. Oxford. NREC. 1994. 300 pág. Capítulo 6, figura 6.6.

### **3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS**

#### **3.1 PROPÓSITO DEL BANCO DE PRUEBAS**

El propósito del banco instalado es permitir operar la bomba seleccionada bajo 3 condiciones en la succión bajo las cuales tomar posteriormente lecturas vibratorias y concluir que características definen la cavitación. Los estados a tener en cuenta son:

1. Estado normal
2. Cavitación moderada
3. Cavitación avanzada

#### **3.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL BANCO DE PRUEBAS**

El banco de pruebas es una instalación hidráulica básica en circuito cerrado que cuenta con los elementos necesarios para cumplir con los propósitos planteados, los cuales son listados a continuación.

- Bomba centrífuga de ½ hp
- Tubería PVC de 1 1/4"
- 2 válvulas de globo 1 1/4" en bronce
- 4 Soportes de tubería en acero
- 1 válvula de pie de asiento en PVC de 1 1/4"
- 4 juntas universales de PVC de 1 1/4"
- Accesorios de PVC de 1 1/4": Codos, Te's, Adaptadores macho, bujes.
- Vacuómetro y manómetros
- Depósito

En los anexos 1,2 y 3 de este documento se presentan de forma detallada el sistema diseñado, la ubicación de sus componentes y las dimensiones generales de éste.

### 3.3 SELECCIÓN Y DISEÑO DE COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS

**3.3.1 Selección de la bomba centrífuga.** La selección de la bomba se basó en los requerimientos de cabeza de presión de la instalación que constituye el banco de pruebas calculados a partir de la ecuación enunciada en 1.2.2. Respecto al caudal, es establecido un caudal máximo de entrega de 50 gpm.

$$H_T = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + Z_2 - Z_1 + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \Delta H_{1-S} + \Delta H_{D-2}$$

La instalación es un circuito hidráulico cerrado, por lo tanto la cota de elevación es cero, la presión en la superficie libre del recipiente es la atmosférica y debido a que el diámetro de la tubería es constante la velocidad en las tuberías de entrada y salida no varía, luego:

$$P_1 = P_2 = P_{atm}$$

$$Z_1 = Z_2$$

$$U_1 = U_2$$

De este modo, la cabeza que la bomba debe desarrollar debe ser suficiente para vencer la resistencia por fricción que genera la tubería en los tramos de succión y descarga.

$$H_B = \Delta H_{1-S} + \Delta H_{D-2}$$

A continuación se presentan los parámetros tenidos en cuenta para calcular la cabeza de pérdidas en la instalación a diferentes condiciones de caudal.

**3.3.1.1 Cálculo del factor de fricción.** El factor de fricción depende directamente del número de Reynolds, la rugosidad absoluta de la tubería, y el diámetro interno de ésta:  $f = f(\text{Re}, E/D)$ . Para la instalación son aplicados:

- ✓ Rugosidad absoluta del PVC:  $E=0.0015\text{mm}$
- ✓ Diámetro interno de la tubería seleccionada:  $D_i= 40.15\text{mm}$
- ✓ Área transversal :  $A= 1266 \text{ mm}^2$
- ✓ Rugosidad relativa:  $\varepsilon =3.7 \times 10^{-5}$

Respecto al número de Reynolds como se enunció en 1.2.3 es función de la velocidad del flujo, la viscosidad cinemática y el diámetro. Debido a que el sistema puede trabajar en cualquier punto de operación el número de Reynolds es calculado en el rango de entrega de 0 a 50 gpm (Tabla 3).

La viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad a la temperatura de la sustancia ( $\nu = \mu/\rho$ ).

Para agua a condición media de Bucaramanga (25 °C):

$$\mu = 8.91 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s} \text{ y}$$
$$\rho = 997 \text{ Kg/m}^3$$

Luego la viscosidad cinemática  $\nu = 8.93 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

El factor de fricción es calculado usando la ecuación planteada por Coolebrook-White mediante un algoritmo iterativo. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para el intervalo de caudal mencionado.

**Tabla 1. Numero de Re y factor de fricción calculados para diferentes caudales en las condiciones del sistema**

Caudal (gpm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad (m/s)	Re	f
5	0,0003154	2,49E-01	11201,1361	3,007 E-2
10	0,0006308	4,98E-01	22402,2722	2,529 E-2
15	0,0009462	7,47E-01	33603,4083	2,3 E-2
20	0,0012616	9,97E-01	44804,5444	2,156 E-2
25	0,001577	1,25E+00	56005,6805	2,053 E-2
30	0,0018924	1,49E+00	67206,8166	1,975 E-2
35	0,0022078	1,74E+00	78407,9527	1,913 E-2
40	0,0025232	1,99E+00	89609,0888	1,861 E-2
45	0,0028386	2,24E+00	100810,225	1,833 E-2
50	0,003154	2,49E+00	112011,361	1,766 E-2

**3.3.1.2 Cálculo de pérdidas por fricción.** A continuación se presenta sintetizada en una sola relación las fórmulas de Darcy-Weisbach para pérdidas en tubería recta y en accesorios respectivamente.

$$H_p = \left[ f \frac{(L_s + L_d)}{D_{int}} + \Sigma K_m \right] \cdot \frac{U^2}{2g}$$

Para la instalación del banco de pruebas se tienen los siguientes factores que serán reemplazados en la ecuación:

- Factor de fricción listado en Tabla 1.
- Longitud de tubería recta en la succión:  $L_s = 0.79$  cm
- Longitud de tubería recta en la descarga:  $L_d = 107.5$  cm
- Diámetro interno:  $D_{int} = 40.15$  mm.
- La velocidad del flujo  $U$  varía con el caudal y aparece listada en la tabla 1 para el rango de operación de la bomba.
- Accesorios en las tuberías de succión y descarga y sus correspondientes coeficientes de pérdidas<sup>5</sup>

**Tabla 2. Accesorios en la succión y coeficientes de pérdidas**

<b>ACCESORIO</b>	<b><math>K_m</math></b>
Válvula de pie	8.4
Codo 90°	0.6
Válvula de globo (abierta)	10.0
Te (flujo directo)	3x0.6
<b><math>\Sigma K_m</math></b>	<b>20.8</b>

---

<sup>5</sup> Valores tomados de WILLOUGHBY, David. Plastic piping Handbook. 3a ed. [USA](#), Mc Graw Hill, 2004, Pág. 35.

**Tabla 3. Accesorios en la descarga y coeficientes de pérdidas**

<b>ACCESORIO</b>	<b>Km</b>
Te (flujo por ramal)	1.8
Te (flujo directo)	3x0.6
Codo 90°	3x0.9
Válvula de globo (abierta)	10.0
Salida de la tubería	1.0
<b><math>\Sigma K_m</math></b>	<b>17.3</b>

En la tabla 4 aparece listado el valor calculado de pérdidas en las líneas de succión y descarga ( $\Delta H_{p_{suc}}$  y  $\Delta H_{p_{des}}$ ) para diferentes caudales. Una vez determinadas las pérdidas se calcula la potencia requerida por la fuente de energía para cumplir con este requerimiento, de la siguiente forma:

$$P_{ot} = \frac{Q \cdot H_T \cdot \rho \cdot g}{\eta_B}$$

$Q$ = Caudal ( $m^3/s$ )

$H_T$ = Cabeza total a desarrollar por la bomba (m)

$\rho$ = Densidad del líquido a bombear ( $Kg/ m^3$ )

$\eta_B$  = Eficiencia total de la bomba = 85%

**Tabla 4. Cálculo de cabeza de pérdidas en el sistema y potencia requerida para diferentes caudales**

<b>Caudal (gpm)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b><math>\Delta H_{psuc}</math> (m)</b>	<b><math>\Delta H_{pdes}</math> (m)</b>	<b><math>H_p = H_T</math> (m)</b>	<b>Pot (W)</b>	<b>Pot (hp)</b>
<b>5</b>	0,0003154	0,06774	0,057333	0,125072	0,441166	0,0005946
<b>10</b>	0,0006308	0,26977	0,227709	0,497477	3,509488	0,0047298
<b>15</b>	0,0009462	0,60569	0,510598	1,116292	11,81244	0,0159197
<b>20</b>	0,0012616	1,07535	0,905776	1,98113	27,95205	0,0376712
<b>25</b>	0,001577	1,67864	1,413092	3,091729	54,52704	0,0734866
<b>30</b>	0,0018924	2,41549	2,032472	4,447959	94,13532	0,126867
<b>35</b>	0,0022078	3,28585	2,763844	6,049698	149,3731	0,2013114
<b>40</b>	0,0025232	4,28965	3,607097	7,89675	222,8327	0,2754816
<b>45</b>	0,0028386	5,42909	4,563309	9,992402	317,2145	0,3846653
<b>50</b>	0,003154	6,70258	5,630578	12,33316	435,0258	0,4349465

De la tabla 4 se infiere que la máxima potencia necesaria en la instalación es de 0.43 hp. Con base en esto se decide seleccionar una bomba centrífuga con las siguientes características para cumplir con los requerimientos del sistema.

**Tabla 5. Características de la bomba centrífuga seleccionada**

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Potencia nominal (hp)</b>	<b>D<sub>suc</sub> (pul)</b>	<b>D<sub>des</sub> (pul)</b>	<b>Voltaje (v)</b>	<b>Álabes impulsor</b>
Barnes	EC-205	½	1.1/4	1.1/4	115/230	6



**Figura 8. Bomba centrífuga seleccionada para el banco de pruebas**

En el anexo 3 se adjunta la curva característica de la bomba proporcionada por el fabricante.

**3.3.2 Selección de la tubería y accesorios.** La selección del diámetro de la tubería del banco de pruebas es condicionado por la bomba seleccionada. De esta forma los diámetros a usar en la succión y la descarga son de 1.1/4". El material utilizado para la tubería y los accesorios del sistema es PVC (policloruro de vinilo) tipo I, el cual es un polímero ampliamente usado en sistemas de tubería. Es tubería marca PAVCO clasificación RDE 21, fabricada bajo norma técnica colombiana NTC- 382 (basada en ASTM D2241) *tubería de PVC para la conducción de agua potable*. Las características de la tubería aparecen en la siguiente tabla:

**Tabla 6. Características de la tubería seleccionada**

<i>Diametro nominal</i>		<i>Presión máx. a 23°C</i>	<i>Peso</i>	<i>Diametro Exterior</i>	<i>Espesor de pared</i>	<i>Diametro interior</i>	<i>Área de flujo</i>
Pulg.	Mm	Psi	g/m	Mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>
1.1/4	42	200	395	42.16	2.01	40.15	1.266

Es importante aclarar que la presión de trabajo no va a superar bajo ninguna circunstancia los 30 psi (ver Anexo 4), luego la resistencia de la tubería (200psi) es suficiente para resistir las condiciones de operación del sistema.

**3.3.3 Selección de las válvulas del sistema.** Las válvulas pueden ser clasificadas de acuerdo a diferentes tópicos: Dependiendo de su propósito, características de flujo, presión de trabajo o material, entre otras. La selección de la válvula a usar en el banco de pruebas se lleva a cabo teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Fluido a manejar
- Requerimientos funcionales
  - Servicio On-Off
  - Control de caudal o estrangulación
  - Control de presión
  - Control direccional
- Características del flujo y requerimiento de pérdidas en el sistema
- Tamaño de la válvula
- Requerimientos especiales

La instalación emplea agua en un rango de 22 a 25°C a una presión máxima de 30 psi, y la función de la válvula es estrangular el fluido en la succión para de esta forma provocar la aparición de la cavitación en la bomba.

Teniendo en cuenta los tipos de válvulas y sus aplicaciones<sup>6</sup> se recomienda para este tipo de servicio válvulas tipo aguja o globo. Las válvulas de aguja tienen una limitante de tamaño ya que el máximo diámetro que se encuentra en el ámbito local es 1", luego se opta por utilizar en sistemas válvulas de globo (figura 9) cuyas características se encuentran en la tabla 7.

**Tabla 7. Características de la válvula usada en el banco de pruebas**

<i>TIPO</i>	<i>Marca</i>	<i>Tamaño</i>	<i>Material</i>	<i>Presión Máxima</i>		<i>Rango De Temperatura</i>	<i>Estándar fabricación</i>
				Bar	Psi		
Globo PN32 roscada	Pegler	1.1/4"	Bronce	32	464	0 A 100°C @32bar	BS5154 <sup>7</sup> Serie B



**Figura 9. Válvula de globo usada en el banco de pruebas**

<sup>6</sup> DICKENSON, Christopher; Valves, piping and pipeline Handbook, 3a Ed. Elsevier Advanced Technology, sección 1, pag.17

<sup>7</sup> Estándar británico para la especificación de válvulas de globo fabricadas con aleaciones de cobre

**3.3.4 Diseño de los soportes.** El diseño y construcción de los elementos que soportarán la tubería, accesorios y el fluido transportado, son factores de vital importancia para brindar rigidez al sistema y evitar vibraciones ajenas al fenómeno a analizar.

El diseño del soporte se hizo de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASME B31.1<sup>8</sup> en la que se considera este tipo de elementos en una instalación hidráulica. Este estándar remite directamente a las normas específicas relacionadas con el diseño y fabricación de soportes para tubería:

- MSS SP-58: Pipe hangers and supports. Materials, design and manufacture
- MSS SP-69: Pipe hangers and supports. Selection and application

Con base en la información encontrada y las condiciones de operación del banco de pruebas se determinaron los siguientes parámetros de diseño.

**3.3.4.1 Selección del tipo de soporte.** El tipo de soporte a utilizar en una instalación es seleccionado principalmente teniendo en cuenta el efecto de dilatación que ocurre en cada punto de apoyo de una tubería. Debido a que la temperatura del fluido es prácticamente invariable el desplazamiento por efectos térmicos es insignificante luego se opta por usar soportes denominados rígidos.

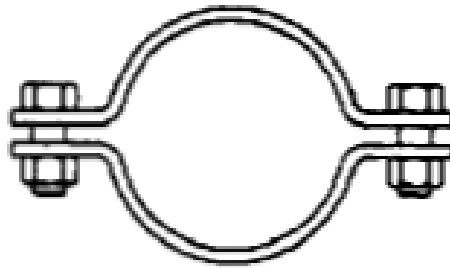
El tipo de soporte se escoge según la tabla 1 de MSS SP-69 y depende de la temperatura de la sustancia transportada, aislamiento de la tubería y dirección de la línea. Para el banco de pruebas la selección se hizo según las siguientes condiciones:

---

<sup>8</sup> ASME B31.1 2004: Design of pipe supporting elements. parte 5 par. 121

- Rango de temperatura: 16 a 48°C
- Aislamiento tubería: Sin aislamiento
- Tubería horizontal

El soporte tipo abrazadera de acero (tipo 4, figura 10) resulta conveniente tanto por su sencillez de fabricación como por su practicidad en el montaje de la instalación. El tamaño del soporte debe ser tal que adopte la forma del diámetro exterior de la tubería más un rango de tolerancia<sup>9</sup>.



**Figura 10. Abrazadera de acero. Imagen tomada de la norma MSS SP-69**

**3.3.4.2 Diseño del vástago de los soportes.** El vástago del soporte (figura 12) debe tener un tamaño mínimo requerido que aparece designado para soportes rígidos sencillos en la tabla 4 de MSS SP-69. Para soportes de tubería con diámetro nominal 1.1/4" es recomendado que el vástago sea de mínimo 3/8" (9.52mm) de diámetro, los soportes utilizados en el banco de pruebas tienen diámetro exterior de 1" cumpliendo así el requisito sugerido por la norma.

---

<sup>9</sup> MSS SP-69,1996 , sección 6. requerimientos dimensionales, párrafo 6.1. pág 2



**Figura 11. Fotografías del vástago del soporte para tubería**

En MSS SP-58, tablas 2 y 3 se lista una amplia cantidad de materiales, especialmente aceros y fundiciones, que pueden ser usados para fabricar tanto las abrazaderas como el vástago. Teniendo en cuenta que el PVC es un material estable e inerte no hay ninguna restricción por ese concepto, las abrazaderas se hicieron en lámina calibre 14 en acero al carbono AISI 1020 junto con los vástagos.

En la figura 12 se muestra una fotografía de uno de estos ya posicionado en el banco y sosteniendo la tubería.



**Figura 12. Soporte de tubería instalado en el banco de pruebas**

**3.3.4.4 Espaciamiento entre soportes.** El espaciamiento entre soportes es relevante en el diseño de la instalación ya que se debe asegurar que la deflexión de los tramos de tubería horizontal sea tolerable y no se vea comprometida la integridad estructural o se generen vibraciones anómalas. En la norma MSS SP-69 el máximo espaciamiento entre soportes para tubería horizontal está establecido en la tabla 3<sup>10</sup>, donde se aconseja para tuberías plásticas seguir las recomendaciones que el fabricante haga a ese respecto. Teniendo en cuenta la sugerencia de la norma se presenta la tabla de espaciamiento entre soportes directamente tomado del catálogo del fabricante de la tubería (tabla 8).

Estos valores permitidos se refieren a tramos de tubería recta llena de fluido, sin embargo, en la instalación hay accesorios que adicionan peso a la línea, luego se decidió hacer una equivalencia en metros de tubería recta<sup>11</sup> a partir del peso de los accesorios ubicados en los tramos de succión y descarga de la instalación.

**Tabla 8. Tabla de espaciamiento recomendado entre soportes.  
Tomada del catálogo de Tubería PAVCO**

Distancia en metros entre soportes recomendada para distintas temperaturas									
Diámetro Nominal		PVC - RDE 21				PVC - RDE 26			
		15°C	27°C	38°C	50°C	15°C	27°C	38°C	50°C
mm	pulg.								
21	1/2								
26	3/4	1.20	1.05	0.90	0.60				
33	1	1.20	1.20	1.05	0.60				
42	1.1/4	1.35	1.35	1.20	0.75				
48	1.1/2	1.65	1.50	1.35	0.90				
60	2	1.65	1.50	1.35	0.90	1.35	1.20	1.20	0.90
73	2.1/2	2.05	1.90	1.75	1.05	1.50	1.50	1.35	0.90
88	3	2.05	1.90	1.75	1.05	1.65	1.65	1.35	0.90
114	4	2.25	2.10	1.95	1.35	1.80	1.65	1.50	1.05

Estos espacios se refieren a tubería sin aislamiento, transportando líquidos con peso específico hasta 1.35g/cm<sup>3</sup>  
Para líneas con aislamiento, redúzcanse los espacios en 20%

<sup>10</sup> Ibid., sección 9.1, Pág 8

<sup>11</sup> Para estos cálculos se tomo el peso de tubería llena como 395g/m, dato tomado de la Tabla 6.

**Tabla 9. Cálculo de longitud equivalente de tubería recta entre soportes por accesorios**

<b>Tramo</b>	<b>Accesorio</b>	<b>cantidad</b>	<b>Peso unitario (g)</b>	<b>Tramo equivalente tubería (m)</b>
<b>Succión</b>	Válvula globo	1	209	0.73
	Junta universal	2	58	0.29
	Adaptador macho	2	24	0.081
	Tubería recta hztal	-	-	0.39
<b>Total succión</b>				<b>1.29</b>
<b>Descarga</b>	Junta universal	2	58	0.170
	Te	2	31	0.078
	Tubería recta	-	-	0.5
<b>Total descarga</b>				<b>0.74</b>

En la tabla 9 se listan los accesorios ubicados entre soportes tanto en la succión como en la descarga. En la succión los soportes son ubicados de forma que resisten una longitud equivalente de 1,29 m de longitud mientras en la descarga la longitud equivalente entre ellos es de 0,74m. De acuerdo a la recomendación del fabricante de la tubería la distancia entre soportes en el banco es la adecuada ya que la longitud entre ellos es tolerable respecto a la longitud límite de 1.35 m para tubería sin aislante según la tabla 8.

Finalmente es presentada una fotografía del banco de pruebas ya instalado en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la escuela de ingeniería mecánica.



**Figura 13. Banco de pruebas para el estudio de cavitación mediante análisis de vibraciones mecánicas instalado en el laboratorio**

## 4. ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL BANCO DE PRUEBAS

En este capítulo se presentan las prácticas de tipo hidráulico que fueron realizadas en el banco de pruebas. En primera instancia se describe el principio de cada una de ellas junto a la configuración del sistema bajo la cual se realizó, posteriormente se presentan los resultados obtenidos y se hace un análisis de éstos.

La instalación está adecuada con los elementos para poder hacer las siguientes prácticas:

1. Caracterización de la bomba centrífuga
2. Inducción de cavitación mediante estrangulamiento

### 4.1 INSTRUMENTACIÓN

Los elementos utilizados para registrar los valores de caudal y presión bajo diferentes condiciones de funcionamiento permiten determinar la presencia de cavitación en la bomba centrífuga del banco de pruebas.

**4.1.1 Registro de presión.** Los valores de presión fueron registrados en 2 puntos de la instalación: En el punto 1 se presenta presión de vacío mientras en 2 se registra presión positiva. Para hacer estas mediciones se usaron los siguientes elementos:

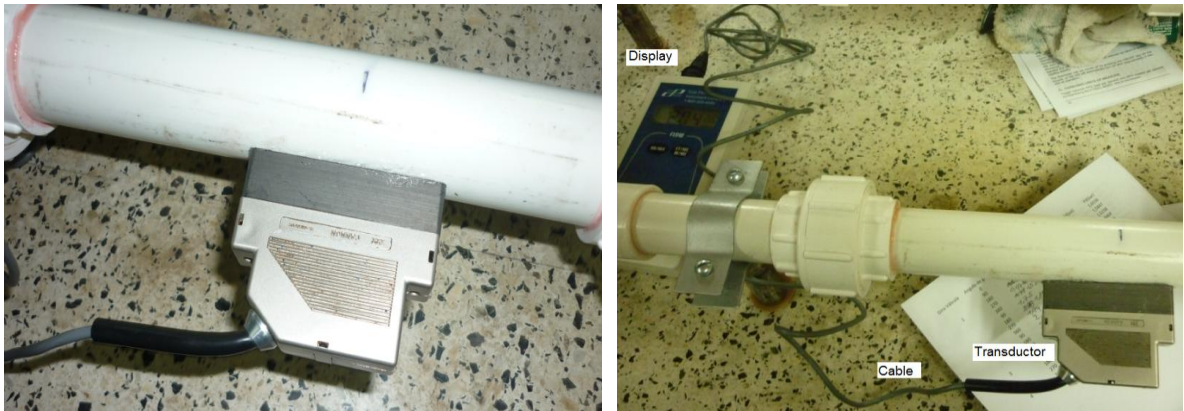
Vacuómetro (1): Rango de medida: 0 a -76 cm Hg (0 a -30 in Hg)

Manómetro tipo Bourdon (2): Rango de medida: 0 a 4.2 bar (0 a 60 psi)

**4.1.2 Registro de caudal.** Para determinar el caudal en la instalación se usó un instrumento portátil no intrusivo que mide de forma precisa la velocidad media de

un flujo al ser puesto de manera adecuada el transductor sobre la superficie de la tubería. Está diseñado para operar sobre tuberías cerradas metálicas o plásticas que contengan líquidos con concentración de sólidos suspendidos mayor a 100 ppm, su rango de medida es desde 0.1 a 9 m/s y tiene una exactitud de  $\pm 2\%$ .

En la figura 14 se muestra el transductor localizado sobre la tubería de succión del banco de pruebas realizando la lectura de la velocidad del flujo. Una vez obtenida la velocidad del fluido se calcula el caudal de forma sencilla multiplicando este valor por el área transversal de la tubería.



**Figura 14. Medición de caudal en banco de pruebas**

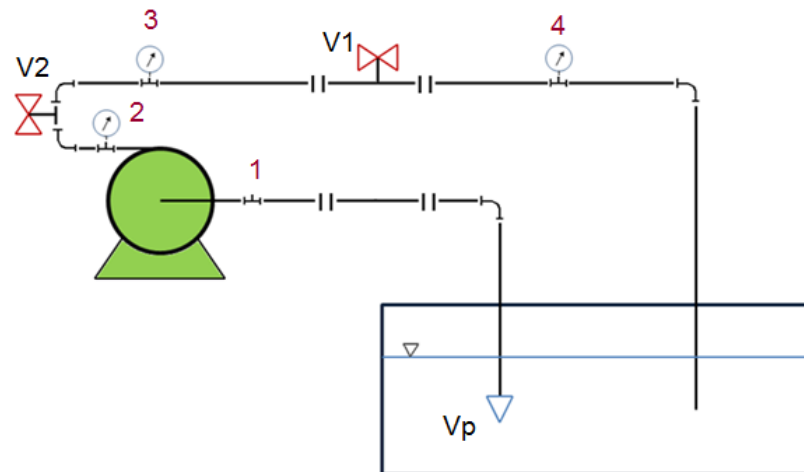
## **4.2 PRUEBAS REALIZADAS**

### **4.2.1 Caracterización de la bomba centrífuga**

**4.2.1.1 Descripción y procedimiento.** Esta práctica se realiza con el fin de relacionar el comportamiento del caudal manejado por la bomba ( $Q$ ) con la cabeza ( $H_B$ ) que ésta desarrolla bajo la configuración 1 del banco de pruebas, con los datos obtenidos se construye la curva de la bomba centrífuga en la instalación. En el siguiente cuadro se presentan las condiciones y características de la prueba.

Tabla 10. Características prueba de caracterización de bomba

Válvula V1	Completamente abierta
Válvula V2	Cierre a intervalos de 90° desde posición de máxima apertura.
VARIABLES A MEDIR	- Medición de caudal en el sistema - Presiones en los puntos 1 y 2
Parámetros a definir	- Caudal que circula por el sistema - Cabeza desarrollada por la bomba $H_B$



**Figura 15. Configuración 1. Banco de pruebas para caracterización de la bomba centrífuga**

**4.2.1.2 Resultados obtenidos.** A continuación son presentados los parámetros necesarios para construir la curva de la bomba. En la tabla 11 aparecen listados para diferentes ángulos de cierre de V2.

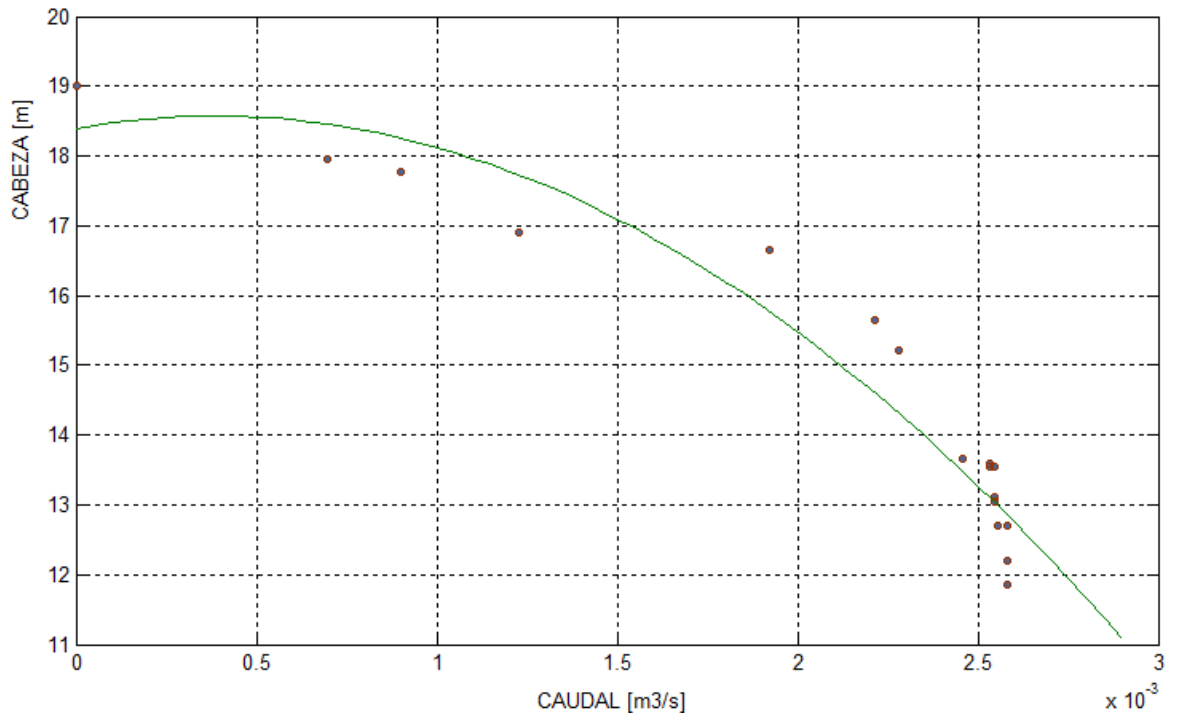
- Velocidad registrada y caudal calculado a partir de ésta.

- Presión registrada en 1 en unidades de cm de mercurio y su correspondiente equivalencia en bar.
- Presión registrada en 2 en unidades de psi y su correspondiente equivalencia en bar.
- Diferencia de presiones en los puntos 1 y 2.
- Cabeza de presión generada por la bomba calculada en metros

Al graficar los resultados obtenidos para cada punto de medida, de modo que los valores de caudal  $Q$  correspondan a las abscisas y los de cabeza  $H_B$  a las ordenadas, se obtiene la curva característica de la bomba centrífuga, tal como se muestra en la figura 16.

**Tabla 11. Velocidad medida, caudal calculado, presiones en los puntos 1 y 2 y cálculo de cabeza de la bomba  $H_B$  para diferentes ángulos de cierre de V2**

Giro Válvula	Angulo de cierre V2	Velocidad (m/s)	Caudal $\times 10^{-3}$ (m <sup>3</sup> /s)	P1 (cm Hg)	P1 (Pa)	P2 (psi)	P2 (bar)	P2+P1 (bar)	$H_B$ (m)
1	0	2,04	2,58264	56	0,7448	6	0,4134	1,1582	11,8539
	90	2,04	2,58264	56	0,7448	6,5	0,44785	1,19265	12,2065
	180	2,04	2,58264	56	0,7448	6,5	0,44785	1,19265	12,2065
	270	2,04	2,58264	57	0,7581	7	0,4823	1,2404	12,6952
	360	2,02	2,55732	57	0,7581	7	0,4823	1,2404	12,6952
2	90	2,02	2,55732	57	0,7581	7	0,4823	1,2404	12,6952
	180	2,02	2,55732	57	0,7581	7	0,4823	1,2404	12,6952
	270	2,01	2,54466	57	0,7581	7,5	0,51675	1,27485	13,0478
	360	2,01	2,54466	57,5	0,76475	7,5	0,51675	1,2815	13,1159
3	90	2,01	2,54466	57,5	0,76475	7,5	0,51675	1,2815	13,1159
	180	2,01	2,54466	58	0,7714	8	0,5512	1,3226	13,5365
	270	2	2,532	58	0,7714	8	0,5512	1,3226	13,5365
	360	2	2,532	58,5	0,77805	8	0,5512	1,32925	13,6046
4	90	1,94	2,45604	59	0,7847	8	0,5512	1,3359	13,6727
	180	1,8	2,2788	60	0,798	10	0,689	1,487	15,2191
	270	1,75	2,2155	60,5	0,80465	10,5	0,72345	1,5281	15,6398
	360	1,52	1,92432	61	0,8113	11	0,7579	1,5692	16,0604
5	90	0,97	1,22802	62	0,8246	12	0,8268	1,6514	16,9017
	180	0,71	0,089886	62	0,8246	13	0,8957	1,7203	17,6069
	270	0,55	0,06963	62	0,8246	13,5	0,93015	1,75475	17,9595
	360	0	0	62	0,8246	15	1,0335	1,8581	19,0173



**Figura 16. Curva característica de la bomba**

**4.2.1.3 Análisis y Conclusiones.** El comportamiento de la cabeza de presión respecto al caudal es el característico de este tipo de bombas, conforme el sistema exige mayor cabeza por parte de la bomba el caudal que circula por él es menor. La curva obtenida varía de la gráfica suministrada por el fabricante (Anexo 4) posiblemente debido a diferentes factores como las condiciones bajo las cuales son realizados ambos ensayos (Altitud sobre el nivel del mar, temperatura ambiente) características de la instalación o calidad de los sellos.

#### **4.2.2 Inducción de cavitación por estrangulamiento**

**4.2.2.1 Descripción y procedimiento.** En esta práctica se busca el punto de transición de condiciones normales en la succión hasta provocar cavitación. Se realiza bajo la configuración 2 del banco de pruebas.

El estado de cavitación es inducido en un punto de operación del sistema cercano al punto de mayor eficiencia de la bomba (BEP), ya que en él se garantiza el funcionamiento óptimo del equipo. Si se realizan pruebas a la derecha o a la izquierda de este punto, es decir con V2 completamente abierta o próxima a cerrarse, se presentan efectos de recirculación a la salida o a la entrada de los álabes que resultan inconvenientes para el análisis vibratorio de la cavitación.

Según datos proporcionados por el fabricante de la bomba el BEP es en el punto en que la bomba suministra 40,5 gpm (ver anexo 4).

**Tabla 12. Características prueba de inducción de cavitación por estrangulamiento**

<i>Válvula V1</i>	Cierre a intervalos de 90° desde posición de máxima apertura.
<i>Válvula V2</i>	Cerrada 1 giro (360°) desde posición de máxima apertura. Caudal de entrega en esta posición 40,54 gpm.
<i>Variables a medir</i>	- Presiones en los puntos 1 y 2
<i>Parámetros a definir</i>	- NPSH disponible en la succión de la bomba - Cabeza desarrollada por la bomba $H_B$

La NPSHd varía con la presión en la succión de la bomba ( $P_1$ ) la cual decrece con el cierre de la V1 y se calcula para la configuración del sistema con base en la relación presentada en 2.2.1 según la forma:

$$NPSHd = \frac{P_{at} - P_v}{\gamma} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_{ps} + \frac{U^2}{2g}$$

Para las condiciones de Bucaramanga (Altitud: 960 msnm, temperatura media: 25°C), temperatura del fluido y la configuración del banco de pruebas los valores para calcular NPSHd son:

$P_{at}/\gamma$  : Cabeza de Presión atmosférica local = 9.2m

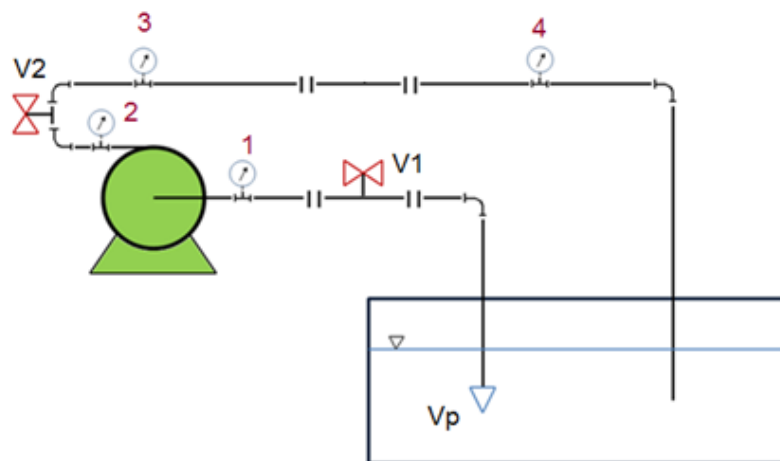
$P_v/\gamma$ : Cabeza de Presión de vapor =0.3m

$Z_{ps}$ : Distancia vertical entre el eje del ojo de succión y el centro del vacuómetro= 0.1m

$\frac{v^2}{2g}$  : Cabeza de velocidad = 0.2 m (para velocidad de 2 m/s en el punto de operación de la prueba)

$P_1$ = Presión registrada por el vacuómetro en la succión de la bomba (varía según el cierre de V1)

Para determinar la zona de aparición de cavitación en la bomba son calculadas la NPSHd y la cabeza de la bomba  $H_B$  para diferentes posiciones de cierre de V1, datos con los que se traza la gráfica que permite identificar cuando se manifiesta la falla.



**Figura 17. Configuración 2. Banco de pruebas para inducción de cavitación por estrangulamiento**

**4.2.2.2 Resultados obtenidos.** En la tabla 13 son presentados los valores de presión registrados en la succión y descarga de la bomba (P1 y P2 respectivamente) y su equivalencia en bar.

**Tabla 13. Valores de presión en los puntos 1 y 2 del sistema durante prueba de inducción de cavitación para diferentes ángulos de cierre de V1**

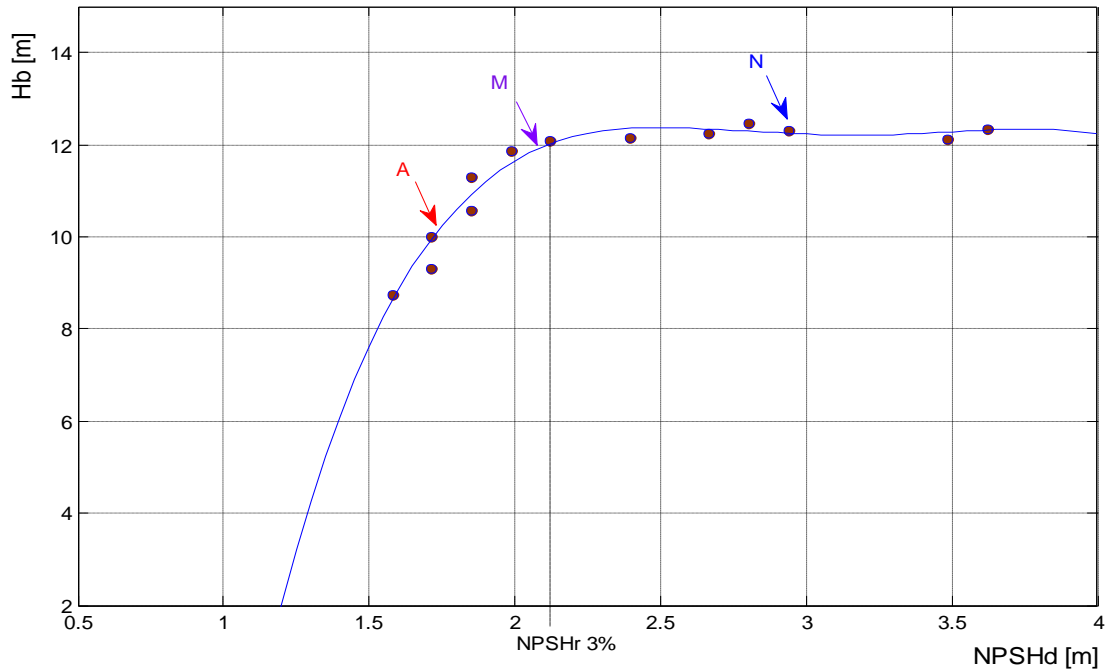
Giro Válvula	Angulo de cierre V1	P1 (cm Hg)	P1 (bar)	P2 (psi)	P2 (bar)
1	0	44	0,5852	9	0,6201
	90	44	0,5852	9	0,6201
	180	44	0,556	9	0,6201
	270	44	0,556	9	0,6201
	360	45	0,5985	8,5	0,58565
2	90	49	0,6517	8	0,5512
	180	49	0,6517	8	0,5512
	270	50	0,665	8	0,5512
	360	51	0,6783	7,5	0,51675
3	90	53	0,7049	7	0,4823
	180	53	0,7049	7	0,4823
	270	55	0,7315	6,5	0,44785
	360	55	0,7315	6,5	0,44785
4	90	56	0,7448	6	0,4134
	180	56	0,7448	6	0,4134
	270	57	0,7581	5	0,3445
	360	57	0,7581	4	0,2756
5	90	58	0,7714	3	0,2067
	180	58	0,7714	2	0,1378
	270	59	0,7847	1	0,0689
	360	59	0,7847	1	0,0689

Con los valores de presión en la succión y la descarga tabulados anteriormente son calculadas  $H_B$  y NPSHd en las posiciones de cierre establecidas para V1. Los resultados se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14. Cabeza de la bomba  $H_B$  y NPSHd calculados durante prueba de inducción de cavitación para diferentes ángulos de cierre de V1**

<b>Giro Válvula</b>	<b>Angulo de cierre V1</b>	<b><math>H_B = P1+P2</math> (bar)</b>	<b><math>H_B</math> (m)</b>	<b>NPSHd (m)</b>
<b>1</b>	0	1,2053	12,3859876	3,62060324
	90	1,2053	12,3859876	3,62060324
	180	1,2053	12,375982	3,48060324
	270	1,2053	12,375982	3,48060324
	360	1,18415	12,35218	2, 8448058
<b>2</b>	90	1,2029	12,3154241	2,66998997
	180	1,2029	12,3154241	2,66998997
	270	1,2162	12,2475467	2,60386732
	360	1,19505	12,2075467	2,16774466
<b>3</b>	90	1,1872	11,9805379	2,13954936
	180	1,1872	11,1507379	2,13954936
	270	1,17935	11,0703949	2,12325405
	360	1,17935	11,0703949	2,12325405
<b>4</b>	90	1,1582	10,8539291	1,98713139
	180	1,1582	10,8539291	1,98713139
	270	1,1026	10,284875	1,81100874
	360	1,0337	10,284875	1,81100874
<b>5</b>	90	0,9781	10,0106442	1,71488609
	180	0,9092	9,30546742	1,71488609
	270	0,8536	8,73641332	1,57876343
	360	0,8536	8,73641332	1,57876343

Como se mencionó el estado de cavitación se infiere de la gráfica NPSHd vs.  $H_B$  la cual se traza de acuerdo a los valores calculados en la tabla 16.



**Figura 18. Gráfica NPSHd vs.  $H_B$  y punto de disminución de  $H_B$  en 3%**

**4.2.2.3 Análisis y conclusiones.** De la gráfica obtenida se infiere que la cabeza de la bomba permanece en un valor constante promedio de 12,36 m. Teniendo en cuenta el criterio de la caída de cabeza total de la bomba de 3% se establece: A medida que el flujo es estrangulado por V1 el punto de cavitación incipiente se alcanza cuando la cabeza total alcanza 12m y la NPSHd 2.15 m. de forma que la cavitación avanzará conforme V1 sea cerrada a partir desde este punto. Los puntos tenidos en cuenta para realizar el análisis vibratorio que garantizan los 3 escenarios de interés aparecen resaltados con los colores indicados en la figura 19 y las condiciones de V1 para dichos puntos se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 15. Condiciones de las válvulas para lograr los estados requeridos en la succión**

<i>ESTADO BOMBA</i>	<i>CONDICIÓN V1</i>	<i>CONDICIÓN V2</i>	<i>H<sub>B</sub></i>	<i>NPSH<sub>D</sub></i>
<i>Normal</i>	360° de cierre	Cerrada 360°	12,352	2, 8448
<i>Cavitación moderada</i>	En 2 giros de cierre (720°)	Cerrada 360°	11,980	2,139
<i>Cavitación avanzada</i>	En 3 giros + 270° de cierre	Cerrada 360°	10,284	1,811

## **5. ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN BOMBA CENTRÍFUGA INSTALADA EN BANCO DE PRUEBAS**

### **5.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINARIA ROTATIVA**

El mantenimiento basado en condición o predictivo se define como la actividad en la cual parámetros físicos asociados con la operación del equipo son medidos y analizados para determinar el estado e integridad de éste.

Entre las variables de funcionamiento que suelen ser monitoreadas en maquinas rotativas, tales como turbinas de gas y vapor, compresores, bombas centrífugas, ventiladores, motores, cajas de engranajes y máquinas herramienta, se encuentran las vibraciones mecánicas.

El análisis de vibraciones es el proceso comprendido desde la captación de señales vibratorias en una máquina en funcionamiento hasta la identificación de fallas en desarrollo a partir de esta información.

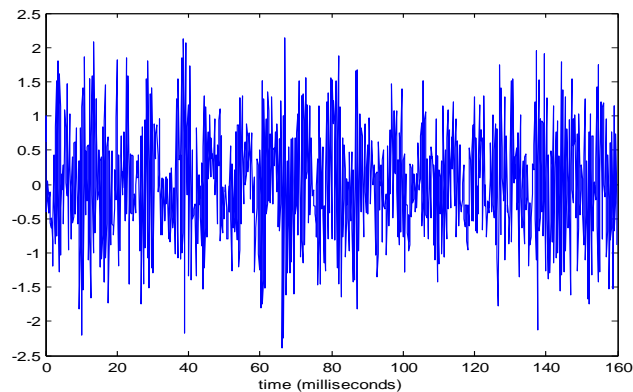
### **5.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES EN EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

Las vibraciones mecánicas son una respuesta oscilatoria a fuerzas dinámicas que aparecen por la interacción entre partes en movimiento de un sistema o por fuentes de excitación externas. Todas las máquinas rotativas vibran mientras funcionan, sin embargo, en presencia de fallas la intensidad de vibración aumenta conduciendo a efectos indeseables en el funcionamiento y la integridad del equipo.

Las señales vibratorias obtenidas de una máquina pueden ser caracterizadas en diferentes formatos, cada uno con ventajas y desventajas respecto a los demás a

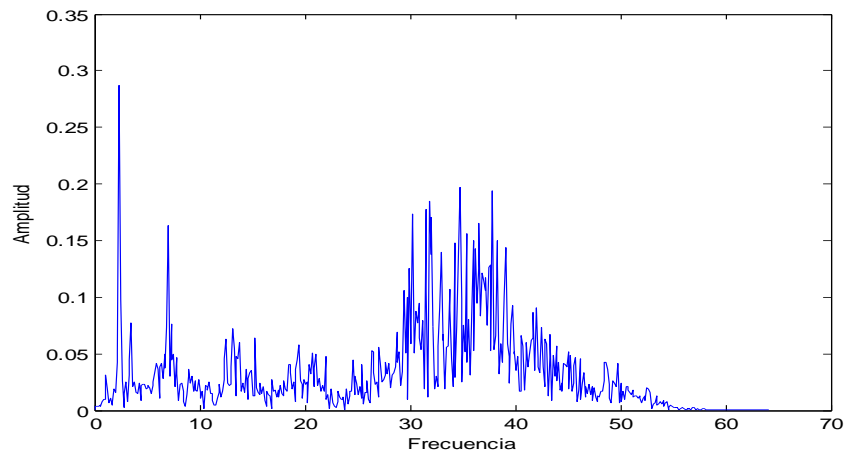
la hora de evaluar la condición operativa de ésta. En el presente trabajo se tratarán análisis vibratorio: En dominio del tiempo y en dominio de frecuencia.

**5.2.1 Vibraciones en dominio de tiempo.** En este formato los datos de la señal son representados como función del tiempo en lo que se denomina *oscilograma* (figura 19). Se caracteriza por mostrar la totalidad de la información captada en términos del valor RMS de la señal, lo que permite hacer inspecciones detalladas de la historia de la onda en el tiempo distinguiendo claramente eventos periódicos, aleatorios, determinísticos (impactos) y/o transitorios.



**Figura 19. Ejemplo de señal en dominio de tiempo u oscilograma**

**5.2.2 Vibraciones en dominio de frecuencia.** En este formato los datos para el análisis de vibración se presentan en lo que se denomina *espectro vibratorio* (figura 20), esto se consigue aplicando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) a la señal en el dominio del tiempo. Se caracteriza por que los componentes periódicos de la señal vibratoria son mostrados de forma individual como picos que representan el nivel de vibración a la(s) frecuencia(s) que se repiten en la onda facilitando la identificación de fallas, las cuales generan respuestas a frecuencias o rangos de frecuencia específicas.



**Figura 20. Ejemplo de señal en dominio de frecuencia o espectro**

### **5.3 PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE VIBRACIONES IMPLEMENTADO EN BANCO DE PRUEBAS**

Una vez construido el banco que garantiza las condiciones hidráulicas requeridas se procede a adquirir señales vibratorias de la bomba instalada para determinar que características, en dominio de tiempo o frecuencia, definen el fenómeno de cavitación.

El esquema de la figura 21 muestra el procedimiento del análisis de vibraciones llevado a cabo en el banco de pruebas, el cual consta básicamente de 4 etapas:

1. Obtención de datos de manera sistemática
2. Almacenamiento y registro
3. Acondicionamiento de la señal
4. Valoración de datos y diagnóstico



**Figura 21. Procedimiento de análisis de vibraciones llevado a cabo en banco de pruebas**

## 5.4 INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA EN ANÁLISIS DEL BANCO

Para el análisis de vibraciones que se llevó a cabo en la bomba centrífuga del banco de pruebas se hicieron dos tipos de pruebas:

1. Determinación de la velocidad de rotación del eje de la bomba
2. Adquisición de señales vibratorias en los puntos de interés de la bomba

**5.4.1 Determinación de la velocidad de rotación del eje de la bomba.** Un parámetro importante a tener en cuenta es la velocidad de giro real del eje de la

bomba. Para determinar dicho valor se usó un foto tacómetro infra rojo *CSI modelo 404*. El cual determina la velocidad de rotación del eje mediante la reflexión de un haz de luz en una cinta reflectiva ubicada en éste.

La velocidad de giro del eje del motor de la bomba centrífuga del banco de pruebas obtenida mediante este dispositivo es de 3510 RPM (58,5 Hz).

**5.4.2 Adquisición de señales vibratorias.** Como se ilustró en la figura 22 la cadena de la señal parte en el equipo objetivo de medición, la vibración de la máquina es captada por un sensor que la envía al analizador de vibraciones el cual transfiere los datos a un computador donde son manejados por un software que permite la visualización y tratamiento de estos. A continuación se describen los dispositivos que fueron empleados para captar y tratar la información vibratoria recopilada del banco de pruebas construido.

- El transductor utilizado es un acelerómetro marca *CSI modelo 350* (figura 22) que posee un tipo de material piezoeléctrico. Su funcionamiento se basa en la cualidad de este tipo de materiales que al ser sometidos a esfuerzos mecánicos o deformación crean un diferencial de voltaje que produce una corriente eléctrica la cual representa el movimiento del equipo analizado.
- El analizador de vibraciones usado es marca *Emerson CSI* referencia 2117 (figura 22). Es un equipo portátil de uso industrial aplicado en el monitoreo de vibraciones y análisis de condición en equipos, se caracteriza por su versatilidad y ergonomía para hacer pruebas en campo.
- El software con el cual los datos fueron manejados es MATLAB versión 2007, el cual posee una herramienta especial para realizar la transformada rápida de Fourier (FFT) a las señales obtenidas en dominio de tiempo



**Figura 22. Analizador de vibraciones y acelerómetro usados en pruebas**

## **5.5 PRUEBAS VIBRATORIAS EN BOMBA CENTRÍFUGA**

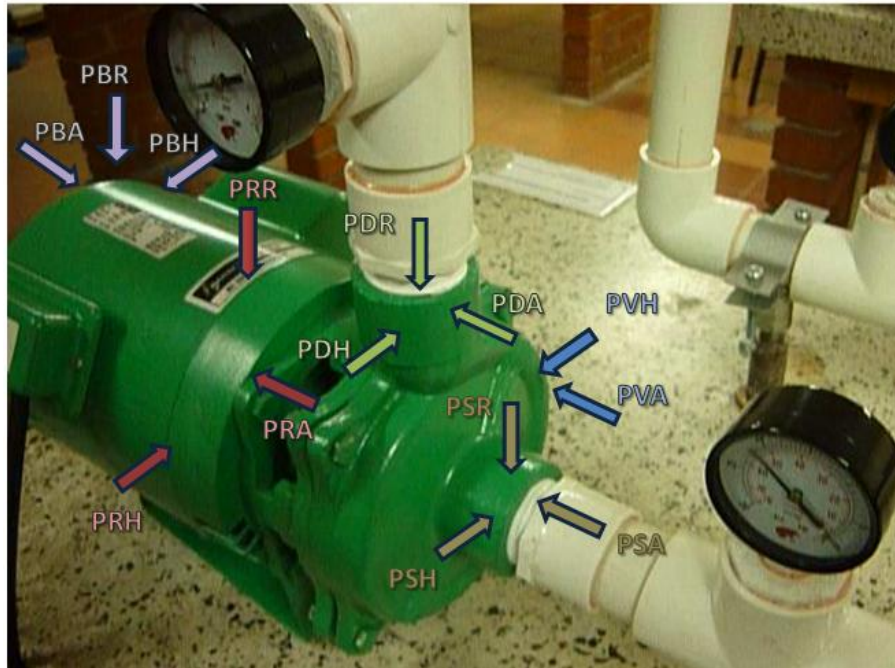
### **5.5.1 Condiciones de las pruebas**

**5.5.1.1 Puntos de medición.** El primer paso consiste en la conversión del movimiento de la máquina en una señal eléctrica mediante un dispositivo llamado transductor, el cual capta la señal vibratoria en el punto donde sea localizado. En la bomba centrífuga del banco de pruebas fueron realizadas lecturas en 5 puntos:

- **Punto S.** Puerto de succión de la bomba
- **Punto V.** Voluta, lado descarga de la bomba
- **Punto D.** Puerto de descarga
- **Punto B.** Rodamiento 1
- **Punto R.** Rodamiento 2

Las lecturas se realizaron en cada punto en las 3 direcciones: Axial, Radial y Horizontal, excepto en el punto V donde solo fue posible medir en las direcciones

axial y horizontal, lo que da como resultado 14 puntos que componen una denominada ruta de medición. El esquema muestra los puntos de la bomba donde fueron hechas las mediciones.



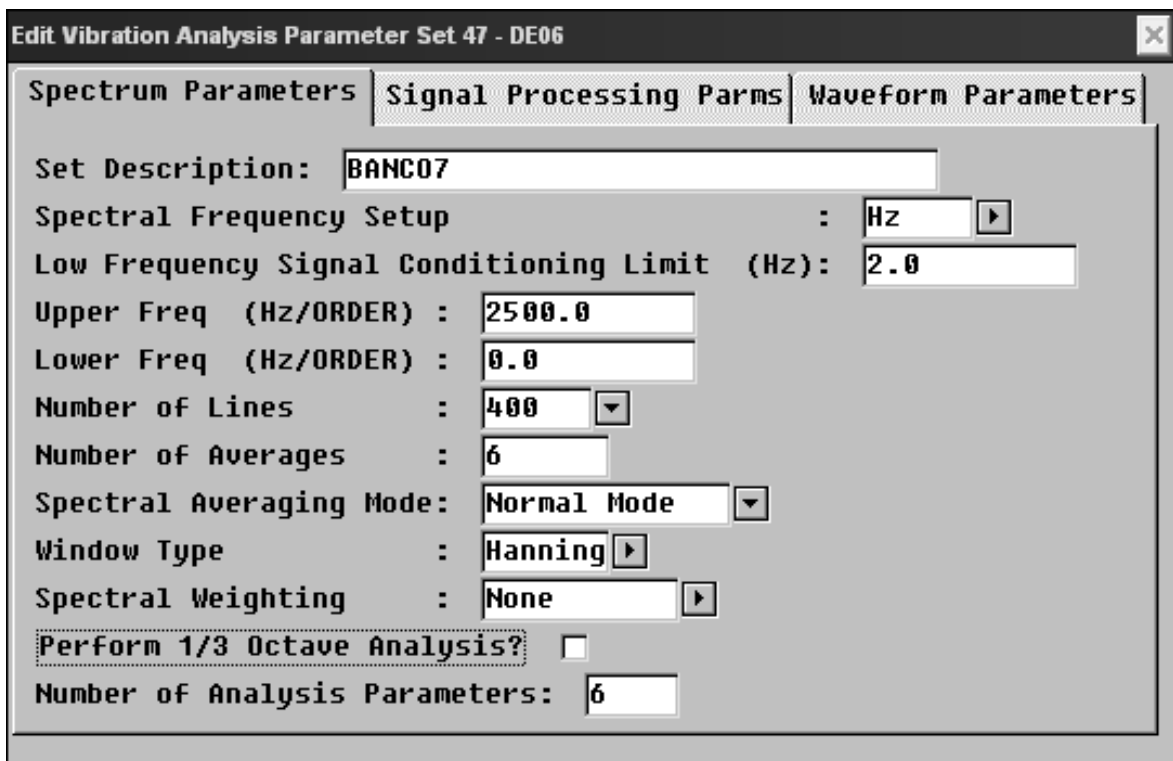
**Figura 23. Ubicación de puntos y direcciones de medición en la bomba centrífuga**

**5.5.1.2 Condiciones hidráulicas.** Cada ruta de medición creada se realiza mientras la bomba es operada bajo cada uno de los 3 estados de operación de interés: Estado normal, cavitación moderada y cavitación avanzada (Cada uno de éstos fue definido en la sección 4.2.2 del presente trabajo).

**5.5.1.3 Parámetros de medición vibratorios.** De forma preliminar se hicieron pruebas para determinar el rango de respuesta vibratoria de la bomba operando bajo cavitación, tomando como base que está establecido en forma general que

este fenómeno se caracteriza por provocar vibraciones aleatorias entre 20 y 5 KHz<sup>12</sup>.

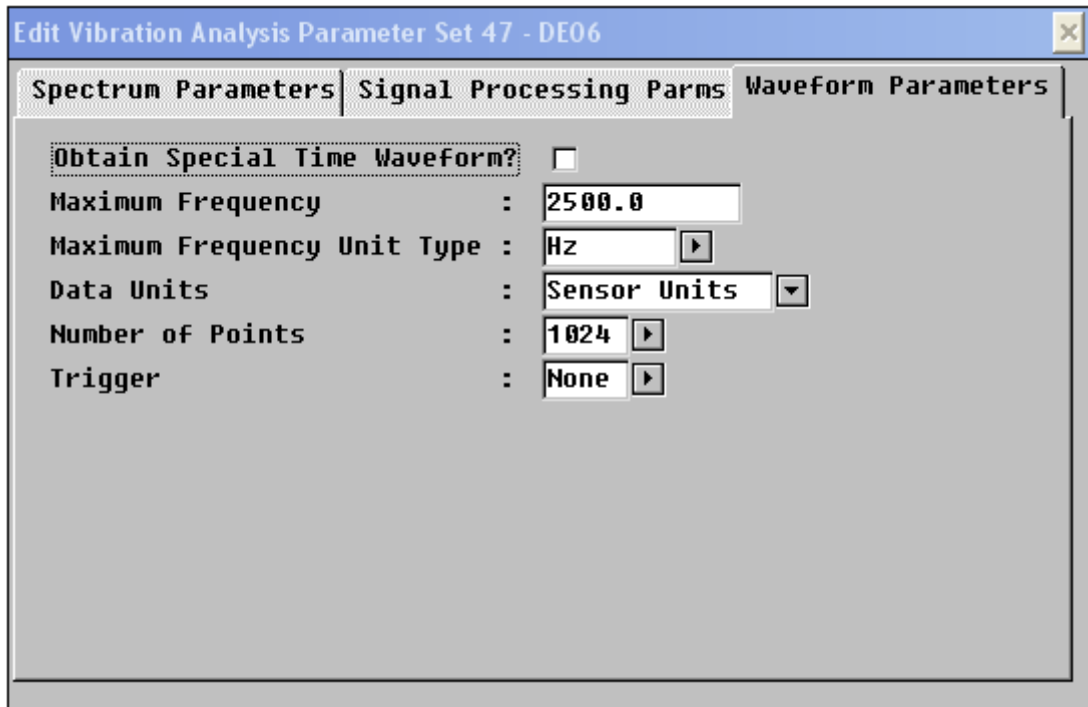
De estas primeras pruebas se dedujo que las medidas entre 0 y 2,5 KHz arrojan información, en términos de frecuencia, útil para efectos de distinguir el comportamiento de la cavitación conforme se va desarrollando en la bomba. Los parámetros de configuración del analizador para llevar a cabo la prueba se presentan en las figuras 24 y 25 tomadas directamente del software<sup>13</sup> del analizador en el proceso de creación de la ruta de medición.



**Figura 24. Parámetros de pruebas vibratorias en bomba centrífuga para espectros**

<sup>12</sup> WOWK, Victor. Machinery Vibration Measurement And Analysis. 3a Ed. Estados Unidos. Mc Graw Hill.1991. Pág. 172

<sup>13</sup>. Computational Systems Incorporated.



**Figura 25. Parámetros de pruebas vibratorias en bomba centrífuga para señal en dominio de tiempo**

De esta configuración se obtiene una frecuencia de muestreo 2,44 Hz

**5.5.2 Resultados obtenidos.** De los 14 puntos que componen la ruta de medición son presentadas las señales en dominio de tiempo y los espectros de aquellos donde la falla mostró respuestas significativas para su detección. En cada imagen aparecen tres señales simultáneas de acuerdo a la siguiente convención.

- Estado Normal
- Cavitación moderada
- Cavitación avanzada

### 5.5.2.1 Señales en dominio de tiempo

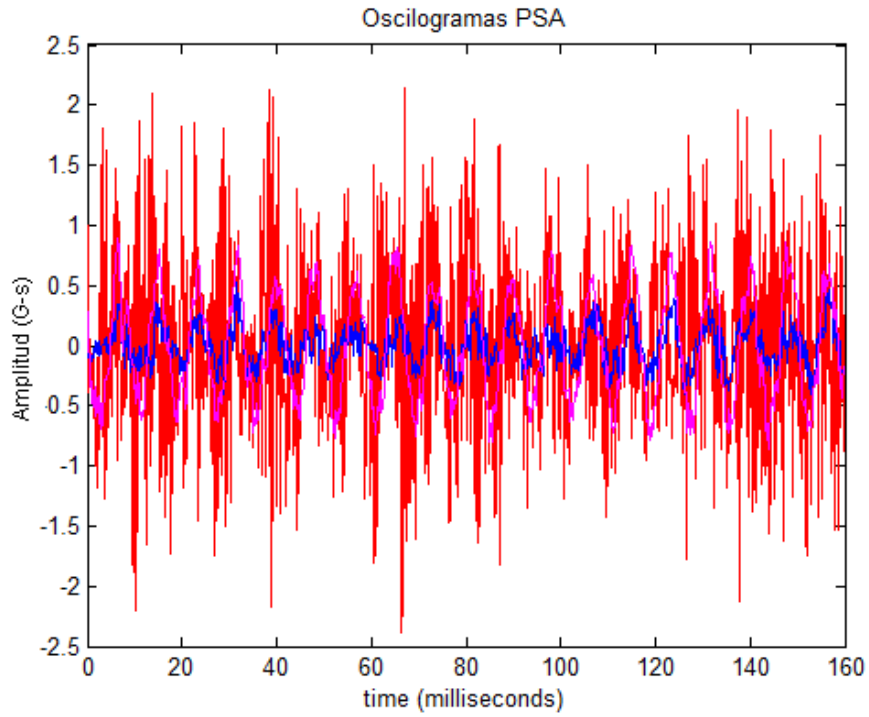


Figura 26. Oscilogramas captados en el punto de succión. Dirección axial

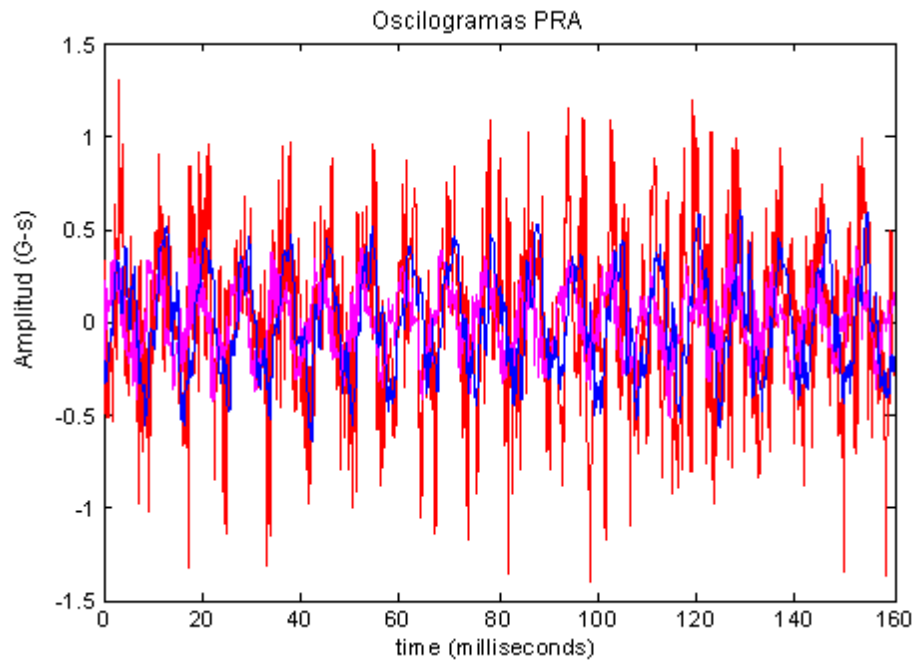
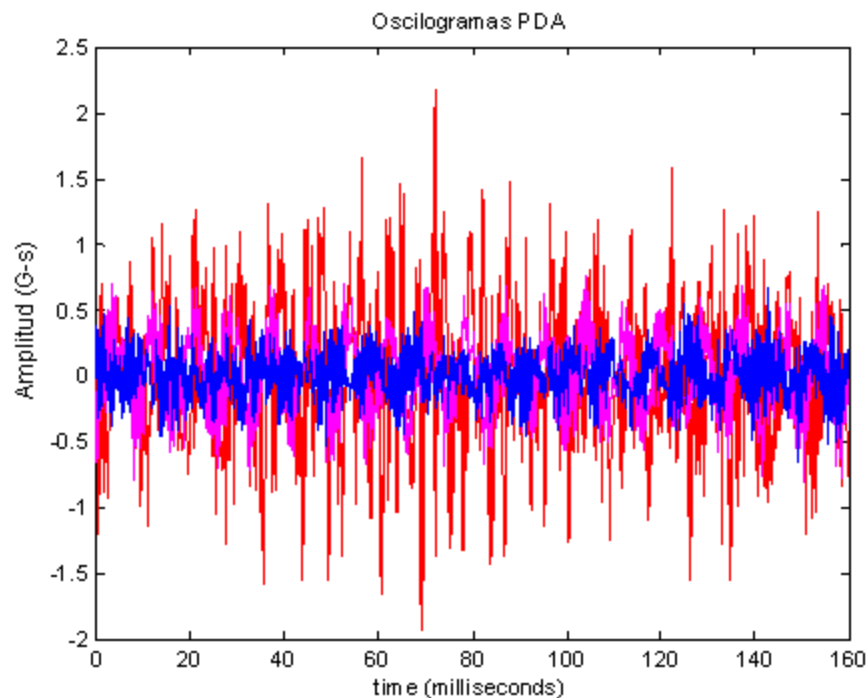


Figura 27. Oscilogramas captados en el punto de succión. Dirección radial

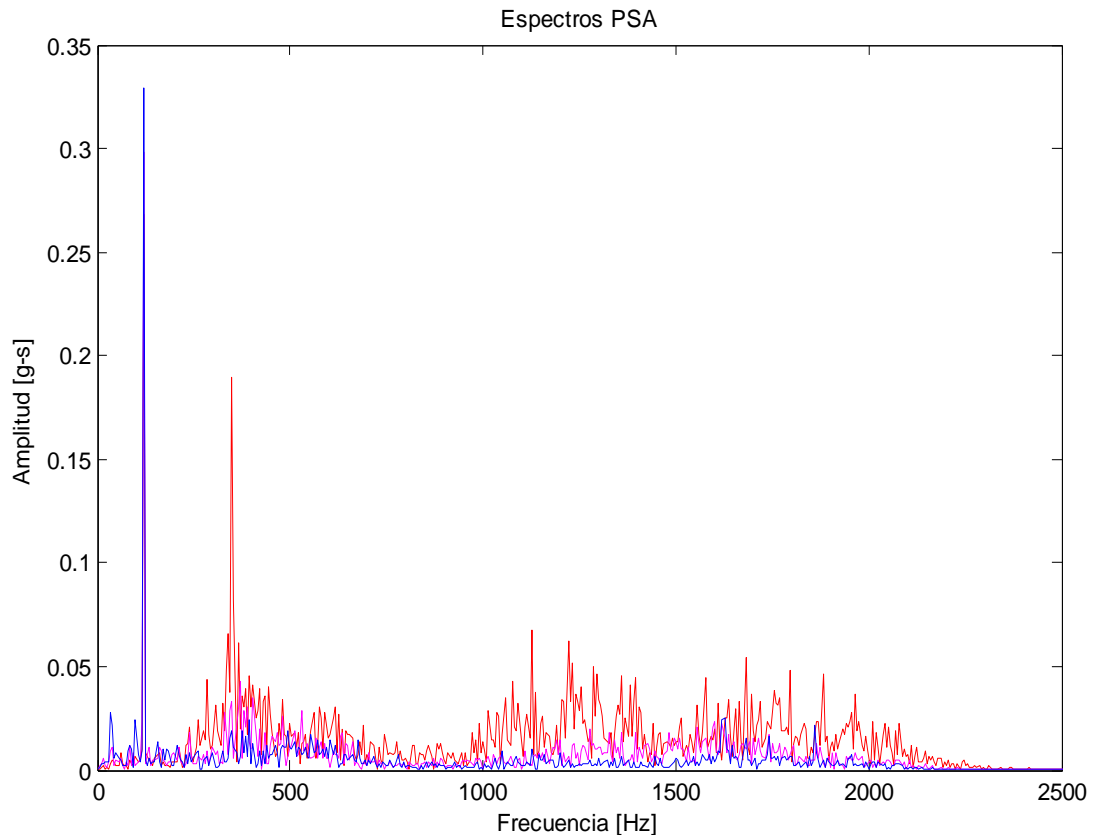
Las figuras 24 y 25 son oscilogramas captados en la succión de la bomba en las direcciones axial y radial. En ambas figuras la señal bajo estado normal se caracteriza por amplitudes que no superan los 0.5 G's. En la lectura hecha en dirección axial el estado de cavitación moderada se manifiesta con un aumento leve en la amplitud respecto al estado normal. En la dirección radial las diferencias entre estos estados no son claras para diferenciarlos directamente. Bajo cavitación avanzada la onda aumenta su amplitud y se comporta de forma aleatoria en el tiempo. Se observan en los 3 puntos bajo este estado gran cantidad de oscilaciones en minúsculos intervalos de tiempo.



**Figura 28. Oscilogramas captados en el punto de descarga. Dirección axial**

En el oscilograma captado en la descarga de la bomba en dirección axial se distinguen los 3 escenarios de funcionamiento de la bomba. La cavitación se muestra de nuevo como una señal desordenada y con amplitudes que llegan hasta los 2 G's. La cavitación moderada aparece con mayor amplitud que el estado normal pero sin rasgos notorios de comparación.

### 5.5.2.2 Señales en dominio de frecuencia



**Figura 29. Espectros captados en el punto de succión. Dirección axial**

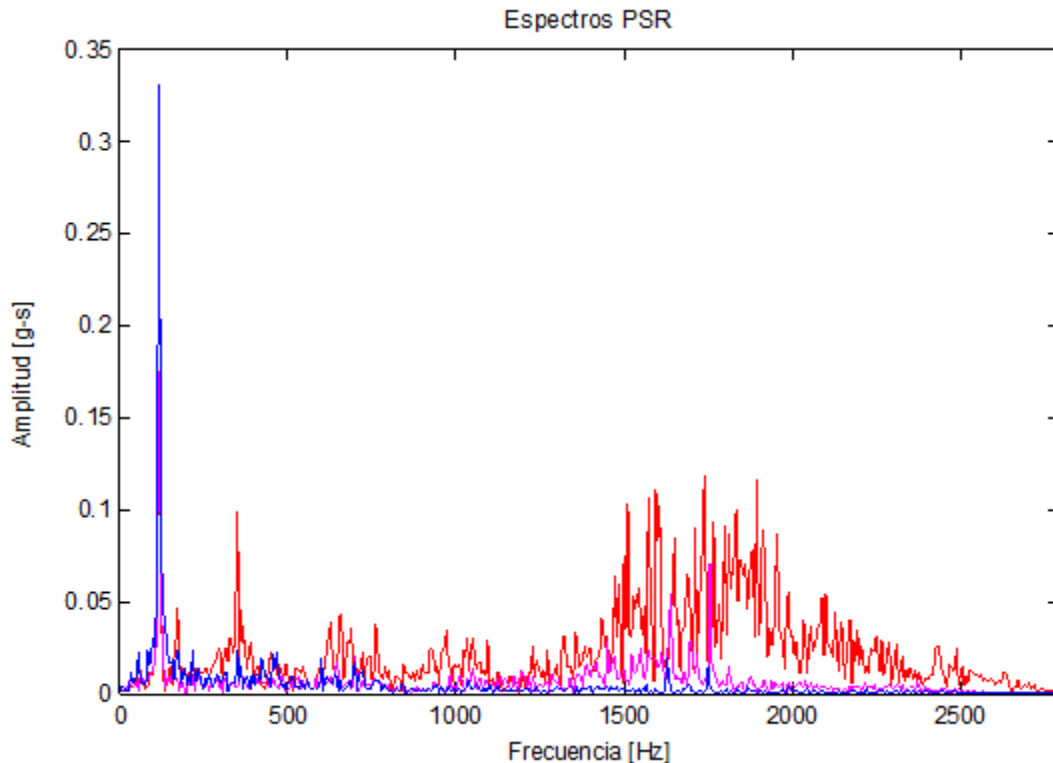
En las figuras 29-33 se aprecia un pico predominante a 120 Hz que aparece en todos los puntos de la ruta y se atribuye a una vibración inducida eléctricamente<sup>14</sup> desde el motor eléctrico de la bomba por lo cual no se asocia con la cavitación.

El segundo pico que predomina en los espectros ocurre a 350 Hz en condiciones de cavitación avanzada y coincide con la frecuencia de paso de álabes BPF (58,5 Hz x 6 álabes). En PSA (fig.29, punto succión-dirección axial) se nota como este pico alcanza los 0.19 G's y en PDA (fig. 29) 0.16 G's, mientras en estado normal dicha amplitud no supera los 0.03 G's bajo ninguna situación. En PSA Se

---

<sup>14</sup> WHITE, Glenn. Introducción al Análisis de Vibraciones. Woburn, MA. 1ª ed. Traducida. Azima DLI. 2000. Pág. 118

presentan vibraciones aleatorias de baja amplitud de 300 a 700 Hz alrededor del pico a BPF y en la zona de 1 a 2.3 KHz.

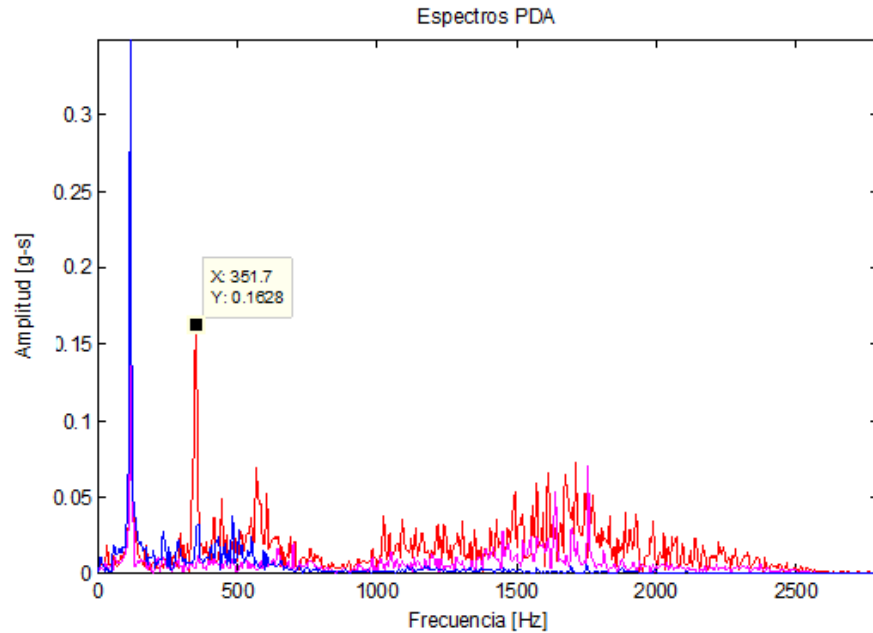


**Figura 30. Espectros captados en el punto de succión. Dirección radial**

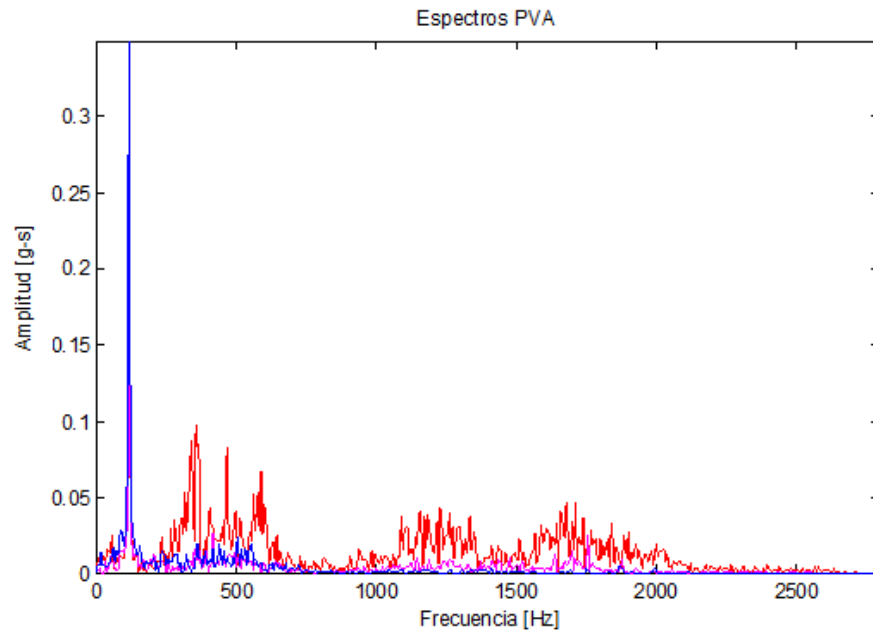
En los espectros mostrados (figuras 30-33) se observa que bajo cavitación desarrollada se excitan frecuencias de forma aleatoria en el rango de 1 a 2,3 KHz, siendo más acentuado este factor en PSR donde llegan a niveles de amplitud superiores al pico presentado a BPF. En PSA, PSR Y PDA el estado de cavitación moderada se distingue del estado normal como una leve perturbación en los rangos de vibración aleatoria, lo cual puede ser tomado como un síntoma inicial de falla.

En PVA Y PRR (Figs. 27 y 28) aparece también una zona de vibraciones aleatorias de 300 a 700 Hz junto las de altas frecuencias (1 a 2.3 KHz). Sin embargo en

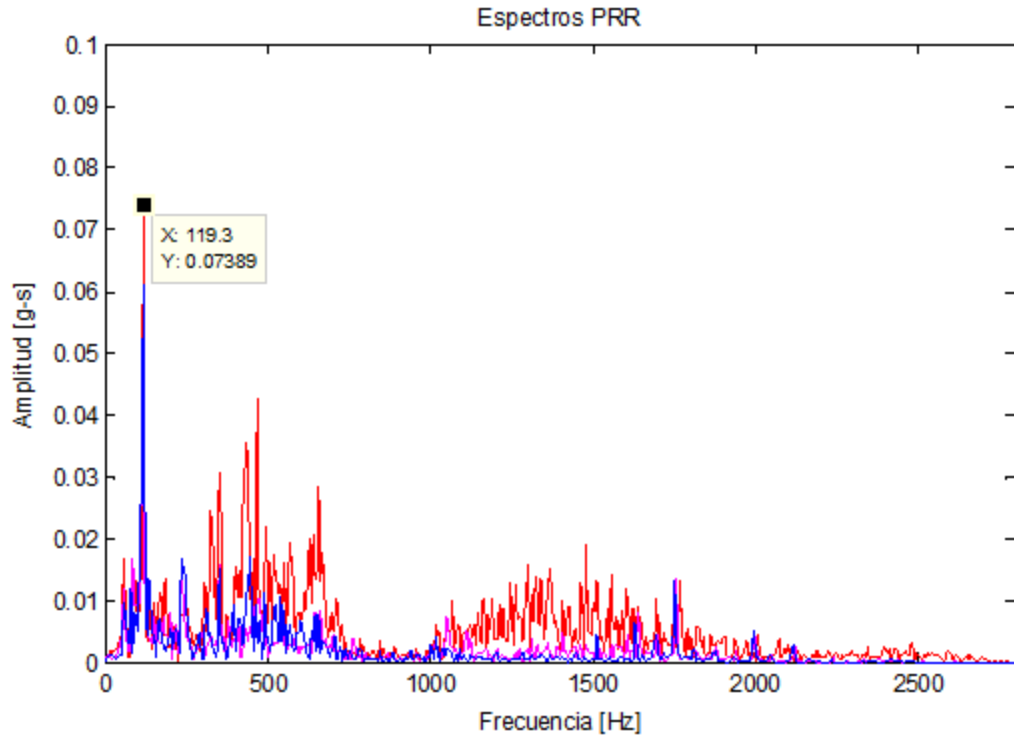
dichos puntos la amplitud global es relativamente baja respecto a los niveles presentados en otros puntos de medición alcanzando como máximo 0.04 G's. En dichos puntos además el estado de falla moderada no tiene diferencias significativas respecto al estado normal.



**Figura 31. Espectros captados en el punto de descarga. Dirección axial**



**Figura 32. Espectros captados en punto de voluta lado descarga. Dirección axial**



**Figura 33. Espectros captados en el punto rodamiento 1. Dirección radial**

**5.5.3 Análisis y conclusiones.** De las señales en dominio de tiempo obtenidas de la bomba centrífuga del banco de pruebas instalado operando bajo los 3 escenarios propuestos se puede concluir:

- De los 14 puntos medidos solo se seleccionaron 3 oscilogramas como representativos para efectos del análisis llevado a cabo. En este caso el puerto de succión arroja en dos direcciones información representativa.
- La cavitación se nota de forma clara en los oscilogramas expuestos como una onda de alta amplitud y comportamiento errático. Se notan oscilaciones en períodos de tiempo minúsculos, producto del golpeteo de las pequeñas

burbujas que colapsan continuamente contra la estructura de la bomba bajo cavitación.

De los espectros obtenidos de la bomba centrífuga del banco de pruebas instalado operando bajo los 3 escenarios propuestos se concluye:

- La cavitación avanzada se caracteriza por la excitación de la frecuencia correspondiente a paso de álabes BPF, también genera vibraciones aleatorias de 1 a 2,5 Khz de baja amplitud (promedio de 0,03 g's).
- Cuando la bomba opera bajo cavitación moderada la frecuencia a BPF no se puede tomar como factor determinante de falla ya que como se ve en los espectros en PSA, PSR y PDA (figs. 24, 25 y 26) no genera ninguna respuesta a dicho valor. Se puede concluir que perturbaciones menores en los rangos que ocurre la cavitación ya desarrollada (1 a 2,5 KHz) son indicio de la presencia de cavitación leve en el equipo, caso que se puede corroborar si existen datos previos de la bomba trabajando en estado normal para poseer un referente de comparación.
- El punto de medición donde se encuentran más espectros con información relevante es el puerto de succión; ya que en 2 direcciones, axial y radial, se puede distinguir el estado de la bomba bajo cavitación avanzada, moderada y en estado normal de operación.
- Las lecturas tomadas en dirección axial de la ruta arrojaron los espectros más significativos, fueron seleccionadas como determinantes las lecturas tomadas en esta dirección en los puntos de succión, voluta y descarga de la bomba.

#### **5.5.4 Recomendaciones**

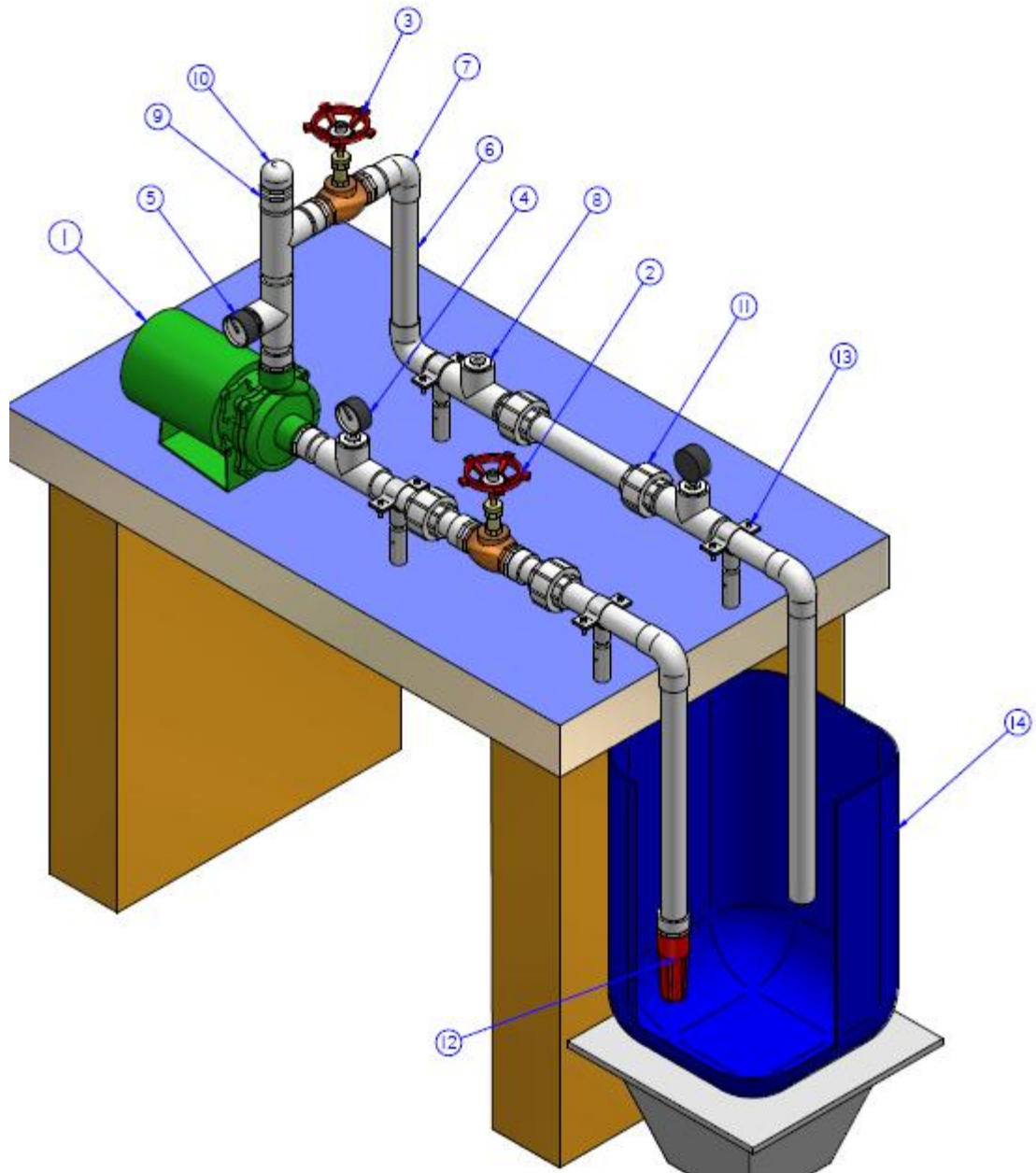
- Manipular los datos obtenidos con un programa de manejo matricial tipo MATLAB para presentar las señales de forma simultánea, ya que el programa de soporte del analizador no permite llevar a cabo este tipo de visualizaciones de tipo comparativo.
- Realizar el estudio bajo las condiciones en la succión establecidas mediante la adquisición de señales acústicas y comparar los resultados de la respuesta entre ambos tipos de oscilaciones.
- Con los datos obtenidos en cada prueba aplicar técnicas de tratamiento de señales para desarrollar programas de detección y diagnóstico de falla automáticos.

## BIBLIOGRAFIA

- ✓ GULLICH, Johann. Centrifugal Pumps. 6<sup>a</sup> ed. Leipzig. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 923 pág.
- ✓ KARASSIK, Igor J.; MESSINA, Joseph P.; COOPER, Paul; HEALD, Charles. Pump Handbook. 4<sup>a</sup> ed. New York. Mc Graw-Hill. 2008. 1853 pág.
- ✓ STERLING FLUID SYSTEMS GROUP. Principios básicos para el diseño de instalaciones de bombas centrífugas. 7<sup>a</sup> ed. Madrid © Sterling Fluid Systems B.V, 2003. 377 pág.
- ✓ ZINA, Tan Chek, LEONGA, Salman and Lee Yuk CHOI. Field investigation of cavitation and flow induced vibrations in submerged vertical pumps in a power plant. WCEAM paper 226. (2006)
- ✓ JENSEN, Jeremy; DAYTON, Kenwood. Detecting Cavitation in Centrifugal Pumps Experimental Results of the Pump Laboratory. Magazine Orbit Research and Development. (2000).
- ✓ SCHEFFER, Cornelius; Girdhar, Paresh. Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. 1<sup>a</sup> ed. Burlington, MA. Elsevier. 2004. 252 Pág.
- ✓ SPECTRA QUEST INC. Air Bubble and Cavitation Vibration Signatures of a Centrifugal Pump. Spectraquest inc. Mayo 2006.
- ✓ DE SILVA, Clarence. Vibration Monitoring, Testing and Instrumentation. 1a ed. Boca raton, FL. CRC Press – Taylor and Francis Group. 2007. 648 pág.

## ANEXO 1

### ESQUEMA DE DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS



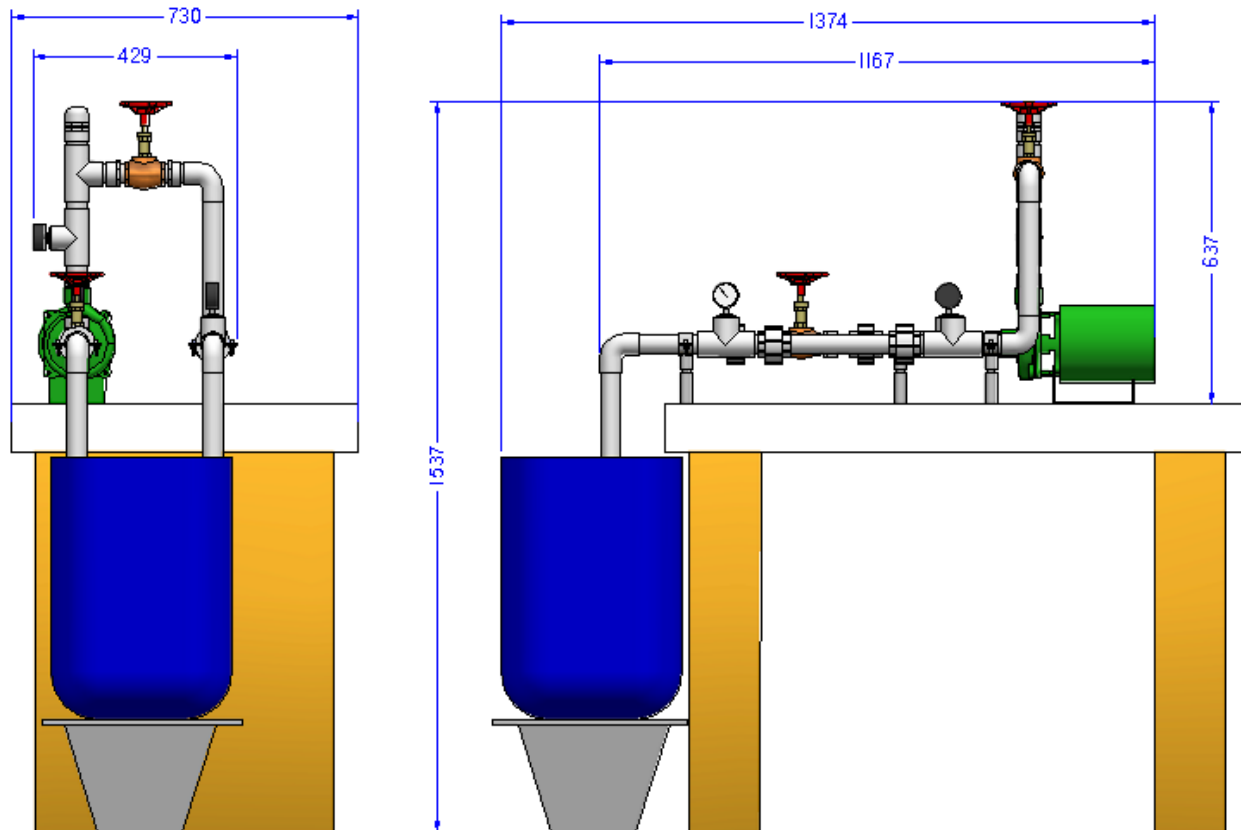
## ANEXO 2

### COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS

No.	Nombre	Cant.
1	Bomba centrífuga 1/2 hp	1
2	Válvula de globo en bronce succión	1
3	Válvula de globo en bronce descarga	1
4	Vacuómetro	1
5	Manómetro	1
6	Tubería PVC 1_1/4"	1
7	Codo a 90° PVC 1_1/4"	4
8	Te PVC 1_1/4"	4
9	Adaptador macho roscado PVC 1_1/4	4
10	Tapón PVC 1_1/4"	1
11	Junta universal PVC 1_1/4"	1
12	Válvula de pie de asiento 1_1/4"	1
13	Soporte de tubería en acero	4
14	Depósito	1

### ANEXO 3

#### DIMENSIONES GENERALES DEL BANCO DE PRUEBAS



## ANEXO 4

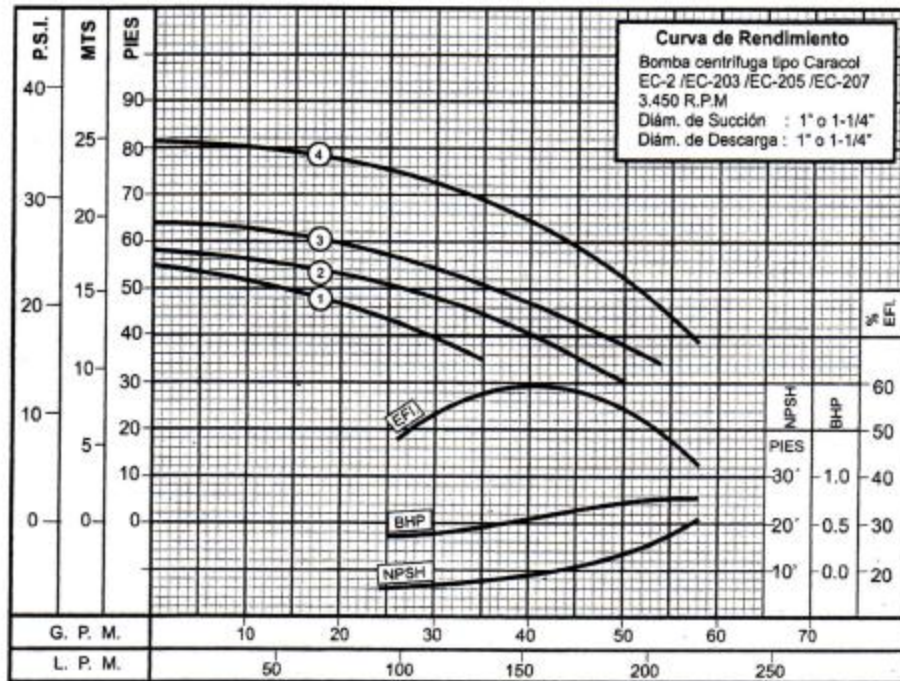
### CURVAS CARÁCTERÍSTICAS Y DATOS DE LA BOMBA CENTRÍFUGA DEL BANCO DE PRUEBAS

#### CARACTERÍSTICAS

- ◆ Bomba centrífuga de construcción monobloque fabricada en hierro fundido.
- ◆ Diámetro de succión de 1" o 1-1/4" y descarga de 1" o 1-1/4" (según modelo)
- ◆ Impulsor cerrado fabricado en plástico de alta resistencia
- ◆ Temperatura máxima de operación 70°C
- ◆ Motores a prueba de goteo, 3.450 RPM 60Hz, NEMA C 56J

#### APLICACIONES

- ◆ Uso doméstico
- ◆ Aprovechamiento de aguas limpias
- ◆ Refrigeración de maquinaria
- ◆ Llenado de tanques y bebederos
- ◆ Recirculación de agua en piscinas
- ◆ Pequeños equipos de presión



No	MODELO	HP	VOLTAJE	AMP.	FASES	DIA. IMP.	oSUCC.	oDESC.
1	EC-2	1/4	115	7.8	1	3.700"	1"	1"
2	EC-203	1/2	115/230	10.4/5.2	1	3.690"	1-1/4"	1-1/4"
3	EC-205	1/2	115/230	10.4/5.2	1	4.000"	1-1/4"	1-1/4"
4	EC-207	3/4	115/230	13.6/6.8	1	4.560"	1-1/4"	1-1/4"



## ANEXO 5

### PROCEDIMIENTO PARA LLEVAR A CABO EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL BANCO DE PRUEBAS

En este documento se describe de forma resumida y práctica el protocolo a seguir para llevar a cabo satisfactoriamente las pruebas vibratorias consignadas en el presente trabajo.

#### 1. OBJETIVOS

1.1 Elaborar la ruta de medición con los parámetros adecuados para realizar las mediciones vibratorias en el equipo.

1.2 Manipular los elementos del banco de pruebas para operar la bomba centrífuga del banco bajo las 3 condiciones de interés:

- ✓ Estado normal
- ✓ Cavitación moderada
- ✓ Cavitación avanzada

1.3 Realizar la ruta de medición bajo cada una de las condiciones de interés en la bomba centrífuga del banco de pruebas.

#### 2. PROCEDIMIENTO

##### 2.1 PARÁMETROS PARA ELABORACIÓN DE RUTA

Los parámetros presentados son una guía para la elaboración de la ruta en el software del analizador de vibraciones: CSI Master Trend. Versión 3.50.

Deben realizarse paso a paso según se explica.

1. Crear ruta o estación:

*Database Setup Management >> Create new file >> Nombrar ruta o estación*

2. Crear máquinas:

*Database Setup Management >> Add/Edit old info >> Machine info >> Crear máquinas: Normal, moderada, Avanzada*

3. Crear puntos:

*Database Setup Management >> Add/Edit old info >> Measurement point info >> Crear Puntos en cada máquina.*

- ✓ **Puntos:** Succión, Voluta lado descarga, Descarga, Rodamientos.
- ✓ **Direcciones en cada punto:** Axial, Radial y Horizontal. (Excepto en la voluta donde solo es posible medir en las direcciones axial y horizontal)

4. Ingresar conjunto de parámetros del análisis:

*Database Setup Management >> Add/Edit old info >> Ingresar parámetros*

- ✓ Frecuencia mín: 0 Hz
- ✓ Frecuencia máx: 2500 Hz
- ✓ Número líneas: 400
- ✓ Promedios: 6
- ✓ Demás datos configuración por defecto

## 2.2 PROTOCOLO PARA OPERACIÓN DE BOMBA CENTRÍFUGA

1. Cebado de la bomba.

Dado que el uso del banco de pruebas es poco frecuente se recomienda que antes de poner en marcha la bomba se realice el cebado de la tubería de succión del sistema. Para cebar la bomba se retira el tapón roscado (elemento 10, Anexos

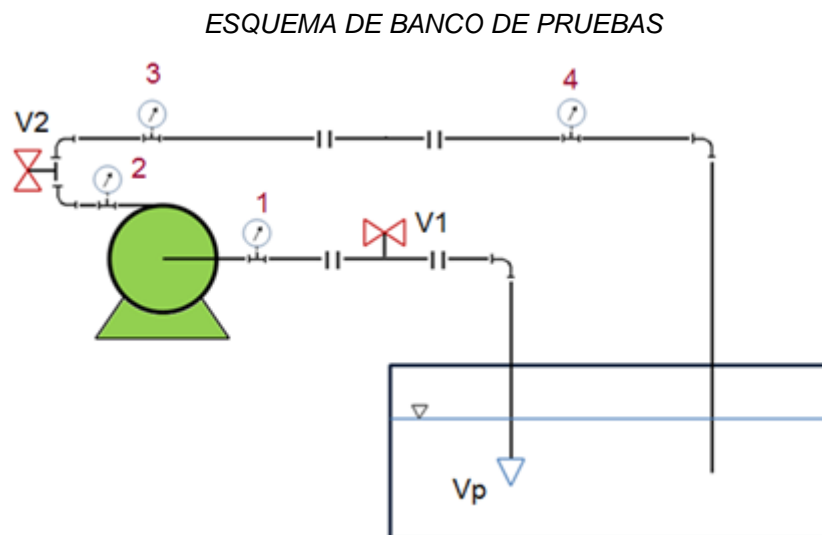
1 y 2) y mediante un embudo se inunda la tubería con agua hasta que el nivel supere la descarga de la bomba.

## 2. Puesta en marcha de la bomba

Se conecta la bomba al puerto de alimentación de 110 V ubicado en la mesa del banco. Una vez empiece a fluir el agua por la instalación esperar un minuto mientras el régimen del fluido se uniformice.

### 1. Posicionamiento de válvulas para inducir estados de interés

Para realizar las rutas de medición vibratorias se debe asegurar el funcionamiento de la bomba bajo las condiciones hidráulicas ya definidas. Las válvulas deben cerrarse desde la posición inicial completamente abierta de acuerdo a la tabla mostrada a continuación para lograr dichos estados:



CONDICIONES DE VÁLVULAS DEL BANCO PARA OPERAR BOMBA

BAJO ESTADOS DE INTERÉS

<i>ESTADO BOMBA</i>	<i>CONDICIÓN V1</i>	<i>CONDICIÓN V2</i>
<b><i>Normal</i></b>	Cerrar 1 giro (360°)	Cerrada 360°
<b><i>Cavitación moderada</i></b>	Cerrar 2 giros (720°)	Cerrada 360°
<b><i>Cavitación avanzada</i></b>	Cerrar 3 giros + 270°	Cerrada 360°