

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ANÁLISIS DE CAVITACIÓN PARA MODELO CFD DE BOMBA
CENTRÍFUGA MONOCELULAR Y COMPARACIÓN CON DATOS
EXPERIMENTALES A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

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

Profesor guía:

Sr. Fabián Pierart Vásquez.

EDUARDO ESPINOZA CANDIA

CONCEPCIÓN – CHILE

2018

Sumario:

Este proyecto tiene como finalidad principal crear un modelo simulado mediante las técnicas CFD de una bomba monocelular modelo CDXM\A 70/05, de la marca EBARA, perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica (DIMec) de la Universidad del Bío-Bío, el cual represente las condiciones reales que presenta la bomba cuando esta entra en condiciones de cavitación.

En este contexto, para la realización de este proyecto, fue necesario el estudio de distintas alternativas de un banco de ensayos en el cual sea posible inducir la cavitación en la bomba, llegando a la determinación de un modelo en el que se utiliza la variación y aumento de las pérdidas de carga mediante la regulación de una válvula de bola. Con el banco de ensayos establecido fue posible medir las condiciones de presión de vacío, caudal de funcionamiento y estado de cavitación en distintas mediciones realizadas.

Para validar las condiciones de cavitación en la bomba se utilizaron las técnicas provenientes del análisis de vibraciones, donde se analizó principalmente el espectro de frecuencias producido por la transformada de Fourier, en donde principalmente se estudió las vibraciones de banda ancha de alta frecuencia (pasto vibratorio) de cada medición.

Por otro lado, en el ámbito de las simulaciones, se utilizó el programa ANSYS Fluent, para realizar dos tipos de esta, estudiando la caída de presión por efecto de la regulación de la válvula en el ensamblaje, y estudiando los efectos de la presión obtenida en el rodete cuando este se encuentra funcionando. Para esto se utilizó como dato el caudal obtenido en las mediciones reales.

Comparando los resultados obtenidos en las mediciones reales y en las simulaciones del ensamblaje se observó que presentan una mínima variación entre ambos resultados, siendo la mayor variación igual a un 14% y la mínima igual a un 1.7%.

Mediante un análisis de los resultados obtenidos en la simulación del rodete, fue posible verificar las condiciones de cavitación en cada escenario, los que sólo concuerdan con los resultados obtenidos, por el análisis de vibraciones, en las mediciones 1, 4 y 5.

Índice

Capítulo 1: Introducción:	1
1.1 Objetivos Generales:	1
1.2 Objetivos Específicos:	1
Capítulo 2: Marco Teórico.....	2
2.1 Cavitación:	2
2.1.1 Física de la cavitación:	2
2.1.2 Cavitación en las turbomáquinas:	6
2.1.3 Clasificación de la intensidad de la cavitación en bombas:.....	8
2.1.4 Clasificación de la intensidad de la cavitación en válvulas:.....	8
2.1.5 Como se calcula la cavitación:.....	9
2.2 Dinámica de fluidos computacionales (CFD).....	11
2.2.1 ¿Qué es CFD?:	11
2.2.2 Ecuaciones de CFD:	12
2.2.3 Discretización espacial:	13
2.2.4 Discretización temporal:.....	16
2.3 Bombas Centrífugas:	17
2.3.1 Descripción de las bombas centrífugas:	17
2.3.2 Funcionamiento:.....	17
2.3.3 Partes de las bombas centrífugas:	18
2.4 Vibraciones mecánicas:	19
2.4.1 Medición de las vibraciones mecánicas:	19
2.4.2 Vibración mecánica:.....	19
2.4.3 Cinemática vibratoria:	19
2.4.4 Vibración total:	20
2.4.5 Análisis de frecuencia:	20
2.4.6 Mediciones de una onda sinodal:	21
2.4.7 Amortiguamiento:	21
2.4.8 Vibración forzada:.....	22
2.5 Medición de las vibraciones:	22
2.5.1 Proceso de medición de las vibraciones:	22
2.5.2 Etapa transductora:.....	22
2.5.3 Acondicionamiento de la señal:	23
2.6 Análisis a desarrollar:	25
2.6.1 Análisis experimental:	25
2.6.2 Análisis simulado:.....	26

Capítulo 3: Diseño del banco de ensayos:	26
3.1.1 Bomba centrífuga a utilizar:	27
3.2 Propuestas de diseño del banco de ensayos:	28
3.3 Banco de ensayos definitivo	35
3.4 Equipos e instrumentos utilizados:.....	38
3.4.1 Tacómetro	39
3.4.2 Acelerómetro.....	39
3.4.3 Tarjeta de adquisición de datos.....	40
3.4.4 CompactDAQ	41
3.4.5 Ordenador	41
3.5 Conexiones e instalación de los equipos	42
Capítulo 4: Procedimiento y resultados:	43
4.1 Desarrollo experimental.....	43
4.2 Desarrollo simulaciones:	54
Capítulo 5: Conclusiones:	73
Bibliografía y Linkografía:	75

Índice de figuras.

Figura 2-1 Sistema explicativo.....	3
Figura 2-2 Configuración ejemplificadora de estanques.	4
Figura 2-3 Cambio de energía de un flujo al pasar por un estrechamiento.	5
Figura 2-4 Microchorro de una burbuja colapsando.	6
Figura 2-5 Disminución de la cabeza de la bomba en cavitación.	7
Figura 2-6 Cavitación en el rodete de una bomba.....	8
Figura 2-7 Esquema estanque bomba.	9
Figura 2-8 Algoritmo CFD	11
Figura 2-9 Tipos de mallado	14
Figura 2-10 Esquema del mallado por el método de las diferencias finitas.	15
Figura 2-11 Esquema del mallado mediante volúmenes finitos.	16
Figura 2-12 Discretización del tiempo.	17
Figura 2-13 Trayectoria de una partícula líquida en el interior de una bomba rotodinámica.....	18
Figura 2-14 Sistema masa-resorte.	19
Figura 2-15 Análisis de frecuencia de una vibración global.....	20
Figura 2-16 Magnitudes de una onda	21
Figura 2-17 Acelerómetro.....	23
Figura 2-18 Esquema de resolución de ANSYS Fluent.	26
Figura 3-1 Tabla de características, Fuente Ebara	27
Figura 3-2 Placa de la bomba.....	27
Figura 3-3 Curvas de funcionamiento Bomba CDXM/A 70/05	28
Figura 3-4 Esquema diseño (1)	29
Figura 3-5 Diagrama de Moody.....	31
Figura 3-6 Configuración válvula manómetros.	35
Figura 3-7 Ensamblaje de fittings en la entrada de la bomba	36
Figura 3-8 Manómetro A	36
Figura 3-9 Manómetro B	37
Figura 3-10 Reservorio y estanque de agua.....	37
Figura 3-11 Banco de ensayos.	38
Figura 3-12 Esquema del banco de prueba.....	38
Figura 3-13 Tacómetro de contacto.....	39
Figura 3-14 Acelerómetro AC102-1A.....	40
Figura 3-15 Tarjeta de adquisición de datos NI 9234.	40
Figura 3-16 Compact DAQ cDAQ- 9188.....	41
Figura 3-17 Ordenador Lenovo.....	42
Figura 3-18 Conexiones entre equipos.	42
Figura 3-19 Montaje del acelerómetro.	43
Figura 4-1 Vista seccional de la bomba centrífuga.	44
Figura 4-2 Ejemplo de datos recopilados.	45
Figura 4-3 Script creado en Matlab.	46
Figura 4-4 Vibraciones medición 1.	46
Figura 4-5 Espectro de frecuencia medición 1.....	47
Figura 4-6 Vibraciones medición 2.	48
Figura 4-7 Espectro de frecuencias medición 2.	48
Figura 4-8 Vibraciones medición 3	49
Figura 4-9 Espectro de frecuencia medición 3.....	50

Figura 4-10 Vibraciones medición 4	51
Figura 4-11 Espectro de frecuencia medición 4.....	51
Figura 4-12 Vibraciones medición 5.	52
Figura 4-13 Espectro de frecuencia medición 5.....	53
Figura 4-14 Esquema explicativo de las simulaciones.....	54
Figura 4-15 Modelo CAD.....	55
Figura 4-16 Volumen interior del ensamblaje	56
Figura 4-17 Caras malladas por un método en particular.....	56
Figura 4-18 Mallado ensamblaje.....	57
Figura 4-19 Selección de las propiedades turbulentas.....	58
Figura 4-20 Selección del material fluido.....	58
Figura 4-21 Condiciones iniciales de la entrada.	59
Figura 4-22 Selección del método.....	60
Figura 4-23 Tipos de inicialización.....	60
Figura 4-24 Ventana de inicio de cálculos.....	61
Figura 4-25 Simulación ensamblaje medición 3.....	61
Figura 4-26 Gráfico de valores residuales	62
Figura 4-27 Formato CAD bomba.	63
Figura 4-28 Rodete bomba Ebara.....	64
Figura 4-29 Dominio del rodete.....	65
Figura 4-30 Mallado del dominio.....	65
Figura 4-31 Parámetros de rotación.	65
Figura 4-32 Parámetros de simulación.	66
Figura 4-33 Rodete simulación 3	67
Figura 4-34 Valore residuales simulación 3.	67
Figura 4-35 Rodete simulación 1	68
Figura 4-36 Valores residuales simulación1.....	69
Figura 4-37 Rodete simulación 2	69
Figura 4-38 Valores residuales simulación 2.....	70
Figura 4-39 Rodete simulación 4.	70
Figura 4-40 Valores residuales simulación 4.....	71
Figura 4-41 Rodete simulación 5	71
Figura 4-42 Valores residuales simulación 5.....	71

Capítulo 1: Introducción:

En el ámbito industrial se utilizan ampliamente equipos de bombeo para distintos procesos productivos en los cuales se precisan fluidos a alta presión.

En este ámbito, es preponderante el estudio de los fenómenos producidos a consecuencia del transporte de fluidos y a la vez, tiene una gran importancia los métodos con los que se estudian y predicen estos fenómenos.

Debido a esto; y en el contexto de la impartición del ramo electivo “Dinámicas de fluidos computacionales” en la Universidad del Bío-Bío, surge la temática de utilizar estas técnicas para estudiar el fenómeno de cavitación, y a la vez utilizarlas como un método predictivo de esta.

A la vez, con el desarrollo de esta habilitación profesional se pretende impulsar la investigación y utilización de técnicas tanto como CFD y el análisis de vibraciones en la Universidad del Bío-Bío, institución que posee una gran infraestructura y equipamiento en el ámbito de las áreas de los termofluidos y el análisis de vibraciones.

1.1 Objetivos Generales:

- Analizar la cavitación de una bomba centrífuga monocelular través de un Modelo CFD y comparar con datos experimentales.

1.2 Objetivos Específicos:

- Generar condiciones de cavitación para una bomba centrífuga monocelular ubicada en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Bío-Bío.
- Validar las condiciones de cavitación con análisis de vibraciones.
- Realizar un modelo CFD de la Bomba centrífuga y respectivo fluido.
- Realizar validación del modelo CFD a través de datos experimentales.
- Analizar las variables del fenómeno de cavitación en el modelo CFD.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Cavitación:

Definición del fenómeno:

La palabra cavitación proviene del latín “cavus” que se traduce como cavidad o hueco. Técnicamente se puede definir como la rápida formación de cavidades, las cuales, al pasar por una zona local de baja presión de un flujo líquido, colapsan e implotan.

Para los autores que se dedican al estudio de este fenómeno, la cavitación se puede definir como la formación de burbujas de vapor de un fluido a causa del descenso local de la presión por debajo de la presión de saturación de este a la temperatura del líquido, ocasionando una condensación brusca, la cual produce golpes hidráulicos.

El gas que genera las cavidades puede ser aire, vapor del propio líquido u otro gas disuelto en el líquido condensado.

2.1.1 Física de la cavitación:

Para entender el fenómeno de la cavitación es necesario conocer dos conceptos físicos claves, los cuales son El principio de Bernoulli y la primera ley de la termodinámica. El cual describe el comportamiento de un fluido a lo largo de un conducto cerrado.

Esto se puede apreciar en la Ecuación (2-1), la cual describe el comportamiento de un fluido que avanza por un sistema, como el mostrado en la Figura 2-1:

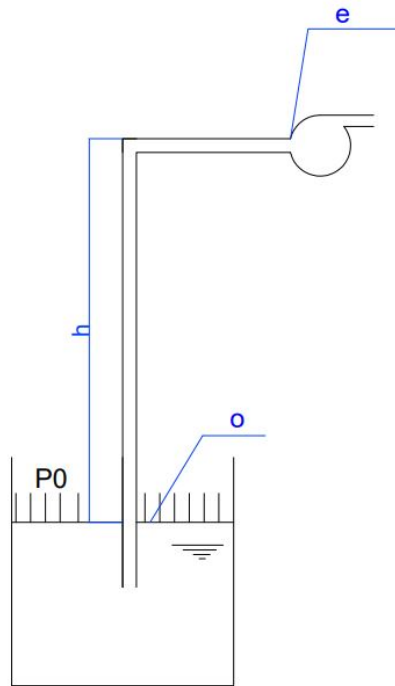


Figura 2-1 Sistema explicativo.

$$\frac{v_0^2}{2g} + \frac{P_0}{\gamma} + z_0 = \frac{v_e^2}{2g} + \frac{P_e}{\gamma} + z_e + \Delta_{oe} \quad \text{Ecuación (2-1)}$$

Donde:

v_0 : Velocidad en el punto o

v_e : velocidad en el punto e

P_0 : Presión en el punto o

P_e : Presión en el punto e

g : Aceleración de gravedad

z_e : Altura geométrica en el punto e

γ : Peso específico del fluido

Δ_{oe} : Perdidas de carga entre el punto o y e

z_0 : Altura geométrica en el punto o

En esta ecuación (Ecuación (2-1)) cada componente representa un distinto tipo de energía del fluido, siendo estas:

$$\frac{v^2}{2g} = \text{Energía cinética}$$

$$\frac{P}{\gamma} = \text{Energía de presión}$$

$$z = \text{Energía potencial}$$

$$\Delta_{oe} = \text{Energías disipativas}$$

El teorema de Bernoulli propone que la suma de todas estas energías tiene un resultado que debe permanecer constante, esto mediante la variación de cada componente de la ecuación a lo largo del recorrido del fluido durante el conducto.

Para explicar cómo se produce el fenómeno de la cavitación, debido a caídas de presión, se utilizará como ejemplo un contenedor de agua que se encuentra abierto a la atmósfera y a una altura elevada. Este depósito se encuentra conectado a por una tubería, por el cual el fluido escurrirá, y a cierta distancia el fluido pasará por un estrechamiento, el cual puede ser una válvula, como se aprecia en la Figura 2-2

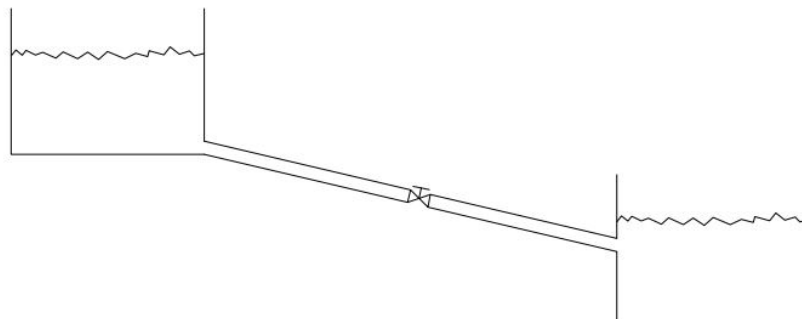


Figura 2-2 Configuración ejemplificadora de estanques.

Inicialmente, antes de que el agua comience a fluir por la cañería, la energía almacenada por el fluido corresponde en su totalidad a energía potencial.

Al ir descendiendo por el conducto, la energía del fluido pasa de potencial a cinética y energías de presión, y a una componente que disipa energía, la cual corresponde a las pérdidas debido a fricción del fluido con el conducto.

Al pasar por el estrechamiento, ocurre un cambio brusco en el fluido, este pierde energía de presión y aumenta repentinamente su energía cinética y a la vez las pérdidas hidráulicas que sufre el líquido.

Esto último se puede apreciar gráficamente a continuación en la Figura 2-3

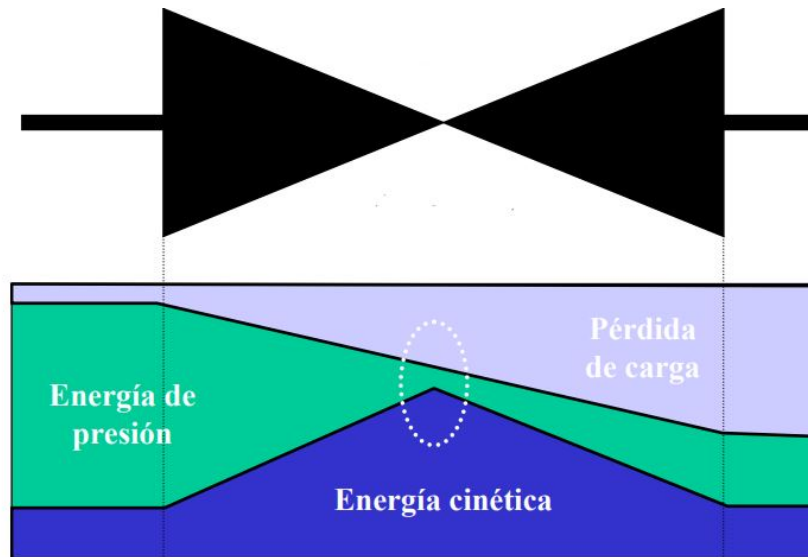


Figura 2-3 Cambio de energía de un flujo al pasar por un estrechamiento.

En el sector demarcado, ocurre un descenso local de presión, y un aumento brusco de la velocidad del fluido. Si este descenso provoca que la presión del fluido esté por debajo de la presión de saturación, a la temperatura del fluido, el agua puede evaporarse y formar burbujas de vapor.

El agua al superar el estrechamiento, sufre un aumento de presión, lo que genera que las burbujas de vapor se deformen, producto de la presión. Con cada leve, pero constante aumento, las burbujas de vapor entran en una “ambigüedad” gaseoso-líquida, lo que provoca que el agua que las rodea se acelere hacia el interior de la por la burbuja de vapor.

Esta aceleración provoca, en la burbuja, una hendidura que origina un microchorro, el cual puede alcanzar velocidades sobre los $1000 \frac{m}{s}$, el cual golpea las paredes del cuerpo que lo contiene, erosionando el contenedor del fluido. Esto se puede observar en la Figura 2-4.

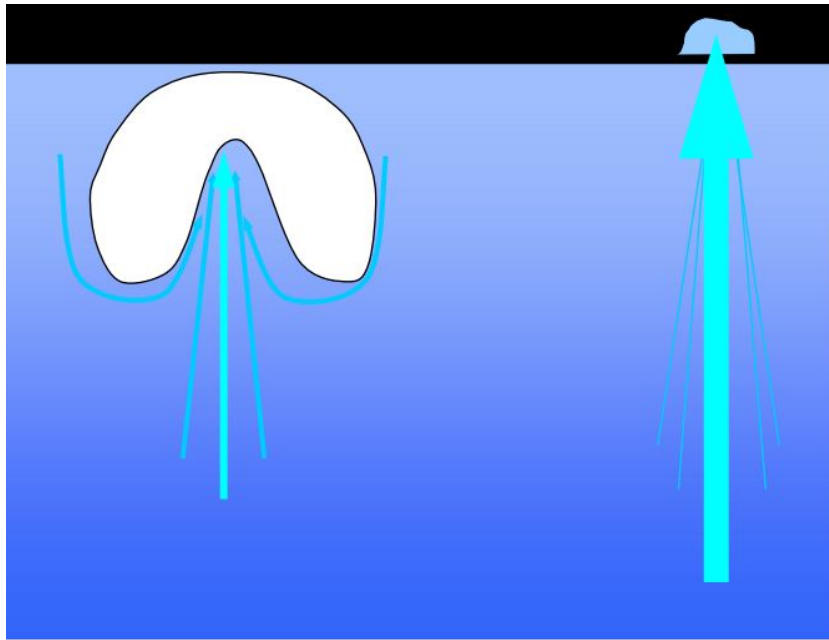


Figura 2-4 Microchorro de una burbuja colapsando.

2.1.2 Cavitación en las turbomáquinas:

Una vez ya entendido el fenómeno de la cavitación, hay que conocer los efectos que esta tiene en las turbomáquinas. Al igual que en el ejemplo anterior, de un fluido que fluye por una tubería, las consecuencias de la existencia de la cavitación en las turbomáquinas, son similares.

La cavitación en las turbomáquinas ha sido ampliamente estudiada por distintos autores, esto ya que las indicaciones de la existencia de cavitación, en máquinas hidráulicas rotoras, son muy claros, y a la vez las consecuencias que ocasiona la cavitación puede significar un alto desembolso de dinero para remediarlo.

En las bombas la cavitación puede presentarse de varias formas, algunas de estas son:

- a) Ruidos y vibraciones: Este es uno de los efectos más obvios de la cavitación, el colapso de las burbujas en la bomba generará ruidos generalmente perceptibles similares a un golpeteo de un martillo en la bomba y vibraciones que en algunos casos puede producir fallas en los sellos, rodamientos y otras zonas de la bomba que se fatigan. Este es el modo de falla más probable de una bomba que cavita. Mientras más grande sea la bomba mayor será el ruido y sus vibraciones.

- b) Reducción de la cabeza de la bomba: Otro de los mayores efectos de la cavitación es la caída en la cabeza de la bomba, generalmente esto se debe que a como los vapores son compresibles la energía de la bomba se gasta en aumentar la velocidad del líquido que llenó las cavidades de las burbujas colapsadas, por lo tanto, se produce una drástica caída del desempeño de la bomba.

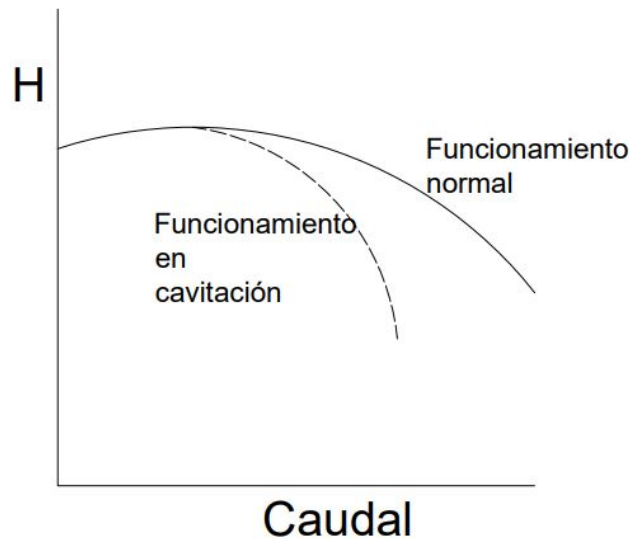


Figura 2-5 Disminución de la cabeza de la bomba en cavitación.

- c) Fluctuaciones en el caudal de la bomba: Como el volumen de una burbuja es mucho mayor que la del líquido, esta va a ocupar más espacio mientras exista, lo que va a producir fluctuaciones en el flujo y a la salida de la bomba saldrán chorros intermitentes.
- d) Erosión: Una de las evidencias visuales más claras de la existencia de cavitación en una bomba es la erosión que se produce en los materiales, esto debido a que la implosión de las burbujas y el aumento de la velocidad en el líquido que rellena esos huecos produce un choque muy fuerte de éste con el material de la bomba creando orificios, que dan la impresión de que la superficie fue golpeada con un martillo. Las zonas donde más ocurre erosión por cavitación son las caras posteriores de los álabes del impulsor o rodete debido a que es la zona donde se forma mayoritariamente las burbujas. Esto producido por el descenso local de presión que existe en estos lugares. El daño puede ser tan grande que puede dejar los álabes prácticamente inútiles.



Figura 2-6 Cavitación en el rodete de una bomba

Estas mismas consecuencias ocurren en las turbinas.

2.1.3 Clasificación de la intensidad de la cavitación en bombas:

En las bombas se pueden observar dos tipos de cavitación, las cuales son discriminadas, principalmente, por el lugar en el que esta se forma y ocurre. Estas son:

- a) Cavitación en la succión: Ocurre cuando la succión de la bomba se encuentra en condiciones de baja presión o alto vacío, lo que hace que el líquido se transforme en vapor a la entrada de la bomba. Este vapor es transportado hasta la zona de descarga donde el vacío desaparece y el vapor del líquido es nuevamente comprimido, debido a la presión de descarga, allí se produce una violenta implosión sobre la superficie del rodete.
- b) Cavitación en la descarga: La elevada presión de descarga provoca que la mayor parte del fluido circule por dentro de la bomba en vez de salir por la zona de descarga, a este fenómeno se le conoce como “slippage”.

A medida que el líquido fluye alrededor del rodete debe pasar a una velocidad muy elevada. Esta velocidad provoca el vacío, lo que provoca que el líquido se transforme en vapor.

2.1.4 Clasificación de la intensidad de la cavitación en válvulas:

Al igual que en las bombas, la cavitación también puede producirse en válvulas. Esto ocurre cuando la válvula se encuentra parcialmente cerrada, la velocidad local del flujo a su paso por el cierre puede alcanzar valores muy elevados. De este modo la presión puede alcanzar los valores de la presión de saturación del fluido.

La intensidad de la cavitación, en válvulas, puede clasificarse en 4 grupos. Estos son:

- a) Cavitación incipiente: Se define como la condición del flujo en la que la cavitación comienza a ser detectable.
- b) Cavitación constante o crítica: Este límite se define como la situación del flujo en la que aparece cavitación continua en un grado moderado.
- c) Cavitación con daños incipientes: Se caracteriza por el comienzo de la erosión en los contornos de la válvula.
- d) Cavitación con bloqueo: En este nivel extremo, se bloquea el caudal circulante debido a la obstaculización ocasionada por las burbujas. Este fenómeno es conocido como “choked cavitation”

2.1.5 Como se calcula la cavitación:

Para determinar qué tan cerca un circuito hidráulico de bombeo está de la cavitación, es necesario determinar la energía que influye en este. Esto se efectúa mediante un parámetro llamado NPSH, acrónimo en inglés proveniente de Net Positive Suction Head, también es conocido como ANPA (Altura Neta Positiva en la Aspiración) y CNPA (Carga Neta Positiva en Aspiración).

Este parámetro de diseño, mide dos elementos claves de una instalación de bombeo. Para esto se conoce el NPSH disponible ($NPSH_d$) y el NPSH requerido ($NPSH_r$).

El $NPSH_d$ corresponde a la a la energía que el sistema entrega a la bomba, esta depende primordialmente de la geometría de la instalación y a la vez está en función de la temperatura del fluido.

Para ejemplificar su cálculo de utilizará el siguiente esquema:

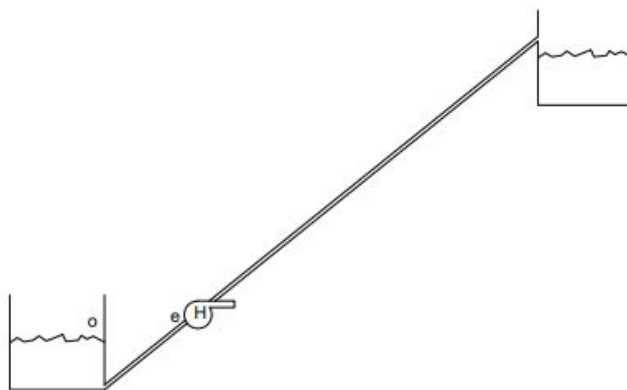


Figura 2-7 Esquema estanque bomba.

Como se puede apreciar, se distinguen 2 zonas, a las cuales se les han designado las letras “o” y “e”. El punto “o” corresponde a la toma de agua, en donde el fluido se encuentra a presión atmosférica, temperatura ambiente y velocidad inicial cero.

Por otro lado, en el punto “e” corresponde a la entrada de la bomba, en donde el fluido avanza con una velocidad considerable, y la presión corresponde a la presión de saturación a la temperatura del agua, en este punto.

Por lo que el teorema de Bernoulli entre los puntos “o” y “e” quedará de la siguiente forma:

$$\frac{v_0^2}{2g} + \frac{P_0}{\gamma} + z_0 = \frac{v_e^2}{2g} + \frac{P_e}{\gamma} + z_e + \Delta_{oe} + NPSH_D \quad \text{Ecuación (2-2)}$$

Debido a las consideraciones expuestas anteriormente, la expresión que permitirá encontrar el NPSH disponible corresponderá a continuación en la Ecuación (2-3).

$$NPSH_D = \frac{P_0 - P_e}{\gamma} - z_e - \frac{v_e^2}{2g} - \Delta_{oe} \quad \text{Ecuación (2-3)}$$

Por otro lado el $NPSH_R$ corresponde a la altura requerida por la bomba para evitar la cavitación. Este parámetro se rige por la consideración de las presiones estáticas y cinéticas con las que la bomba puede funcionar sin cavitación.

Como corresponde a un factor netamente de diseño de la bomba, este parámetro es entregado por los fabricantes, debido a que su cálculo suele ser tomado de forma experimental, al igual que las curvas de operación.

$$NPSH_R = z_E + \frac{v_e^2}{2g}$$

De este modo, si se cumple que la altura positiva neta de succión disponible es menor a la requerida, existirá cavitación en la bomba. De este modo

$$NPSH_R > NPSH_D \rightarrow \text{La bomba cavitará}$$

De forma contraria, si el NPSH requerido es menor al NPSH disponible, la bomba podrá trabajar sin riesgos de cavitación, por lo que:

$$NPSH_D > NPSH_R \rightarrow \text{La bomba no cavitará}$$

2.2 Dinámica de fluidos computacionales (CFD)

2.2.1 ¿Qué es CFD?:

CFD, acrónimo proveniente del inglés Computational Fluid Dynamics, corresponde al conjunto de técnicas utilizadas para la simulación del comportamiento de los fluidos.

Este método nace de la combinación de dos disciplinas, las cuales son la mecánica de fluido y el cálculo numérico, ya que las ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos vienen del estudio y desarrollo de la mecánica de fluidos, mientras que los métodos por los cuales son resueltos provienen del cálculo numérico.

Para la resolución de problemas, la dinámica de fluidos computacional utiliza un algoritmo que se compone de 5 pasos, como se puede apreciar en la Figura 2-8 y serán expuestos en los apartados siguientes.

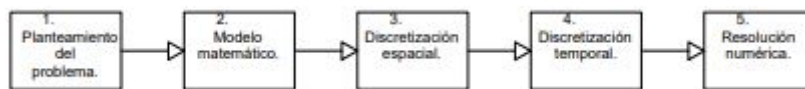


Figura 2-8 Algoritmo CFD

Las aplicaciones comerciales e industriales que tiene esta técnica es muy variada y amplia, dentro de los sectores donde es utilizada se encuentran:

- Industria aeroespacial: utilizada para el estudio y desarrollo de elementos aerodinámicos
- Desarrollo de electrodomésticos: Utilizado, principalmente, para el estudio de los flujos de calor en los electrodomésticos
- Industria automotriz: Desarrollo de componentes y estudio de la aerodinámica de los automóviles.
- Análisis de estructuras civiles: Estudio del efecto de las corrientes de viento en las estructuras civiles como edificios.
- Industria Biomédica: Estudio del comportamiento del desarrollo de distintos materiales al ser expuestos a las condiciones del cuerpo humano.
- Industria Hidráulica: Utilizada tanto, así como para el estudio de plantas de generación eléctrica y el desarrollo de componentes utilizados por la hidráulica.
- Industria Marítima: Principalmente se utiliza para el desarrollo y diseño de hélices de impulsión de los barcos y submarinos.
- Generación de energía: Utilizada para el desarrollo, diseño y estudio de las distintas formas utilizadas para generar energía, como por ejemplo los álabes de un aerogenerador.

- Deporte de alto rendimiento: En esta área, principalmente se utiliza para estudiar la aerodinámica que afecta a los deportistas de alto rendimiento.

2.2.2 Ecuaciones de CFD:

Como se expuso anteriormente, la técnica CFD estudia el comportamiento de los fluidos. Para esto utiliza ecuaciones de la mecánica de fluidos.

De las principales ecuaciones de la mecánica de fluidos que estudia CFD, están las ecuaciones de Navier Stokes, la cual recibe su nombre de los matemáticos Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones no lineales en derivadas parciales, las cuales describen el comportamiento de los fluidos newtonianos.

Al ser un conjunto en derivadas parciales no lineales, es muy difícil encontrar una solución analítica, por lo que es necesario recurrir a los métodos numéricos para obtener una solución aproximada.

Estas ecuaciones parten de la suposición de que el fluido posee variables a estudiar, tales como, presión, velocidad, densidad y temperatura, diferenciables.

Navier y Stokes en sus ecuaciones utilizan los principios básicos de conservación de la masa y conservación de movimiento.

De la forma integral, las ecuaciones se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \, d\Omega = 0 \quad \text{Ecuación (2-4)}$$

Donde el termino Ω es un parámetro que está en función del tiempo, y se define como un volumen de control que cambia en el tiempo, el cual contiene la misma cantidad de partículas tanto en el inicio como en el final.

Para que se cumpla la ley de conservación de movimiento es necesario que ocurra que el cambio de movimiento del fluido sea igual a las fuerzas externas aplicadas a este. Es por esto que, para lograr entender la ecuación de conservación de movimiento, es necesario definir previamente las fuerzas que actúan en el fluido. Estas son:

- a) Fuerzas de volumen: Corresponden a las fuerzas que actúan de igual forma en todo el dominio del fluido. Tienen la característica de que tener una variación de magnitud muy pequeña y lenta. Algunos ejemplos más representativos de estas corresponden a la fuerza

de gravedad, fuerzas electromagnéticas y las fuerzas producidas por aceleraciones como la fuerza centrífuga y a la fuerza producida por el efecto Coriolis.

Matemáticamente se pueden representar de la siguiente forma:

$$\partial F = S \partial \Omega \quad \text{Ecuación (2-5)}$$

Donde:

∂F : Corresponde a un elemento de fuerza

S : Corresponde a la fuente de la fuerza que actúa en el volumen Ω

- b) Fuerzas de superficie: Corresponden a las fuerzas que son ejercidas en el fluido debido al contacto del fluido con otro cuerpo. Este tipo de fuerzas se caracteriza por decrecer rápidamente si el cuerpo que originó la fuerza se aleja. Un ejemplo característico de este tipo de fuerza, corresponde a la presión de contacto que es producida entre dos cuerpos al tocarse. Matemáticamente, en los fluidos, estas fuerzas se pueden representar de forma análoga a los esfuerzos de corte cuando actúan en sólidos, esto a través del tensor de esfuerzo, siendo así:

$$\partial F = \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} \partial S \quad \text{Ecuación (2-6)}$$

Dónde $\mathbf{T} \cdot \mathbf{n}$ corresponde al producto entre la matriz tensor \mathbf{T} y el vector columna \mathbf{n} . De acuerdo a la mecánica de sólidos se puede concluir que la matriz tensor es simétrica y cumple con las siguiente regla $T_{ij} = T_{ji}$.

Finalmente, la ecuación que domina la conservación de movimiento en los fluidos queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega = \int_S T_{ij} n_j dS + \int_{\Omega} S_i d\Omega \quad \text{Ecuación (2-7)}$$

2.2.3 Discretización espacial:

Para poder aplicar las ecuaciones descritas en el apartado 2.2.2, es necesario que el dominio este segregado espacialmente. De esta forma en el fluido se crean subdominios o dominios más pequeños conocidos como elementos, nodos o volúmenes de control. A este proceso de división del dominio del fluido se le conoce como mallado, el cual se puede clasificar en dos grandes grupos, los cuales son:

- a) Mallados estructurados: Corresponde a aquellos mallados en que cada punto de la malla se puede identificar, de forma inequívoca, por los índices i, j, k en coordenadas cartesianas. Para dominios en 2D, los elementos de la malla corresponden a cuadriláteros, mientras que

para los dominios en 3D las celdas de la malla corresponden a hexaedros. Dado a la forma de su estructura, se necesita mucho menos memoria para generar una malla estructurada, en comparación a una no estructurada, y acceder a cada celda resulta relativamente fácil, ya que sólo es necesario sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Un ejemplo de malla estructurada se encuentra en la Figura 2-9 en la ilustración de la izquierda.

- b) Mallados no estructurados: Son aquellos en que los nodos de la malla, y por lo tanto las celdas, no se pueden identificar directamente por los subíndices i, j, k , por lo tanto no tienen un orden lógico. En este caso las mallas en 2D corresponden a una mezcla entre triángulos y cuadriláteros. Por otro lado, en 3D las mallas se componen por tetraedros y hexaedros. La elaboración de una malla no estructurada consume mucha más memoria que la estructurada y acceder a cada celda es más complicado que la anterior.

En la figura Figura 2-9 es posible observar mallados no estructurados en los ejemplos del centro y la derecha.

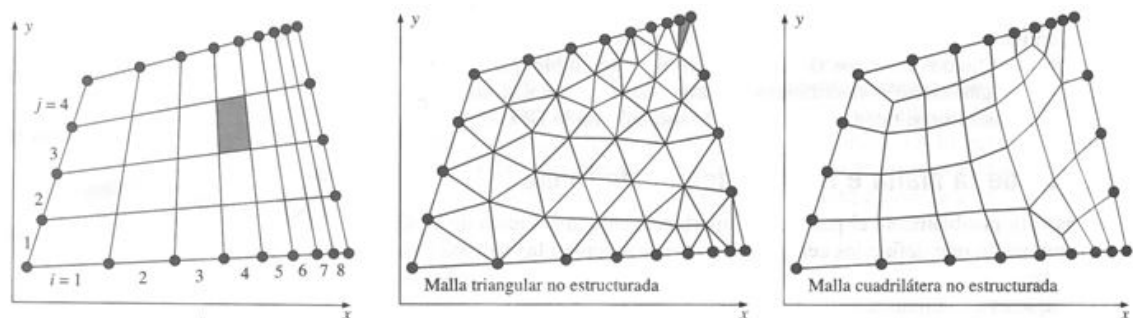


Figura 2-9 Tipos de mallado

A la vez, existen principalmente tres métodos de aplicar la discretización espacial, los cuales están asociados directamente a la forma en que se aborda matemáticamente el problema, estos son: forma diferencial, forma integral, o débil. Los métodos son:

- a) Diferencias finitas: en este método las ecuaciones se utilizan en su forma diferencial, por lo que el dominio es cubierto por puntos llamados nodos, en los cuales la ecuación es aproximada reemplazando las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales de la función. Cuando es aplicada en mallas estructuradas es un método muy sencillo, efectivo y es posible obtener esquemas de alto orden. Como desventaja está que en geometrías complejas es complicada su aplicación. A continuación, en la Figura 2-10 se esquematiza el mallado de un dominio (en azul) por el método de diferencias finitas.

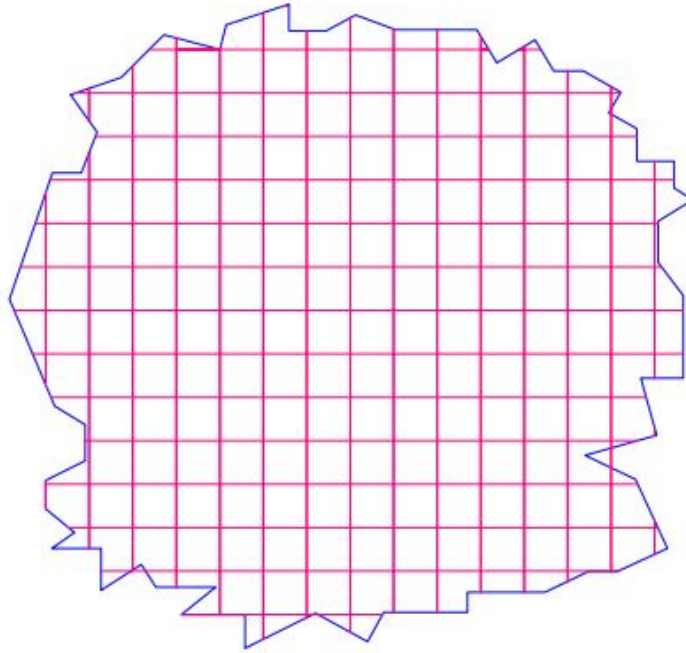


Figura 2-10 Esquema del mallado por el método de las diferencias finitas.

- b) Volúmenes finitos: en este método las ecuaciones se utilizan en su forma integral. En este procedimiento el dominio se divide en volúmenes de control, en el cual se aplican las ecuaciones integrales que se aproximan mediante cuadraturas. Los nodos se ubican en el centroide del volumen y se interpolan para obtener sus valores en las caras de dichos volúmenes. Como ventaja de este método está que es aplicable para mallas estructuradas como no estructuradas, y los términos aproximados tienen un sentido físico claro. Dado a su flexibilidad, el método de los volúmenes finitos es el más utilizado por los softwares de CFD, tales como ANSYS FLUENT. En la Figura 2-11 se esquematiza el funcionamiento del mallado mediante el método de los volúmenes finito. En ella se puede observar los nodos de forma rectangular con el centroide característico de este método.

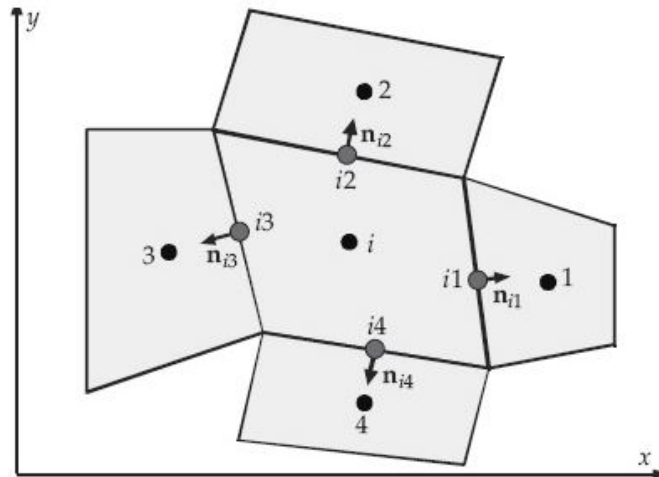


Figura 2-11 Esquema del mallado mediante volúmenes finitos.

- c) Elementos finitos: En este método las ecuaciones diferenciales son multiplicadas por unas funciones llamadas “funciones peso” y posteriormente integradas, lo que se conoce como formulación débil. En cierto método es similar a los volúmenes finitos, dado que el dominio se divide en elementos y en cada uno de ellos la solución es aproximada de forma lineal, utilizando los valores de los vértices de los elementos. Este método es apropiado para geometrías complejas y fáciles de analizar matemáticamente.

2.2.4 Discretización temporal:

Para analizar los fluidos es necesario discretizar la coordenada temporal. Esto tiene una mayor importancia en problemas en que se trata de un fluido no estacionario, ya que en estos casos las propiedades del fluido, como por ejemplo la velocidad del fluido, o la caída de temperatura de este, varía con el paso del tiempo.

La solución se obtiene en puntos discretos del tiempo, como se puede observar en Figura 2-12. Como se observa el tiempo entre dos instantes del dominio se designa como un paso de tiempo denominado Δt . Este paso de tiempo debe tener la propiedad de que sea capaz de captar los cambios de la solución, los cuales pueden ser muy rápidos al momento de que la iteración llegue a un valor aproximadamente aceptable como solución.

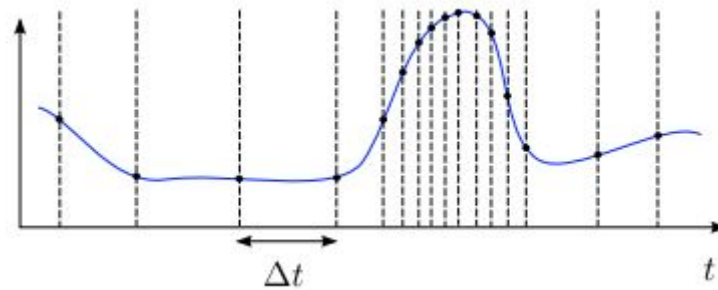


Figura 2-12 Discretización del tiempo.

2.3 Bombas Centrífugas:

2.3.1 Descripción de las bombas centrífugas:

Las Bombas Centrífugas, también llamadas bombas rotodinámicas, son actualmente las máquinas más utilizadas para bombear y efectuar el transporte de fluidos. Estas consisten en un conjunto de paletas que rotan dentro de una carcasa, las cuales aportan energía a los fluidos mediante la acción de la fuerza centrífuga que se origina debido a la rotación de las paletas. Debido a este efecto centrífugo, las bombas rotodinámicas logran convertir energía mecánica, en energía cinética y de presión. A partir de esto último, este tipo de bombas adoptan el nombre de “bombas centrífugas”.

2.3.2 Funcionamiento:

Las bombas centrífugas se caracterizan por tener una admisión paralela al eje del impulsor y dentro de esta, circula en un plano normal al eje del impulsor, para que posteriormente salga de ésta de forma radial. La componente rotativa de la bomba es la que se encarga de convertir la energía mecánica, que puede ser proporcionada por un motor eléctrico o térmico, en energía cinética, la cual aumenta gradualmente la velocidad del fluido y en consecuencia a esto último, se produce un incremento de presión en el líquido.

Si se toma como ejemplo una partícula del líquido que circula por la bomba y se estudia su trayectoria por dentro de ésta, se obtendría un recorrido como se muestra en la Figura 2-13. En esta se puede apreciar que la partícula presenta una trayectoria en forma de espiral, la que se inicia en el centro del rodete (correspondiente a la posición 1), debido a que la admisión a la bomba es de forma radial, para alejarse del eje de la bomba paulatinamente aumentando su radio de rotación, debido a la acción del efecto centrífugo para llegar a la posición 2 demarcada en la figura.

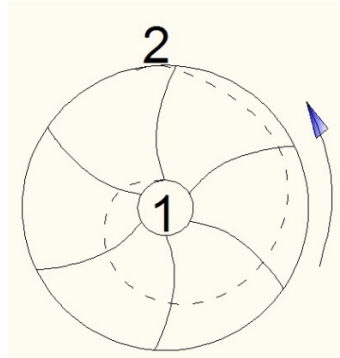


Figura 2-13 Trayectoria de una partícula líquida en el interior de una bomba rotodinámica.

2.3.3 Partes de las bombas centrífugas:

Las bombas centrífugas se componen principalmente de las siguientes partes:

- a) Carcasa: Corresponde a la parte que protege la bomba y que a la vez cumple con la función de convertir la energía cinética, efecto de la acción del rodete, en energía de presión, debido a los cambios graduales de secciones de área de la carcasa. Esto último tiene como consecuencia un descenso de la velocidad acorde al aumento del área.
- b) Rodete: También conocido como impulsor, corresponde al elemento rotatorio que se encarga de aumentar la velocidad al líquido que entra a la bomba.
- c) Anillos de desgaste: Corresponden a los elementos que tienen como función absorber el desgaste producido por el uso continuo de la bomba. La finalidad de estos elementos es que se desgasten y sean reemplazados, para así evitar el cambio de elementos más caros, como el impulsor y la carcasa.
- d) Empaques y sellos: Estos elementos evitan el paso del líquido a partes que no son aptas para funcionar bajo estas condiciones. A la vez tienen la función de evitar el paso del flujo de aire hacia el interior de la bomba.
- e) Eje: Corresponde al elemento que soporta todos los elementos rotatorios de la bomba, y que además transmite el movimiento impartido por el motor.
- f) Cojinete: Es el soporte del eje que permite la rotación de este, y que además soporta las cargas radiales y axiales que afectan a la bomba.
- g) Base: Es el elemento que sostiene todo el peso de la bomba.

2.4 Vibraciones mecánicas:

2.4.1 Medición de las vibraciones mecánicas:

La medición y análisis de las vibraciones mecánicas, es una técnica ampliamente utilizada en la industria. Con esta práctica se espera evaluar la condición actual en la que se encuentra la máquina y prevenir una posible falla que puede llegar al punto de ser catastrófica.

Como consecuencia del constante análisis y monitoreo de las mediciones mecánicas que produce una máquina, es posible aumentar el rendimiento y la producción que la máquina genera al año.

2.4.2 Vibración mecánica:

La vibración mecánica consiste en el movimiento de tipo oscilatorio que afecta a una máquina o estructura, producto a una excitación externa a ellas.

Dentro de estas se distingue la vibración armónica simple, también denominado movimiento armónico simple, abreviado comúnmente como M.A.S.

El MAS es la forma más simple de vibración, la cual se puede obtener haciendo vibrar un sistema masa resorte o haciendo oscilar un péndulo, como se observa en la Figura 2-14.

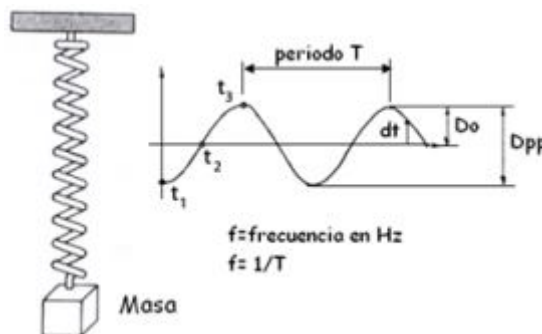


Figura 2-14 Sistema masa-resorte.

En su estado de reposo, o equilibrio, las fuerzas que actúan sobre la masa se anulan, debido a que ambas tienen la misma magnitud, pero si el cuerpo sufre una excitación como tomándolo y desplazándolo hacia abajo, el cuerpo comenzará a vibrar con un movimiento armónico.

Si el movimiento anterior se plasmara en un gráfico, como por ejemplo la posición de la masa que varía en el tiempo, se obtendrá una curva del tipo sinodal como es posible observar en la Figura 2-14.

2.4.3 Cinemática vibratoria:

En el ámbito de las vibraciones mecánicas, existen tres conceptos que son claves para poder otorgarle un sentido físico a las oscilaciones generadas, estas son:

- a) Desplazamiento vibratorio: Corresponde a la posición instantánea del punto de medición respecto a la posición de equilibrio del punto.
- b) Velocidad vibratoria: Corresponde a la rapidez con la que se mueve el punto de medición presenta un movimiento vibratorio.
- c) Aceleración vibratoria: Corresponde a la rapidez con la que cambia la velocidad vibratoria en el tiempo. De acuerdo a la segunda ley de Newton, esta aceleración nace bajo el efecto de una fuerza excitadora, que es la que se encarga de sacar al cuerpo vibratorio del reposo.

2.4.4 Vibración total:

Las maquinas presentan una amplia gama de vibraciones, rara vez ejercen una vibración armónica simple. Lo más común es que estas presenten vibraciones complejas producto de la combinación de vibraciones en distintos sentidos, como axial, horizontal o vertical.

Los sensores vibratorios captan todas las vibraciones que llegan a él, muchas veces estas vibraciones proceden de distintas fuentes de excitación, esta vibración se le denomina vibración global o total, y cada vibración que la forma toma el nombre de componente.

2.4.5 Análisis de frecuencia:

Al momento de estudiar una vibración que es medida experimentalmente, es necesario analizarlas utilizando como dominio la frecuencia de estas, ya que analizarlas en el dominio del tiempo se torna un proceso complejo y engorroso.

Para esto es necesario descomponer la vibración global, captada por el sensor vibratorio, en cada una de sus componentes que la forman por medio de la frecuencia en que vibran cada una de estas como se observa en la Figura 2-15. Este método recibe el nombre de análisis de frecuencia.

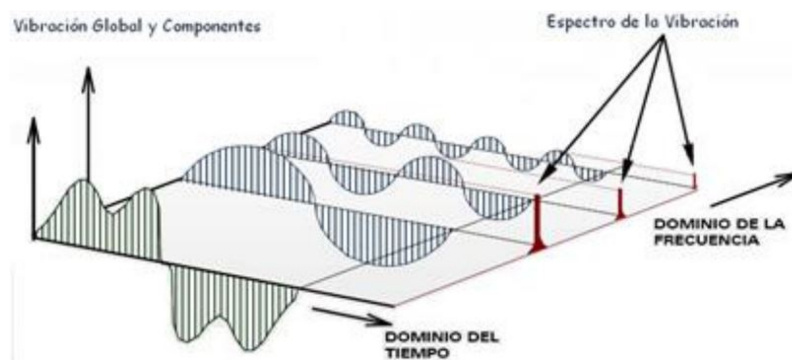


Figura 2-15 Análisis de frecuencia de una vibración global.

2.4.6 Mediciones de una onda sinodal:

En las vibraciones globales que presentan un comportamiento sinodal, existen principalmente tres magnitudes que se utilizan para interpretar las señales vibratorias, estas son:

- Amplitud pico (Pk): También se conoce cómo valor pico o peak, y corresponde a la distancia máxima desde el punto de equilibrio, o punto cero, hasta el punto donde la amplitud de la señal vibratoria alcanza su mayor valor posible. En la práctica, el peak se utiliza cuando se quiere interpretar vibraciones de naturaleza impulsiva, o cuando se requiere evaluar la sobrecarga que generan estas en descansos hidrodinámicos.
- Amplitud pico a pico (Pk-Pk): Corresponde a la distancia que existe entre dos crestas de la onda vibratoria, una cresta negativa y otra positiva. Para el caso de las ondas del tipo sinodal, este valor corresponde a dos veces la amplitud pico de esta. En la práctica se utiliza cuando se requiere medir desplazamientos relativos.
- Valor eficaz: También conocido como valor RMS (Root Mean Square), corresponde al valor promedio de la aceleración del movimiento oscilatorio. Este valor de la amplitud considera la historia de la onda y entrega una estimación de la energía que produce la vibración.

Estas magnitudes pueden observarse gráficamente en la Figura 2-16

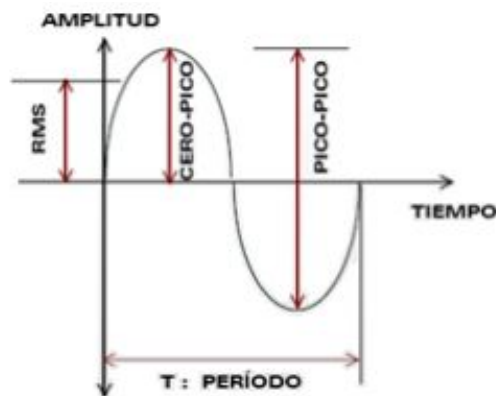


Figura 2-16 Magnitudes de una onda

2.4.7 Amortiguamiento:

Si es que en un sistema oscilatorio no existiesen fuerzas que disipen la energía, como se observa en la Figura 2-14, este oscilará libremente con una amplitud constante. En la realidad siempre hay fuerzas disipativas que tienen como efecto la disminución gradual de la amplitud vibratoria del sistema.

Este efecto disipativo adopta el nombre de amortiguamiento. En las maquinas existen varias fuentes que pueden actuar como disipadores de energía, como rozamientos, resistencias de movimiento e incluso puede ser una vibración que actúe en contrafase a la vibración que se quiere estudiar, de forma que la interacción de ambas vibraciones forme un sistema que llegue al reposo.

2.4.8 Vibración forzada:

A diferencia del caso anterior descrito en el apartado 2.4.2, existe un tipo de vibración que sólo es efectuado por la continua acción de una fuerza externa, lo que difiere del caso del MAS en la que la vibración se origina por una excitación momentánea y que desaparece luego de excitar el cuerpo.

La vibración anterior toma el nombre de vibración forzada y en la práctica puede ser originada por la acción de un motor desbalanceado que debe entregar energía al sistema para compensar la energía perdida por la amortiguación, de forma que se mantiene una amplitud de vibración estacionaria.

2.5 Medición de las vibraciones:

2.5.1 Proceso de medición de las vibraciones:

Al momento de medir una señal, proveniente de mediciones mecánicas, esta debe pasar por una serie de etapas o procesos para que esté disponible y pueda obtenerse su valor RMS o sea capaz de representarse en un gráfico.

Este proceso puede resumirse, principalmente, en las siguientes etapas:

- a) Etapa transductora.
- b) Etapa de acondicionamiento de la señal
- c) Etapa de procesamiento
- d) Etapa de registro

2.5.2 Etapa transductora:

En esta etapa, la señal es captada y medida por un dispositivo electrónico conocido como transductor, el cual tiene como función captar y medir una cantidad física, tales como temperatura, presión o vibraciones, entre otras, y las convierte en una señal eléctrica, mediante la regulación de voltaje.

Esta señal de eléctrica, producida por el transductor, y la magnitud física que este capta, se relacionan mediante el concepto denominado sensibilidad del transductor. Esta característica de los transductores es vital al momento de diferenciar un transductor de otro, teniendo en cuenta que ambos transductores miden la misma magnitud, debido a que, si se busca medir las vibraciones de una máquina de baja potencia, como por ejemplo un ventilador pequeño, se requiere un transductor

con mayor sensibilidad que el que se usaría si se quisiese medir las vibraciones mecánicas producidas por una trituradora o canchadora.

Es importante cerciorarse de que no existen errores al momento de seleccionar el transductor y montarlo, a la vez es de suma importancia que las conexiones eléctricas estén hechas de la forma correcta, esto debido a que ni con el mejor software o el mejor equipo de análisis de vibraciones se podrán obtener resultados correctos, debido a que no se pueden esperar resultados correctos, o aproximados a la realidad, si se parte con la premisa de una señal vibratoria mal medida, he aquí la importancia del transductor en la cadena del análisis de las vibraciones.

Existen cuatro tipos de transductores de vibraciones, estos son:

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

De estos cuatro tipos de transductores, el más utilizado corresponde al sensor de aceleración, estos sensores utilizan las propiedades piezoeléctricas de ciertos materiales cerámicos, como el cuarzo y turmalina, o de naturaleza ferroeléctrica, como el litio y la berlinita, los cuales, al ser deformados, o sometidos a cargas de compresión o tracción, adquieren una polarización en su masa, por lo que en su superficie aparece una diferencia de potencial y cargas eléctricas. Esto debido a que estos materiales poseen una distribución asimétrica de carga interna.

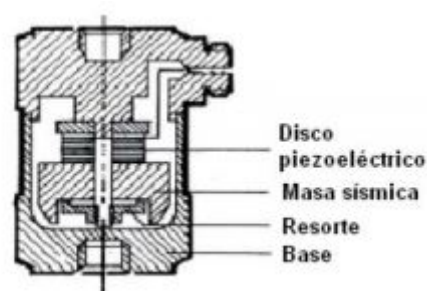


Figura 2-17 Acelerómetro

2.5.3 Acondicionamiento de la señal:

En esta etapa, la señal proveniente del transductor pasa por un acondicionador de señal, en donde la señal original, creada por el transductor, es convertida a otro formato fácil de leer y compatible con fines de adquisición de datos o de control de una máquina.

Dentro de las funciones que proporcionan los acondicionadores de señales, se encuentran las siguientes, principalmente:

- a) **Conversión de señal:** La función principal de un acondicionador de señal consiste en recoger una señal y transformarla en una señal eléctrica de nivel superior. La conversión de señal se suele utilizar en aplicaciones industriales que emplean un amplio espectro de sensores para efectuar mediciones. Debido a la variedad de sensores utilizados, puede ser preciso convertir las señales generadas, para que puedan ser utilizadas por los instrumentos conectados a los sensores. En principio, cualquier señal procedente de un sensor puede convertirse en cualquier señal de proceso estándar.
- b) **Linealización:** Determinados acondicionadores de señal pueden llevar a cabo una linealización, si las señales que proporciona un sensor no tienen una correspondencia del todo lineal con la magnitud física. Para ello, llevan a cabo un proceso de interpretación de la señal mediante software. Es habitual en el caso de las señales de termopares. Este método se emplea para obtener una mayor exactitud, porque no todos los sensores son totalmente lineales. Los parámetros para la linealización se evalúan durante la calibración del sensor y se indican en el protocolo de calibración del sensor.
- c) **Amplificación:** El paso siguiente es la amplificación de la señal y el proceso de incrementar la señal para procesamiento o digitalización. Hay dos maneras de amplificar una señal: incrementar la resolución de la señal de entrada o aumentar la relación señal-ruido. En el acondicionamiento de señales se emplean diferentes amplificadores para distintos fines; entre ellos cabe citar los amplificadores de instrumentación, que están optimizados para trabajar con señales de corriente continua, y que se caracterizan por una elevada impedancia de entrada, una alta supresión de la cadencia sincrónica (CMRR) y una elevada ganancia. Otro ejemplo de acondicionador de señal empleado en amplificación es el amplificador de aislamiento, que está diseñado para aislar altos niveles de corriente continua de un equipo, al tiempo que deja pasar una pequeña señal de corriente alterna o diferencial.
- d) **Filtrado:** Otra función importante de los acondicionadores de señal es el filtrado. Consiste en filtrar el espectro de frecuencia de la señal conservando solo los datos válidos y bloqueando todo el ruido. Los filtros pueden consistir en componentes pasivos y activos o en un algoritmo digital. Un filtro pasivo utiliza exclusivamente condensadores, resistencias e inductores con una ganancia máxima de uno. Un filtro activo utiliza componentes pasivos combinados con componentes activos, como amplificadores operacionales y transistores. Los acondicionadores de señal más avanzados emplean filtros digitales, porque son fáciles

de ajustar y no requieren equipos físicos. Un filtro digital es un filtro matemático que se emplea para manipular una señal; por ejemplo, para bloquear o dejar pasar un intervalo de frecuencia determinado. Utilizan componentes lógicos como circuitos integrados para aplicaciones específicas (ASIC) o matrices de puertas programables (FPGA), o un programa secuencial con un procesador de señales.

- e) Evaluación y funciones inteligentes: Para aportar beneficios adicionales al usuario y al proceso, los acondicionadores de señal modernos cuentan con funciones especiales de evaluación de señales y pre procesamiento de datos medidos. Así, ayudan a monitorizar y evaluar alarmas y avisos de forma rápida y directa, mediante una salida eléctrica conmutada. Otras funciones inteligentes adicionales, como los canales de cálculo internos, se encargan de realizar operaciones matemáticas, como sumar señales de sensores, u operaciones tecnológicas como, por ejemplo, actuar como un controlador PID. Estas funciones ayudan a que el sistema reaccione más rápido y reducen la carga de trabajo del control de la máquina.
- f) Interfaces: Los convertidores de señal deben transmitir las señales de los sensores hasta el control de la máquina, utilizando para ello interfaces y protocolos estándar. Las interfaces pueden ser analógicas o digitales. Las interfaces analógicas típicas son señales de tensión (± 10 V) o corriente (± 20 mA), que son fáciles de manipular pero que tienen el inconveniente de que cada señal requiere un cableado independiente. Las interfaces digitales modernas están diseñadas como interfaces de bus basadas en Ethernet (Profinet, Ethercat, Ethernet/IP) y permiten conectar varios componentes con un solo hilo. De este modo se simplifica el cableado y se puede transmitir información adicional; por ejemplo, información de diagnóstico de los componentes, que es muy importante para reducir los tiempos de parada y para acelerar el mantenimiento.

2.6 Análisis a desarrollar:

2.6.1 Análisis experimental:

Para poder obtener y cuantificar los parámetros vibratorios que experimenta una bomba centrífuga en estado de cavitación, que se desarrollará mediante un banco de ensayos, se realizará la medición de las vibraciones mecánicas, las cuales luego serán analizadas en el dominio de la frecuencia mediante el uso del espectro de frecuencias. Estas se harán cuando la bomba se encuentre en un estado normal y luego distintos escenarios donde esté presente el fenómeno de cavitación.

Además, en esta etapa es necesario obtener las condiciones iniciales que se utilizarán en el análisis simulado, siendo estas de suma importancia para llevar a cabo esta. Es por esto que en etapa es necesario realizar la medición de parámetros como RPM, caudal y presión principalmente.

2.6.2 Análisis simulado:

Para poder recrear los escenarios propuestos en el apartado 2.6.1, es necesario utilizar un software el cual utilice las técnicas CFD. Específicamente el software que se utilizará, para el desarrollo de estas simulaciones, corresponderá al programa ANSYS.

ANSYS es un software de ingeniería, en el cual es posible efectuar una amplia gama de simulaciones. Dentro de los escenarios en los cuales se puede utilizar ANSYS se encuentran problemas de índole: electromagnéticos, vibraciones, esfuerzos, electricidad, térmicos y fluidos.

El módulo que se utilizará para realizar las simulaciones, corresponde al módulo Fluent, el cual permite modelar los fluidos en la totalidad de las aplicaciones de las técnicas CFD, obteniendo resultados confiables y precisos.

Este módulo tiene un esquema de resolución de 5 sub-módulos, los cuales se pueden apreciar en la Figura 2-18 y que serán explicados a lo largo del desarrollo del procedimiento de la simulación.

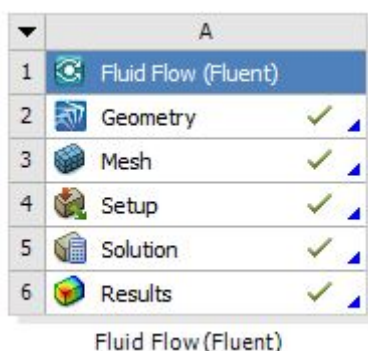


Figura 2-18 Esquema de resolución de ANSYS Fluent.

Capítulo 3: Diseño del banco de ensayos:

Para poder realizar las mediciones correspondientes se debe diseñar un banco de ensayos, en el cual sea posible desarrollar todas las condiciones necesarias para poder realizar los ensayos experimentales mencionados en el apartado 2.6.1, y así poder contrastarlos con los ensayos descritos en el punto 2.6.2.

Como punto de partida para el diseño del banco de ensayos, es necesario definir y describir las características del equipo primordial para estos ensayos, en este caso este equipo corresponde a la bomba centrífuga a utilizar.

3.1.1 Bomba centrífuga a utilizar:

La bomba que se utilizará corresponde a una electrobomba centrífuga monocelular, la cual se encuentra disponible en los laboratorios de termofluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Bío-Bío.

Dicha bomba corresponde al modelo CDXM/A 70/05, marca EBARA, la cual tiene las siguientes características:

Modelo		kW	CV	Condensador		Intensidad absorbida (A)			l/min m ³ /h	Q=Caudal									
Monofásica 230V 50Hz	Trifásica 230/400V 50Hz			μF	Vc	Monofásica	Trifásica 230V 400V			20	50	80	90	110	130	160	180	210	250
										H=Altura manométrica total (m)									
CD(X)M 70/05	CD(X)(L) 70/05	0,37	0,5	12,5	450	3,4	2,4	1,4	20,7	18,4	15,9	15	-	-	-	-	-	-	
CD(X)(L)M 70/07	CD(X)(L) 70/07	0,55	0,75	16	450	5,0	3,5	2,0	28	24,5	20,5	-	-	-	-	-	-		
CDM 70/12	CD 70/12	0,9	1,2	31,5	450	6,5	5,0	2,9	35	31,2	26,5	-	-	-	-	-	-		
CD(X)M 90/10	CD(X)(L) 90/10	0,75	1	20	450	5,6	3,3	1,9	30,3	27,2	23,6	22,3	19,5	-	-	-	-		
CD(X)M 120/07	CD(X)(L) 120/07	0,55	0,75	16	450	4,6	3,2	1,85	-	20,5	18,7	18,1	16,8	15,5	13,7	12,5	-		
CD(X)M 120/12	CD(X)(L) 120/12	0,9	1,2	31,5	450	6,9	4,5	2,6	-	29,5	27,1	26,1	24,3	22,4	19,5	-	-		
CD(X)M 120/20	CD(X)(L) 120/20	1,5	2	40	450	9,3	6,9	4,0	-	37,5	35,3	34,6	33,1	31,4	28,6	-	-		
CD(X)M 200/12	CD(X)(L) 200/12	0,9	1,2	31,5	450	6,3	4,3	2,5	-	-	20,6	20,2	19,5	18,5	17,1	16,1	14,6		
CD(X)M 200/20	CD(X)(L) 200/20	1,5	2	40	450	10,2	7,4	4,3	-	-	31	30,6	29,7	28,9	27,5	26,6	25,1		
-	CD(X)(L) 200/25	1,8	2,5	-	-	-	-	5,0	-	-	38	37,5	36,4	35,3	33,6	32,4	30,5		

Figura 3-1Tabla de características, Fuente Ebara



Figura 3-2 Placa de la bomba.

A la vez esta bomba cuenta con las siguientes curvas características, de las cuales para este proyecto toma mayor importancia la curva que describe la altura neta positiva en la aspiración, destacada en el recuadro rojo en la Figura 3-3, debido que a partir de esta se diseñará el banco de ensayos, dado a que este parámetro es fundamental al momento de determinar los parámetros de la cavitación.

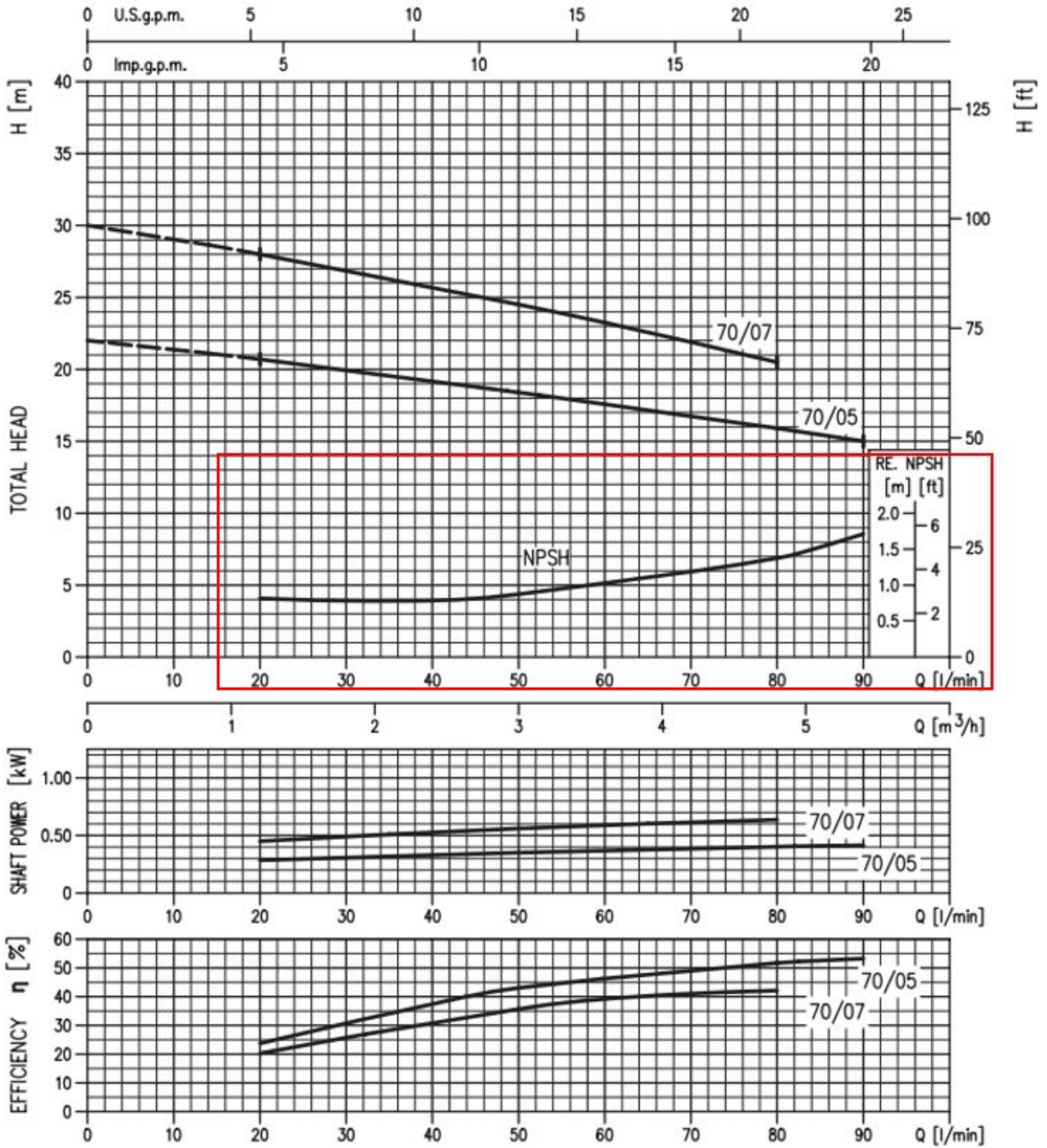


Figura 3-3 Curvas de funcionamiento Bomba CDXM/A 70/05

3.2 Propuestas de diseño del banco de ensayos:

Debido a la gran gama de posibilidades que existe para hacer que una bomba entre en cavitación, es necesario explorar varias alternativas para desarrollar, y analizar la más factible. Es por esto que en esta sección se expondrán tres alternativas para ello.

- 1) Elevar la altura de succión: Tomando como referencia la Figura 3-4, este método utiliza el aumento de las pérdidas de carga que existen entre los puntos o y e, que surgen debido al aumento de la cota denominada "h".

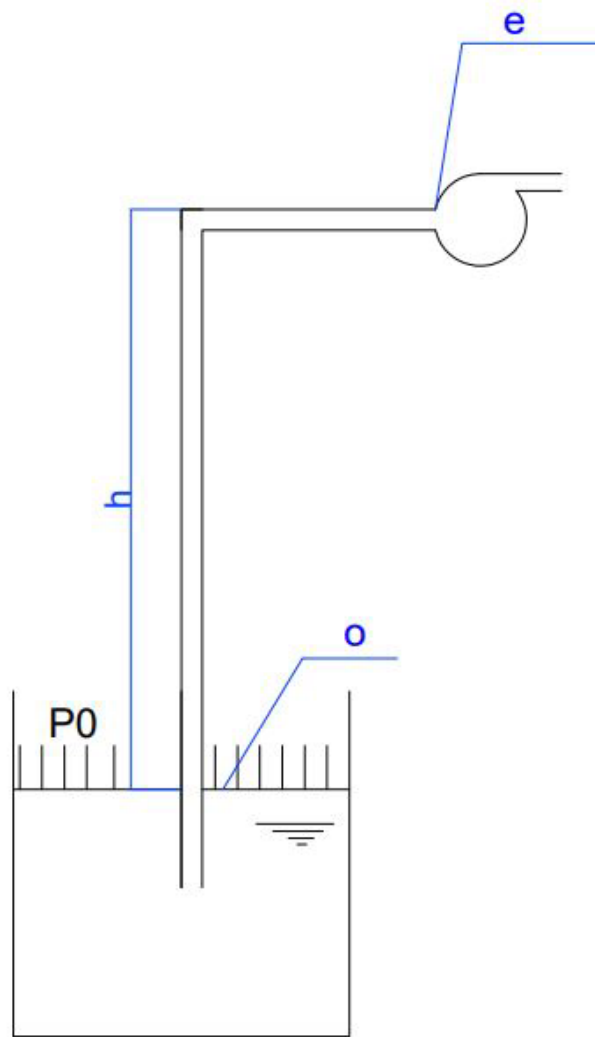


Figura 3-4 Esquema diseño (1)

Tomando como referencia la altura inicial en el punto o como 0, es posible determinar la cota de altura que debe tener el punto e para que la bomba entre en cavitación.

Para determinar la longitud que debe tener la cota “h”, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Diámetro de entrada de la bomba	$1\frac{1}{4}$ pulg
Caudal	$20 \frac{l}{min}$
Temperatura ambiente del laboratorio	$19\text{ }^{\circ}\text{C}$
Viscosidad cinemática del agua a $19\text{ }^{\circ}\text{C}$	$1,007 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$
Peso específico del agua a $19\text{ }^{\circ}\text{C}$	$9795 \frac{N}{m^3}$

Rugosidad del PVC y PE	0,0015 mm
$P_{sat_{19^{\circ}C}}$	2198,18 Pa
Presión atmosférica	101325 Pa

Para el caudal de $20 \frac{l}{min}$, y teniendo en cuenta el diámetro de entrada de la bomba, se tiene que la velocidad del agua corresponde a $0,421 \frac{m}{s}$.

Utilizando el número de Reynolds, mediante la Ecuación (3-1) es posible determinar el tipo del flujo con el que ingresa el fluido, dándose así un total de 13274.423, por lo que se trata de un flujo totalmente turbulento

$$Re = \frac{v \times \phi}{\nu} \tag{Ecuación (3-1)}$$

$$Re = \frac{0,421 \frac{m}{s} \times 0,03175 m}{1,007 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 13274$$

Donde:

v : velocidad del fluido en $\frac{m}{s}$

ϕ : diametro de la sección transversal al flujo en m

ν : viscosidad cinemática del fluido en $\frac{m^2}{s}$

De esta forma, utilizando la Ecuación (3-3) de factor de fricción en tuberías lisas, proveniente del diagrama de Moody, destacado en la Figura 3-5, es posible determinar el factor de fricción al que está expuesto el agua, siendo así:

$$\frac{e}{D} = \frac{0,0015 (mm)}{31,75 (mm)} = 4,724 \times 10^{-5} \tag{Ecuación (3-2)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,86 \ln(Re\sqrt{f}) - 0,8 \tag{Ecuación (3-3)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,86 \ln(13274\sqrt{f}) - 0,8 = 0,029$$

Donde:

f : Factor de fricción.

D : Diámetro de la sección transversal en mm.

ϵ : Rugosidad del material en mm.

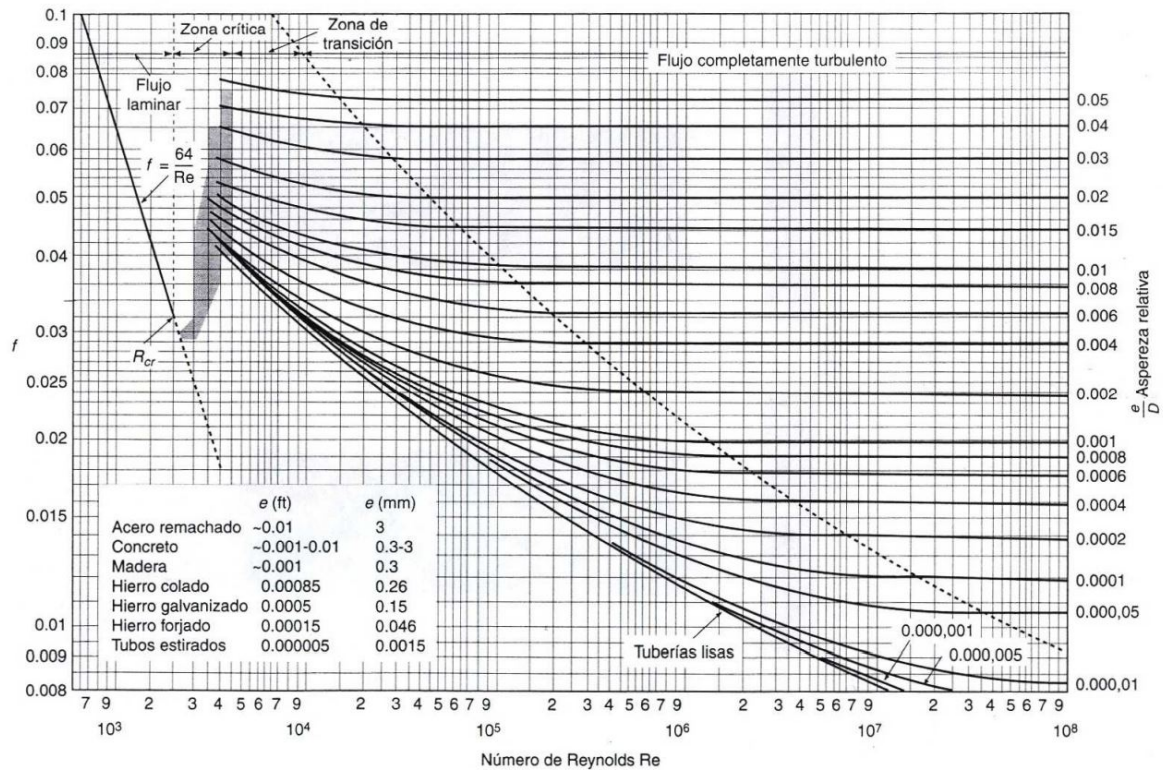


Figura 3-5 Diagrama de Moody

Por lo que, utilizando la Ecuación (2-2), el $NPSH_D$ corresponde a:

$$NPSH_D = \frac{101325 \left(\frac{N}{m^2}\right)}{9795,1869 \left(\frac{N}{m^3}\right)} - \frac{2198,18 \left(\frac{N}{m^2}\right)}{9795,1869 \left(\frac{N}{m^2}\right)} - \frac{\left(0,421 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} - \left(0,029 \times \frac{(1+ze)}{0,03175 m} \times \frac{\left(0,421 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}}\right) - z_e$$

Para que el modelo entre en cavitación, se debe cumplir que $NPSH_D = NPSH_B$, por lo que teniendo en cuenta el caudal propuesto, el $NPSH_D = 0,75 (m)$, por lo que reemplazando en el desarrollo anterior, se tiene que:

$$0,75 m = \frac{101325 \left(\frac{N}{m^2}\right)}{9795,1869 \left(\frac{N}{m^3}\right)} - \frac{2198,18 \left(\frac{N}{m^2}\right)}{9795,1869 \left(\frac{N}{m^2}\right)} - \frac{\left(0,421 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} - \left(0,029 \times \frac{(1+ze)}{0,03175 m} \times \frac{\left(0,421 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}}\right) - z_e$$

De esta forma, la altura necesaria z_e , da un total de 9,275 metros, lo que corresponde a la altura sobre el estanque para que la bomba entre en cavitación en cavitación incipiente.

De manera análoga a la anterior, se determinó la altura z_e , necesaria para presenciar la cavitación, para la gamma de caudales, los cuales pueden observarse en la Tabla 1:

$Q \left(\frac{l}{min} \right)$	$z_e \text{ (m)}$	$\frac{P_0}{\gamma} \text{ (m)}$	$\frac{P_{sat}}{\gamma} \text{ (m)}$	$\frac{v_e^2}{2g} \text{ (m)}$	$\Delta_{oe} \text{ (m)}$	$NPSH_D$	Re	f
20	9,275	10,344	0,2244	0,00903369	0,08531	0,75	13267	0,029
30	9,214	10,344	0,2244	0,0203258	0,16564	0,72	19900	0,025
40	9,090	10,344	0,2244	0,03613476	0,29391	0,7	26534	0,025
50	8,800	10,344	0,2244	0,05646056	0,43319	0,83	33167	0,024
60	8,441	10,344	0,2244	0,08130321	0,59749	1	39801	0,0235
70	8,005	10,344	0,2244	0,1106627	0,75371	1,25	46434	0,0225
80	7,635	10,344	0,2244	0,14453904	0,93963	1,4	53068	0,022
90	7,298	10,344	0,2244	0,18293222	1,13953	1,7	59701	0,022

Tabla 1 Variación de altura.

Como es posible observar en la Tabla 1, la altura z_e mínima a la que se puede acceder, corresponde a 7,298 metros, por lo que este modelo de banco de pruebas debe ser rechazado. Esto debido a las dimensiones físicas del lugar donde se pretenden hacer las mediciones requeridas, que, en este caso, corresponde al laboratorio de termo fluidos.

- 2) Calentar el agua en el depósito de ingreso de la bomba: Este método pretende, mediante el aumento de la temperatura del agua, elevar la presión de saturación del agua al ingreso de la bomba. Con esto se pretende reducir la brecha, más significativa, que existe en la Ecuación (2-2), que es entre la presión atmosférica y la de saturación.

Como se pudo observar, en el modelo anterior, el $NPSH_B$ más favorable, para la cavitación, corresponde cuando el caudal de la bomba es $90 \frac{l}{min}$, por lo que los cálculos para este nuevo modelo de banco de ensayo, se realizarán con la premisa de que este es el caudal con que la bomba funcionará. Para estos, hay que considerar las siguientes propiedades del agua, presentes en la Tabla 2.

Temperatura (°C)	P_{sat} (Pa)	$\gamma \left(\frac{N}{m^3} \right)$
20	2339,21	9783,24
30	4246,69	9757,958
40	7384,43	9724,05
50	12351,3	9682,596
60	19945,8	9634,674
70	31200,6	9580,774
80	47414,7	9521,68
90	70184,2	9457,588
100	101418	9388,89

Tabla 2 Propiedades del agua a diferentes temperaturas

Desarrollando los cálculos, de forma análoga al modelo 1, se obtuvieron los siguientes resultados de la altura z_e , requerida para presenciar la cavitación, cuando la presión de saturación del agua varía entre los 20 y 100°C. Estos se pueden apreciar en la Tabla 3.

Temperatura (°C)	z_e (m)	$\frac{P_0}{\gamma}$ (m)	$\frac{P_{sat}}{\gamma}$ (m)	$\frac{v_e^2}{2g}$ (m)	Δ_{oe} (m)	$NPSH_B$
20	7,201	10,3569983	0,23910381	0,18293222	1,13953	1,7
30	7,0512	10,3838324	0,43520273	0,18293222	1,01445	1,7
40	6,7955	10,420041	0,7593986	0,18293222	0,98223	1,7
50	6,3760	10,4646522	1,27561865	0,18293222	0,92937	1,7
60	5,7172	10,5167025	2,07021016	0,18293222	0,84636	1,7
70	4,716	10,5758679	3,25658449	0,18293222	0,7202	1,7
80	3,2442	10,6415044	4,97965695	0,18293222	0,53476	1,7
90	0,13301	10,7136196	7,42094073	0,18293222	0,14276	1,7
100	-1,7929	10,7920106	10,8019159	0,18293222	0,099	1,7

Tabla 3 Variación de temperatura.

Como es posible observar en la tabla anterior, los resultados de la altura requerida para presenciar la cavitación, son mucho más accesibles que en la propuesta de ensayo número 1, sobre todo cuando la temperatura supera alcanza los 80 °C.

A pesar de esto, hay que recalcar que el agua al alcanzar los 100 °C, a presión atmosférica, esta comienza a ebulir y cambiar de estado, por lo que es necesario descartar los resultados correspondientes a esta temperatura, dado a que las bombas sólo funcionan para fluidos líquidos.

Si bien los resultados obtenidos, entre los 80 y 90 °C, son accesibles y realizables, hay que recalcar que calentar grandes volúmenes de agua a estas temperaturas para que se produzca la cavitación incipiente es poco factible, esto ya que el agua al circular por el banco de ensayos esta perdería temperatura, por lo que debería volver a ser calentada antes de recircular.

Esto, junto a las dificultades de calentar agua a estas temperaturas, hace que este modelo de banco de ensayos pierda fuerza y sea poco factible, por lo que es necesario estudiar otras posibilidades.

- 3) Aumentar las pérdidas de carga de la admisión de la bomba: Este método se basa en aumentar el valor de las pérdidas de carga en la admisión de la bomba, específicamente, aumentar las pérdidas de carga singulares, para que de esta forma la brecha que existe entre el NPSH de la bomba y el NPSH disponible sea cero o lo más cercana a esta, para obtener la condición de cavitación incipiente.

Luego de analizar distintas alternativas, se decidió que la opción más factible, para lograr los escenarios propuestos en el apartado 2.6.1, se toma la opción de colocar una válvula de bola en la admisión de la bomba centrífuga. De esta forma al obstruir el caudal de ingreso a la bomba, las pérdidas de carga singulares que produce la válvula aumentarán de forma significativa, por lo que se espera que produzca un descenso local en el fluido, como se describe en el apartado 2.1.1, el cual posteriormente aumentará de forma gradual, logrando así que la bomba, y el impulsor de la bomba en específico, entre estado de cavitación.

De esta forma, las pérdidas Δ_{oe} descritas en la Ecuación (2-2) queda determinado de la siguiente forma:

$$\Delta_{oe} = \frac{v_e^2}{2g} \left(\left(f \times \frac{L}{d} \right) + k_v \right) \quad \text{Ecuación (3-4)}$$

Como es de esperarse el k_v depende del caudal de agua que circula por dentro de la válvula, lo que está relacionado directamente con el nivel de apertura que esta presenta.

Experimentalmente para determinar el k_v que presenta la válvula, dependiendo del nivel de apertura, es necesario medir la presión manométrica que existe antes de la válvula y posterior a la válvula medir el vacío parcial que se forma, por efecto de la succión de la bomba, utilizando un vacuómetro, como se puede observar en la Figura 3-6.

De esta forma, de acuerdo a lo anterior, el k_v es posible calcularse de la siguiente forma:

$$k_v = \frac{(P_{vacío} - P_{manométrica}) \times 2g}{\gamma_{agua} \times v_e^2} \quad \text{Ecuación (3-5)}$$

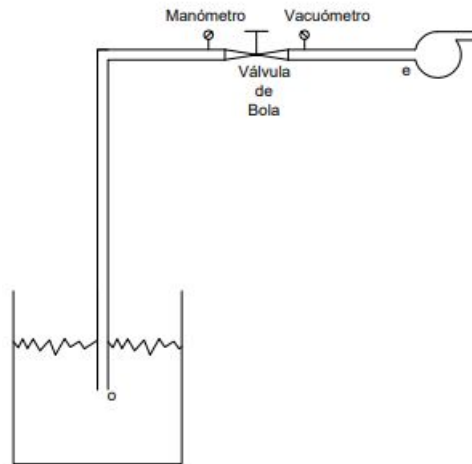


Figura 3-6 Configuración válvula manómetros.

3.3 Banco de ensayos definitivo

De acuerdo a lo expuesto en la sección anterior, específicamente en la propuesta (3), es necesario crear un ensamblaje para llevar a cabo los escenarios propuestos en la sección 2.6.1.

Para este ensamblaje se utilizarán los materiales expuestos en la Tabla 4, cabe recalcar que los diámetros y los fittings utilizados están sujetos a la disponibilidad comercial, los cuales se han escogido en base a criterios técnicos y económicos.

N°	Materiales	Cantidad
1	TEE PVC-P40MM CEM	2
2	Buje Reductor Larga PVC-P40x20 CEM	2
3	Terminal Conector rápido ¾ x HE	2
4	Codo 90° PVC-P900 40MM CEM	1
5	Terminación PVC-P40 MM x 1 ¼ CEM/HE	1
6	Tubo PVC Hidro 20MMx1M PN-16	1
7	Tubo PVC Hidro 40MMx 1 M PN-10	1
8	Tubo PVC Hidro 32MMx 1 M PN-10	1
9	Válvula Bola PVC CEM 32MM	1
10	Manguera Hidráulica ¾	1
11	Terminal HE PLANSA NEG 3/4 X3 UN	1

Tabla 4 Diámetros y fittings utilizados

Con los implementos adquiridos se logra crear el ensamblaje como se observa en la Figura 3-7.

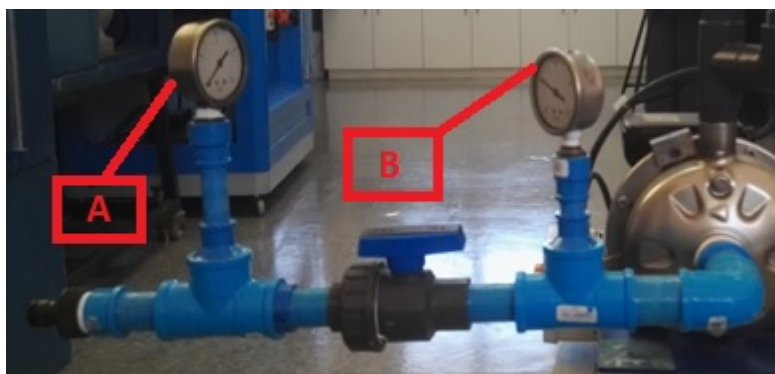


Figura 3-7 Ensamblaje de fittings en la entrada de la bomba

A la vez, y como se observa en la Figura 3-6, es necesario utilizar dos medidores de presión, los cuales están dispuestos tal como se puede apreciar en la figura anterior. Estos son:

- a) Manómetro A: medidor análogo de presión, el cual en su interior contiene glicerina, el cual protege al manómetro de la corrosión que puede provenir de ambientes costeros. Este manómetro en particular está fabricado para medir presiones manométricas positivas, para lo cual posee una graduación de 0 a 4 bar, la cual va aumentando cada 0,2 bar, tal como se muestra en la Figura 3-8.



Figura 3-8 Manómetro A

- b) Manómetro B: Este manómetro tiene las mismas características físicas que el mencionado anteriormente, salvo que este posee la capacidad de medir tanto presiones de vacío como presiones positivas. De este modo este manómetro puede medir vacío hasta -1 bar y presiones positivas hasta 3 bar. Tal como el anterior la graduación aumenta cada 0,2 bar.



Figura 3-9 Manómetro B

A la vez es necesario tener un depósito de agua del cual sea posible obtener agua y también una forma de poder medir el caudal de agua bombeada. Para esto se utilizará el banco de ensayos disponible en la universidad, el cual se compone de un reservorio de agua y también posee un estanque en el cual es posible medir flujos de agua por el método de aforo volumétrico. Siendo este el mostrado en la Figura 3-10. Cabe destacar que las medidas del estanque son de 34 cm de ancho y 61 cm de profundidad, y que a la vez posee una graduación de altura para poder obtener el volumen de agua que ingresa a este en una determinada cantidad de tiempo.

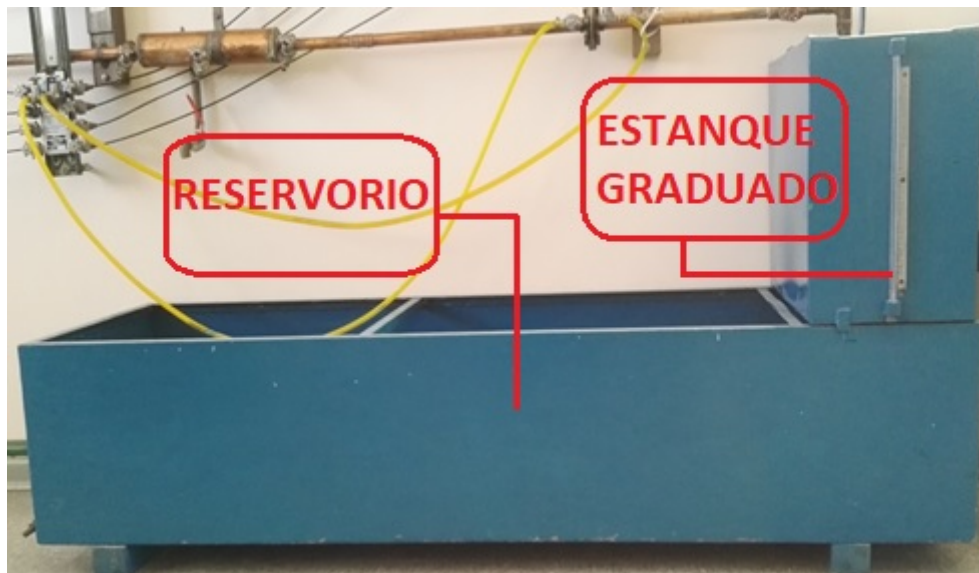


Figura 3-10 Reservorio y estanque de agua.

Para unir el reservorio a la bomba y ésta al estanque se utilizarán mangueras de diámetro $\frac{3}{4}$ pulgadas con conectores rápidos en sus extremos, de modo que el banco de ensayos quedará de la forma como se aprecia en la Figura 3-11.



Figura 3-11 Banco de ensayos.

La altura entre el reservorio y la bomba pueden verse identificada en el esquema presente en la Figura 3-12.

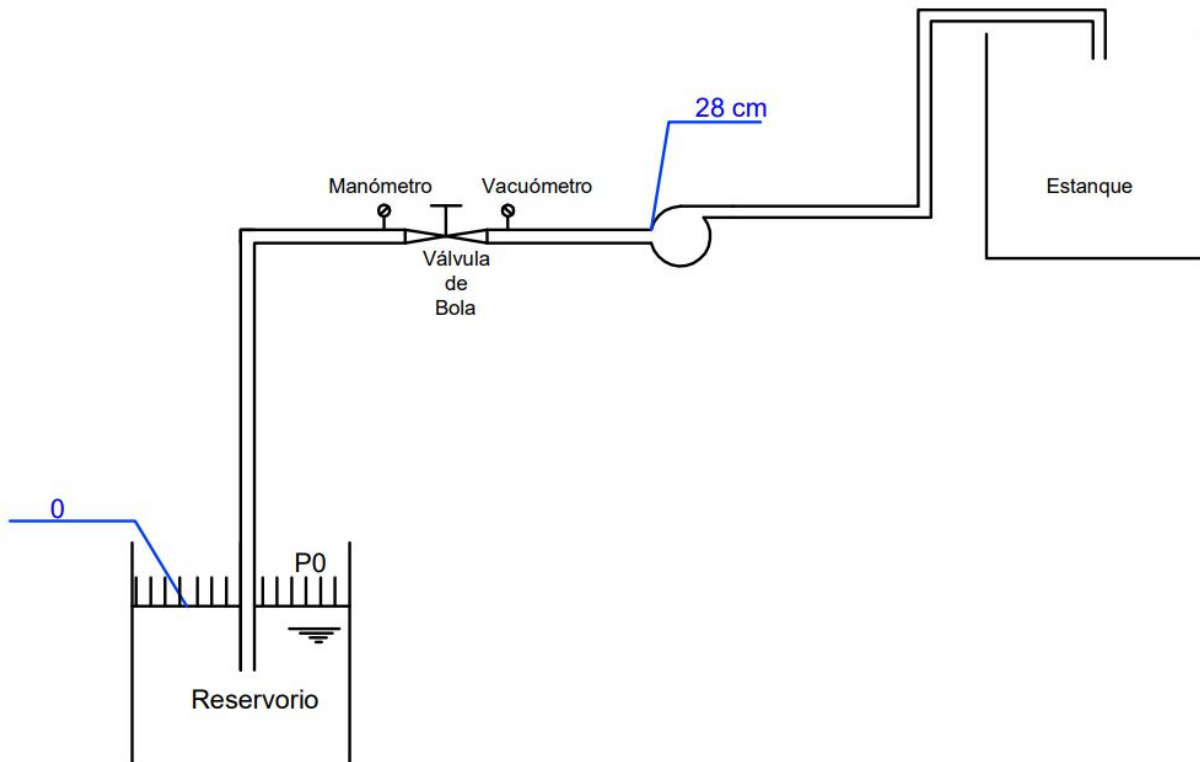


Figura 3-12 Esquema del banco de prueba

3.4 Equipos e instrumentos utilizados:

En esta sección se expondrán y describirán los implementos utilizados para el correcto desarrollo de las mediciones indicadas en el apartado 2.6.1.

3.4.1 Tacómetro

Instrumento que permite medir los giros que presenta un eje en una cantidad de tiempo definida, para el desarrollo de este experimento se utilizará un tacómetro marca CEM, modelo DT-6236B, el cual tiene la funcionalidad de poder hacer mediciones mediante un lector óptico, siempre cuando haya una cinta reflectante en el objeto a medir en la cual rebote el haz de luz. Además, este instrumento posee un adaptador para poder medir las revoluciones mediante contacto con el objeto a medir. Específicamente este tacómetro presenta las mediciones en revoluciones por minuto (RPM) y cuenta con una precisión básica, de $\pm 0,05\%$.



Figura 3-13 Tacómetro de contacto

3.4.2 Acelerómetro

Para poder medir las pulsaciones de presión que produce el fluido al interactuar con el impulsor, se utilizará un acelerómetro; el cual corresponde a un acelerómetro multipropósito marca CTC, modelo AC102-1A, el cual posee una sensibilidad de 100 mV/g y mide frecuencias ente 30 y 900000 CPM. A la vez este posee un terminal de conexión frontal del tipo BNC, para ser conectado a tarjetas de adquisición de datos con este tipo de entrada.



Figura 3-14 Acelerómetro AC102-1A.

3.4.3 Tarjeta de adquisición de datos

Las tarjetas de adquisición de datos, conocidas como DAQ por su significado en inglés –data acquisition-, actúan como la interfaz entre un ordenador y las señales físicas captadas por el acelerómetro, es decir, la información recaudada por el sensor se pasa al DAQ, el cual se encarga de transformar los códigos del mundo real a los códigos digitales.

En esta experiencia se utilizará una tarjeta marca National Instruments, modelo NI 9234, el cual posee 4 canales analógicos, y puede medir señales desde sensores piezoeléctricos electrónicos integrados (IEPE) y no IEPE como acelerómetros, tacómetros y sensores de proximidad. Este DAQ posee rango de voltaje de entrada analógica de -5 a 5 Volts y entradas del tipo BNC.



Figura 3-15 Tarjeta de adquisición de datos NI 9234.

3.4.4 CompactDAQ

El CompactDAQ corresponde a un chasis en el que se pueden montar un número definido de tarjetas de adquisición. El chasis brinda la sencillez de conexión rápida, mediante el uso de la conexión USB, a los medidores eléctricos y de sensores. También controla la temporización, la sincronización y la transferencia de datos entre los módulos de entrada y salida a un servidor externo.

Específicamente el chasis utilizado corresponde a uno marca National Instruments, modelo NI cDAQ-9188 con 8 ranuras para tarjetas, con salidas de conexión a USB y entrada de alimentación Input de 9-30 V y 15 W máx.



Figura 3-16 Compact DAQ cDAQ- 9188.

3.4.5 Ordenador

Para poder visualizar y analizar los datos adquiridos es necesario un ordenador, el cual cumpla con tener entradas puerto USB, para poder conectar el CompactDAQ, y a la vez que posea el software LabView.

En este caso se utilizará un notebook marca Lenovo, modelo V310, el cual posee un procesador Intel i5 y puertos USB 3.0.

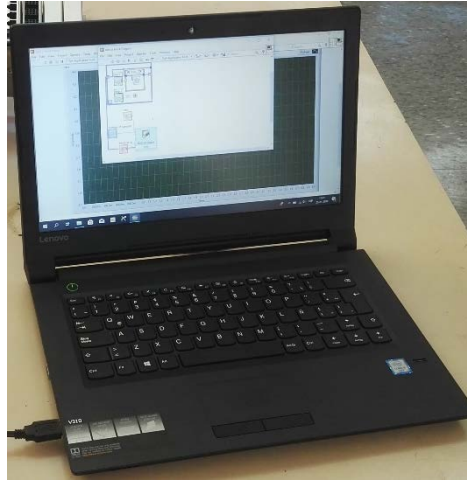


Figura 3-17 Ordenador Lenovo.

3.5 Conexiones e instalación de los equipos

En esta sección se mostrará cómo se conectan e instalan los equipos correctamente para luego proceder con las mediciones.

En la figura Figura 3-18 se observa cómo se conectan los equipos entre sí. En ella se puede observar que se han señalado cada conexión.

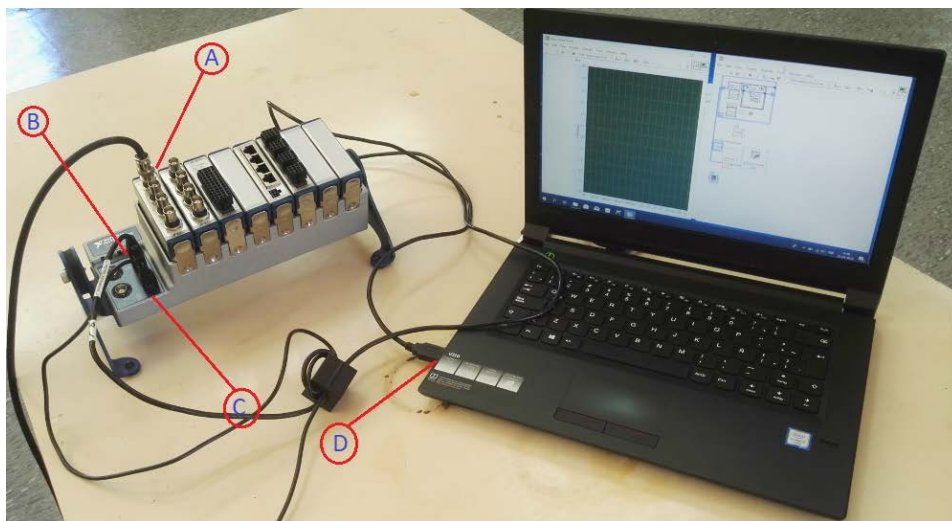


Figura 3-18 Conexiones entre equipos.

Las conexiones son:

- a) Conexión entre el acelerómetro AC102-1A con la tarjeta de adquisición de datos NI 9234, que a la vez está montada en el CompactDAQ Cdaq-9188.
- b) Conexión entre el chasis con el cable con salida USB.
- c) Alimentación del Chasis mediante el cable tipo Pin.
- d) Enlace entre el CompactDAQ y el ordenador mediante cable conexión USB.

A continuación, se monta el acelerómetro a la bomba. Esto puede observarse en la Figura 3-19, en donde se aprecia el acelerómetro AC102-1A (E) montado sobre un soporte fabricado especialmente para esta bomba, esto debido a que como el acelerómetro se fija por efecto de fuerzas magnéticas, es necesario crear un dispositivo (F) que sea de material ferromagnético, ya que la carcasa frontal de la bomba está fabricado con AISI 304, un material no magnético.

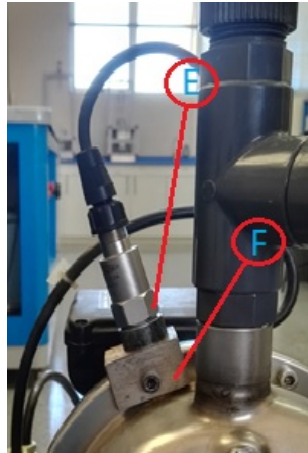


Figura 3-19 Montaje del acelerómetro.

Capítulo 4: Procedimiento y resultados:

4.1 Desarrollo experimental.

Una vez ya definido y especificado cada elemento del banco de ensayos, es posible comenzar a realizar el análisis experimental expuestos en el apartado 4.2.

De esta forma, a continuación, se expondrán una serie de mediciones de pulsaciones de presión, las cuales difieren una de otra en el porcentaje de estrangulación que presenta la válvula de bola localizada antes de la admisión de la bomba centrífuga.

- 1) Medición con la válvula 100% abierta: En esta medición se espera obtener la respuesta vibratoria de la bomba centrífuga, cuando esta funciona en condiciones nominales, es decir, sin la presencia de efectos cavitatorios.

En esta medición se obtuvieron los siguientes parámetros:

Medición	Tiempo	Altura de aforo	$P_{manómetro}$	$P_{vacuómetro}$	RPM
Válvula 100% abierta	8,3 s	5 cm	0 bar	0,5 bar	2783

Para poder medir la velocidad de giro del impulsor, se utilizará el tacómetro de contacto; el cual, específicamente, se colocará en el centro del ventilador de la bomba, el cual se encuentra señalado con el número 14 en la Figura 4-1, lo cual es posible mediante el retiro de la carcasa protectora trasera previamente, la cual se encuentra señalada con el número 139.

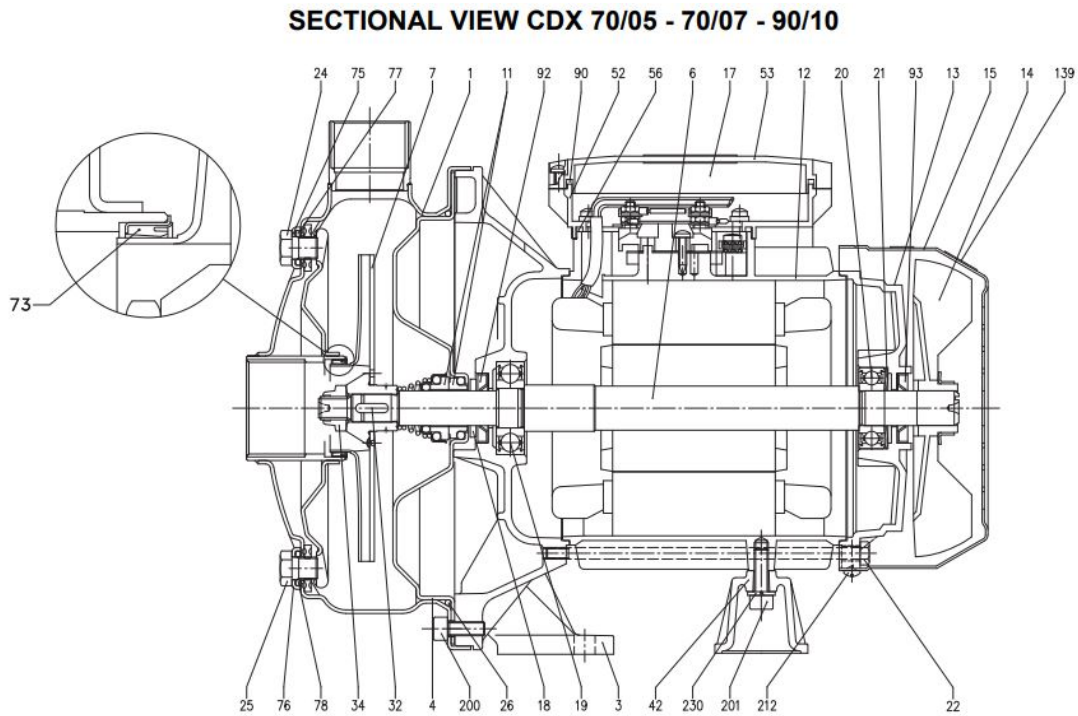


Figura 4-1 Vista seccional de la bomba centrífuga.

Tomando en cuenta las dimensiones del estanque de aforo volumétrico, y los 5 cm que se tomaron como referencia para medir, es posible determinar el volumen que la bomba mueve en el tiempo medido, que en este caso corresponde a los 8,3 segundos, siendo así:

$$\text{Volumen: } 61 \text{ cm} \times 34 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 10370 \text{ cm}^3$$

$$\text{Caudal: } \frac{10370 \text{ cm}^3}{8,3 \text{ s}} = 1249,39 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = 1,249 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 74,96 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$$

Debido al valor del caudal que mueve la bomba, es posible decir que la bomba se encuentra en un estado óptimo, ya que esta se encuentra funcionando a un valor muy cercano al nominal señalado por el fabricante en la placa de este equipo, señalado en la Figura 3-2.

Las pulsaciones de presión medidas por el acelerómetro, son recopilados y ordenados por el programa creado en LabView, el cual crea y los va guardando en un archivo de texto (.txt), tal como se muestra en la Figura 4-2. En esta es posible observar tres columnas, las cuales se disponen de 256000 datos cada una. Las columnas mostradas se componen de la fecha en que se realizó la

medición, la hora en la cual fue tomada cada pulsación de presión, con la precisión de una millonésima de segundo, y finalmente la última columna compuesta por las pulsaciones de presión, medidas con el acelerómetro.

De forma adicional, en la parte superior es posible observar el tiempo inicial, el cual corresponde la hora en que se midió la primera pulsación y la variación de tiempo, delta t (Δt), el cual corresponde a la variación de tiempo entre cada medición de pulsación.

```

m_100v2_001: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
| waveform Acceleration
t0 21-12-2018 12:00:35,712953
delta t 3,906250E-5

time Acceleration
21-12-2018 12:00:35,712953 -1,106264E-1
21-12-2018 12:00:35,712992 -1,103566E-1
21-12-2018 12:00:35,713031 -1,222970E-1
21-12-2018 12:00:35,713070 -2,066508E-1
21-12-2018 12:00:35,713109 -2,112947E-1
21-12-2018 12:00:35,713148 -2,036192E-1
21-12-2018 12:00:35,713188 -1,530891E-1
21-12-2018 12:00:35,713227 -1,150261E-1
21-12-2018 12:00:35,713266 -8,901924E-2
21-12-2018 12:00:35,713305 -7,139441E-2
21-12-2018 12:00:35,713344 -2,016666E-1
21-12-2018 12:00:35,713383 -2,362932E-1
21-12-2018 12:00:35,713422 -2,271532E-1
21-12-2018 12:00:35,713461 -2,278405E-1
21-12-2018 12:00:35,713500 -1,718829E-1
21-12-2018 12:00:35,713539 -1,865853E-1
21-12-2018 12:00:35,713578 -1,519843E-1
    
```

Figura 4-2 Ejemplo de datos recopilados.

Mediante el software Matlab, y su función de editor de scrip, es posible crear un programa con el cual sea posible cargar los datos medidos y analizarlos mediante gráficos.

El programa creado puede observarse en la Figura 4-3, en donde se explica cada paso de la programación en el texto resaltado en verde.

```

clc
clear all
##### ABIERTA 100 #####
A= load('m_100_001A.txt');%%%cargar los datos de las mediciones%%%
f=A(:,3);%%Selecciona y crea el vector columna de las amplitudes%%%
t=0:3.906250e-5:3.906250e-5*(length(f)-1); %%% Crea un vector de tiempo, a partir del diferencial de tiempo t0%%
figure(1) %%% Crea una ventana en la cual es posible observar las gráficas %%%
subplot (2,1,1)
plot(t,f,'b')
title('Vibración válvula 100% abierta');
ylabel('Amplitud')
xlabel('Tiempo (s)')
Fs= 1/(t(2)-t(1)); % Frecuencia de muestreo (en Hz)
nfft=256000;% El numero de puntos de la fft %%%
Y=fft(f,nfft);% Tomar la FFT, y llenando con ceros, de manera que el largo de la fft sea el nfft %%%
Y=Y(1:nfft/2); % la FFT es simétrica, así que se tira la mitad %%%
my=abs(Y).^2;% tomar la potencia espectral, módulo al cuadrado de la FFT %%%
frecuencias=(0:nfft/2-1)*Fs/nfft; %construcción del vector de frecuencias %%%
subplot (2,1,2)
plot(frecuencias,my,'b');
title('Espectro de vibraciones válvula 100% abierta');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Amplitud');

```

Figura 4-3 Script creado en Matlab.

Con el fin de repetir los mismos pasos a lo largo de este apartado, es necesario decir que los procesos anteriores, correspondientes a la recopilación y análisis de datos, presentados en las Figura 4-2 y Figura 4-3 son válidos para todas las mediciones que se presentarán en este apartado.

Para esta medición, correspondiente a la válvula 100% abierta, las vibraciones captadas, durante el tiempo de 1 segundo, corresponden a las mostradas en la Figura 4-4.

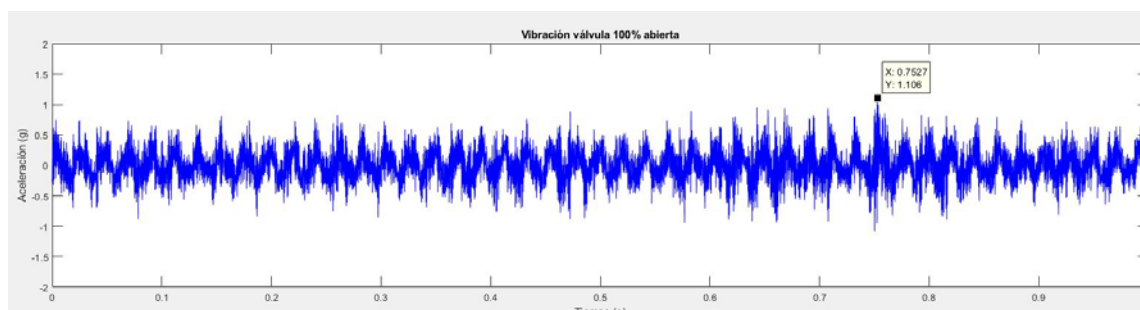


Figura 4-4 Vibraciones medición 1.

En esta medición, con ayuda del software Matlab, es posible determinar que la mayor amplitud alcanzada, corresponde a 1,1061 (g), el cual es alcanzado en el segundo 0,75.

Por otro lado, el espectro de vibraciones, creado utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT), puede observarse en la Figura 4-5.

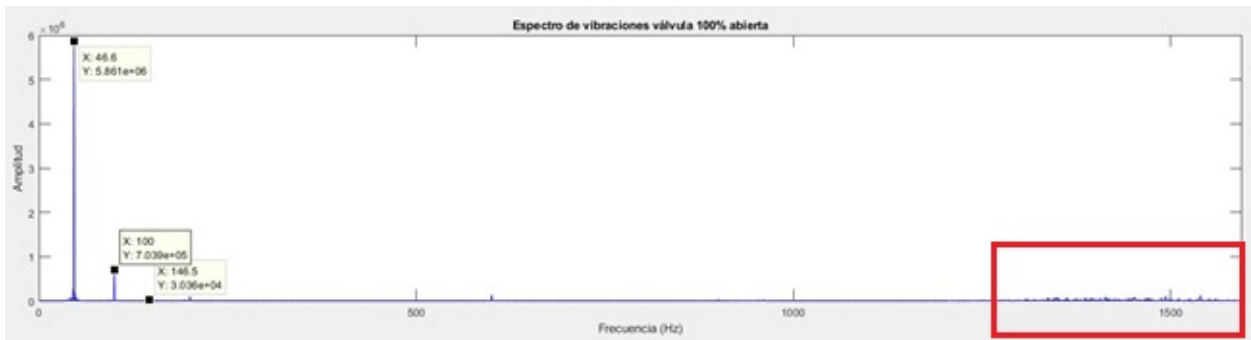


Figura 4-5 Espectro de frecuencia medición 1.

En ella (Figura 4-5) es posible observar que las vibraciones aleatorias en la zona de alta frecuencia (comprendida en la zona entre los 20 y 2000 Hz) , también denominado banda ancha de alta frecuencia y comúnmente conocido como “pasto”. Esta vibración presenta una amplitud vibratoria de muy bajo valor, correspondiente a $8,203 \times 10^4$ en su peak más alto de amplitud y que se extiende dentro de los 1278 y 1587 Hz.

A la vez es posible observar el peak mayor, que ocurre a los 46,6 Hz donde la amplitud alcanza el valor de $5,861 \times 10^6$. Cabe recalcar que la frecuencia obtenida en este punto corresponde a la velocidad rotatoria que presenta el rodete de la bomba centrífuga, siendo esta igual a

$$RPM = 46,6 \text{ Hz} \times 1 \frac{rev}{seg} \times 60 \frac{seg}{min} = 2796 \text{ RPM}$$

lo que difiere con la medición inicial hecha con el tacómetro de contacto, de 2783 RPM, lo que indica que posiblemente este no se encuentre calibrado correctamente o que la exactitud de este no es tan precisa. De todas formas, la diferencia de velocidad rotatoria, sólo representa un 0,46% de la velocidad medida con el tacómetro, lo que quiere decir que es una diferencia despreciable.

- 2) Medición con la válvula 75% abierta: En esta medición se espera obtener una presión de vacío más significativa en el área posterior a la válvula, debido al estrangulamiento que sufre el fluido al pasar por la válvula.

En esta medición se obtuvieron los siguientes parámetros:

Medición	Tiempo	Altura de aforo	$P_{manómetro}$	$P_{vacuómetro}$	RPM
Válvula 75% abierta	9,8 s	5 cm	0 bar	-0,4 bar	2750

De forma análoga a la medición anterior, es posible determinar el caudal que maneja la bomba de la siguiente forma:

Volumen: $61\text{ cm} \times 34\text{ cm} \times 5\text{ cm} = 10370\text{ cm}^3$

Caudal: $\frac{10370\text{ cm}^3}{9,8\text{ s}} = 1058,163\frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = 1,058163 \times 10^{-3}\frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 63,49\frac{\text{litros}}{\text{min}}$

Para esta medición, correspondiente a la válvula 75% abierta, las vibraciones captadas, durante el tiempo de 1 segundo, corresponden a las mostradas en la Figura 4-6.

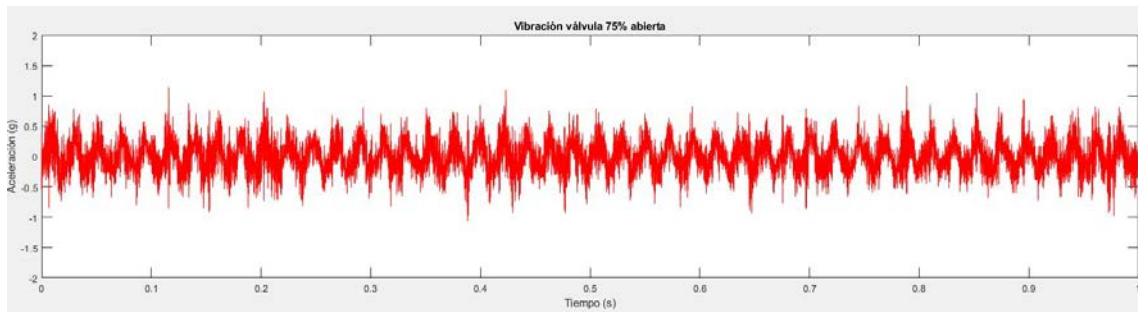


Figura 4-6 Vibraciones medición 2.

En esta medición es posible observar que la mayor amplitud alcanzada, corresponde a 1,164 (g), la cual es levemente mayor al peak máximo de las vibraciones analizadas en la medición 1, el cual es alcanzado en el segundo 0,786.

Por otro lado, el espectro de vibraciones, creado utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT), puede observarse en la Figura 4-7.

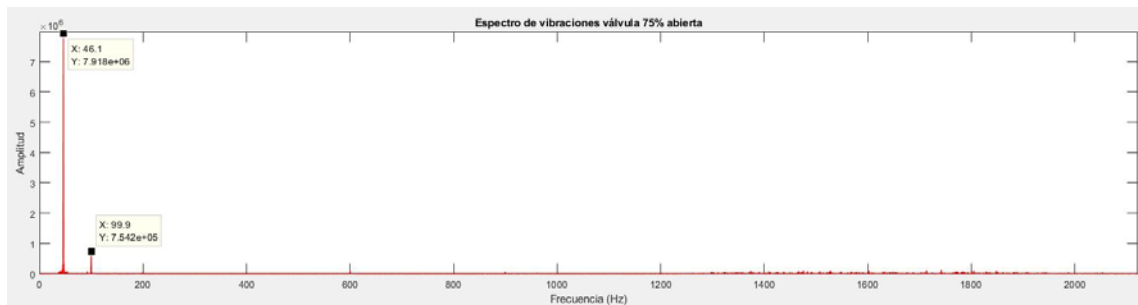


Figura 4-7 Espectro de frecuencias medición 2.

En la figura, se observa que existe un cambio, no muy significativo, en la frecuencia de giro del rodete, la cual corresponde a 46,1 Hz siendo así 2766 RPM, un 0,58% mayor a la medida con el tacómetro. A la vez se observa que el pasto vibratorio tiene una amplitud similar a la anterior, pero esta vez se prolonga desde los 1278 Hz hasta los 1890 Hz, alcanzando su peak a los 1848 Hz con una amplitud de $1,037 \times 10^5$ la cual es un 26,41% mayor al peak de la medición 1.

- 3) Medición con la válvula 50% abierta: Siguiendo la premisa teórica, se espera que en ésta medición se note un cambio notorio con respecto a la medición de referencia, que en este caso es la 1.

En esta medición se obtuvieron los siguientes parámetros:

Medición	Tiempo	Altura de aforo	$P_{manómetro}$	$P_{vacuómetro}$	RPM
Válvula 50% abierta	17,88 s	5 cm	0 bar	-0,5 bar	2843

Al igual que de las formas anteriores, el volumen y el caudal en esta medición vienen dados por:

$$Volumen: 61 \text{ cm} \times 34 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 10370 \text{ cm}^3$$

$$Caudal: \frac{10370 \text{ cm}^3}{17,88 \text{ s}} = 579,97 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = 0,5799 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 34,7982 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$$

Para esta medición, correspondiente a la válvula 50% abierta, las vibraciones captadas, durante el tiempo de 1 segundo, corresponden a las mostradas en la Figura 4-8.

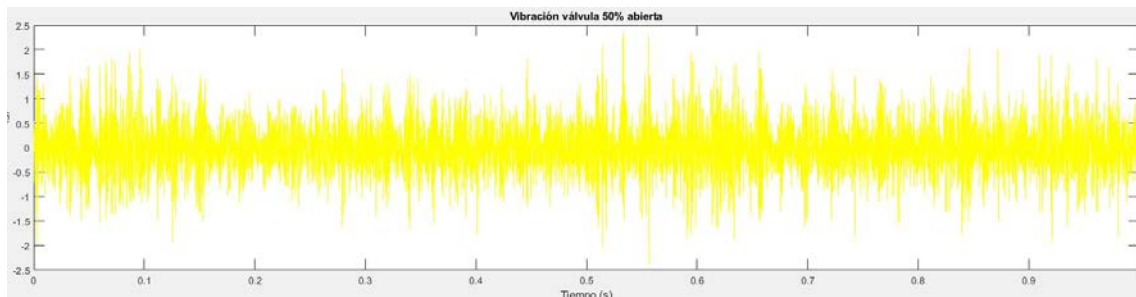


Figura 4-8 Vibraciones medición 3

En este gráfico de vibraciones, se puede observar que a pesar de que hay un menor caudal que circula por la bomba, existen pulsaciones de presión que son considerablemente más fuertes que en la primera medición, esto se aprecia en que hay varios peak que superan los 1,5 (g), alcanzando su mayor valor en el segundo 0,5335 con un valor de 2,368 (g), siendo un 114% mayor al máximo alcanzado en la medición 1. Además, se aprecia que el gráfico ya no sigue un “orden” en las vibraciones como se aprecia en las mediciones 1 y 2.

Analizando el espectro de vibraciones, mediante la FFT, se obtiene el gráfico presente en la Figura 4-9.



Figura 4-9 Espectro de frecuencia medición 3.

En este gráfico, se observa un cambio notorio en las vibraciones de alta frecuencia, específicamente en el rango entre los 577,89 Hz y los 1839 Hz, zona en la que la máxima amplitud alcanza el valor de $7,126 \times 10^5$, casi nueve veces mayor (868,7 %) a la medición inicial, lo que indica las pulsaciones de presión son cada vez más fuerte, y abarcan un espectro mayor de frecuencia. Este espectro de banda ancha de alta frecuencia, es una consecuencia característica de la cavitación.

- 4) Medición con la válvula 30% abierta: Dado a que en la medición anterior (3), se encontraron indicios de la presencia de cavitación en la bomba, es necesario realizar mediciones cada vez más próximas entre sí, para poder estudiar este fenómeno de cavitación con detalle.

Dado al bajo caudal que impulsa la bomba, es necesario cambiar la forma en que se mide este parámetro, es por esto que en ésta medición se utilizó un vaso precipitado, tomando referencia un límite de 800 mL.

En esta medición se obtuvieron los siguientes parámetros:

Medición	Tiempo	Volumen	$P_{manómetro}$	$P_{vacuómetro}$	RPM
Válvula 30% abierta	21,54 s	800 mL	0 bar	-0,8	2798

$$Volumen = 800 \text{ mL} \times 10^{-6} \left(\frac{m^3}{ml} \right) = 8 \times 10^{-4} (m^3)$$

$$Caudal = \frac{8 \times 10^{-4} (m^3)}{21,54 (s)} = 3,714 \times 10^{-5} \left(\frac{m^3}{s} \right) = 2,2284 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$$

Para esta medición, las pulsaciones de presión pueden observarse en el siguiente gráfico, mostrado en la Figura 4-10.

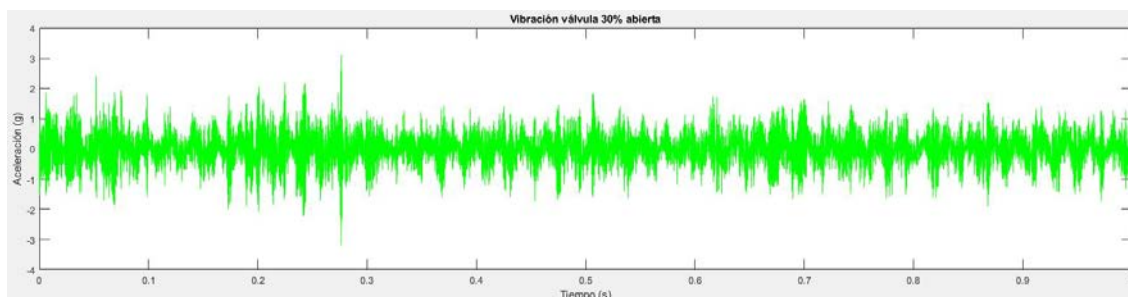


Figura 4-10 Vibraciones medición 4

Como se puede apreciar, en esta medición las pulsaciones tienden a tener un comportamiento más “prolijo” comparado con la medición 3. Si bien se aprecian menos peaks, la amplitud máxima alcanzada corresponde a 3,109 (g), casi el triple (un 281%) de la amplitud máxima alcanzada en la medición de referencia (medición 1), además existen varios peak´s que sobrepasan el rango de los 2 (g).

Por otro lado, el espectro de esta medición corresponde al siguiente:



Figura 4-11 Espectro de frecuencia medición 4.

En la figura, se puede apreciar un pasto más “acotado” ya que este está comprendido dentro del rango 1200 – 1800 Hz pero a la vez ya alcanza el rango de magnitud del $1,5 \times 10^6$, muy superior a los rangos alcanzados anteriormente.

A la vez, se observa que la frecuencia de rotación llega a los 46,3 Hz, por lo que el impulsor rota a una velocidad de 2778 RPM, una velocidad similar a la de la medición 1, pero en este caso la amplitud que alcanza este peak corresponde a $8,849 \times 10^6$ un 60% mayor a la amplitud de la medición 1.

- 5) Medición con la válvula 25% abierta: En la presente medición, se puede observar que, debido al bajo caudal que transporta la bomba, el vacío que se produce es menor, ya que, con el porcentaje de apertura de la válvula, el mayor fluido que existe en el sistema, posterior a la válvula, corresponde a aire.

Tal como en el caso anterior, debido al bajo flujo de agua que impulsa la bomba, es necesario medir el volumen de agua bombeado con un vaso precipitado, en donde se tomará de referencia los 800 mL.

En esta medición se obtuvieron los siguientes parámetros:

Medición	Tiempo	Volumen	$P_{manómetro}$	$P_{vacuómetro}$	RPM
Válvula 25% abierta	26,87 s	800 mL	0 bar	-0,6	2898

$$Volumen = 800 \text{ mL} \times 10^{-6} \left(\frac{m^3}{ml} \right) = 8 \times 10^{-4} (m^3)$$

$$Caudal = \frac{8 \times 10^{-4} (m^3)}{26,87 (s)} = 2,977 \times 10^{-5} \left(\frac{m^3}{s} \right) = 1,7863 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$$

A consecuencia de lo expuesto anteriormente, las pulsaciones de presión corresponden a las siguientes:

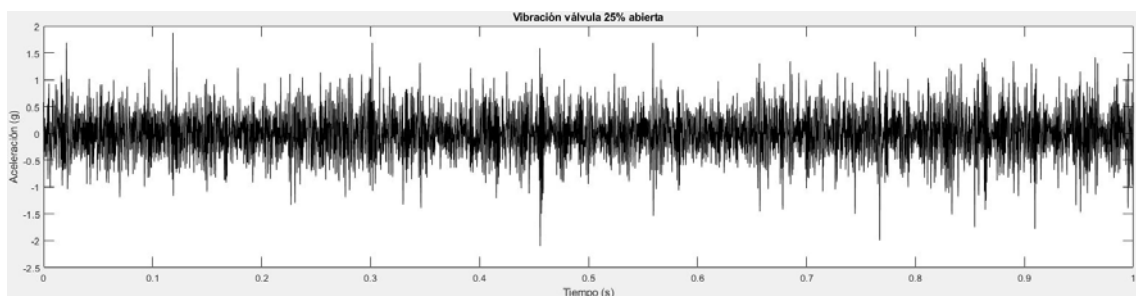


Figura 4-12 Vibraciones medición 5.

Como se puede observar en la Figura 4-13, los peaks de las pulsaciones de presión se aprecian más distantes que la medición anterior, ya que como se comentó anteriormente, hay un menor flujo de agua que interactúa con el impulsor, lo que provoca que se creen menos burbujas que caviten en contra del impulsor.

De esta forma, el espectro de la medición 5 corresponde al siguiente:

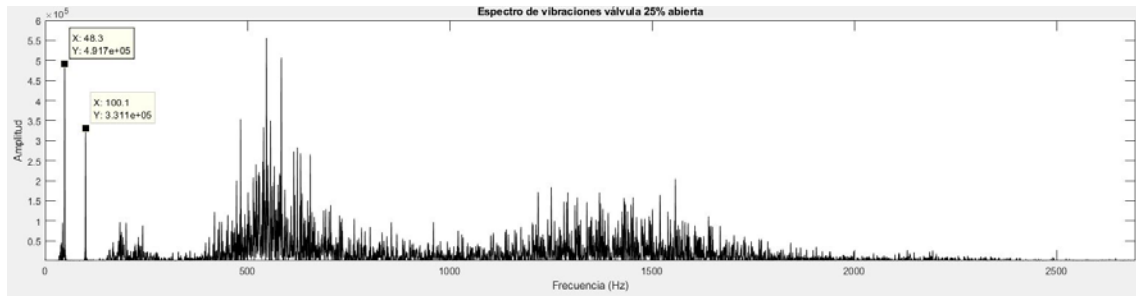


Figura 4-13 Espectro de frecuencia medición 5.

En este espectro es posible apreciar dos fenómenos que competen al funcionamiento de las bombas centrífugas:

- a) En primer lugar, y más notorio, se aprecia el pasto vibratorio, o espectro de banda ancha, el cual en su mayoría oscila entre los valores de 1 y 2, mientras que su peak alcanza una amplitud de $5,549 \times 10^5$ a una frecuencia de 547,2 Hz.
- b) En segundo lugar, se aprecia que antes de la frecuencia de funcionamiento de la bomba, los 48,3 Hz, existen pequeños peaks que hacen referencia al bajo caudal con el que está funcionando la bomba. Este fenómeno denominado hambruna de la bomba, o stall, indican que el bajo caudal de la admisión hace que se creen zonas dentro del impulsor sin fluido, provocando así vibraciones a una frecuencia igual o menor a la de la frecuencia de paso, debido al desbalanceamiento de la masa del fluido.

Los resultados anteriores, pueden resumirse en la Tabla 5.

Medición	Porcentaje de apertura de la válvula	Presión del vacuometro (bar)	Presencia de cavitación	Observación
1	100	0,5	No	Medición de referencia
2	75	-0,4	Si	Se comienza a escuchar el ruido característico de la cavitación
3	50	-0,5	Si	El ruido de la cavitación comienza a ser más evidente
4	30	-0,8	Si	Notorio ruido de cavitación
5	25	-0,6	Si	Presencia de cavitación y hambruna de la bomba (Stall)

Tabla 5 Resumen de los resultados de la medición.

4.2 Desarrollo simulaciones:

A partir del modelo presentado en la Figura 3-7, es posible determinar el comportamiento de la presión del fluido y a la vez, estimar las pérdidas de carga que se producen por efecto de la válvula de bola en sus distintas regulaciones. Mediante el programa Ansys Fluent, específicamente utilizando la herramienta Fluent, se podrá obtener los cambios de presión que se producen por efecto de la reducción del caudal. Para ejemplificar el desarrollo de las simulaciones, se explicará mediante el esquema mostrado en la Figura 4-14 los pasos necesarios para llevar a cabo las simulaciones desarrolladas.

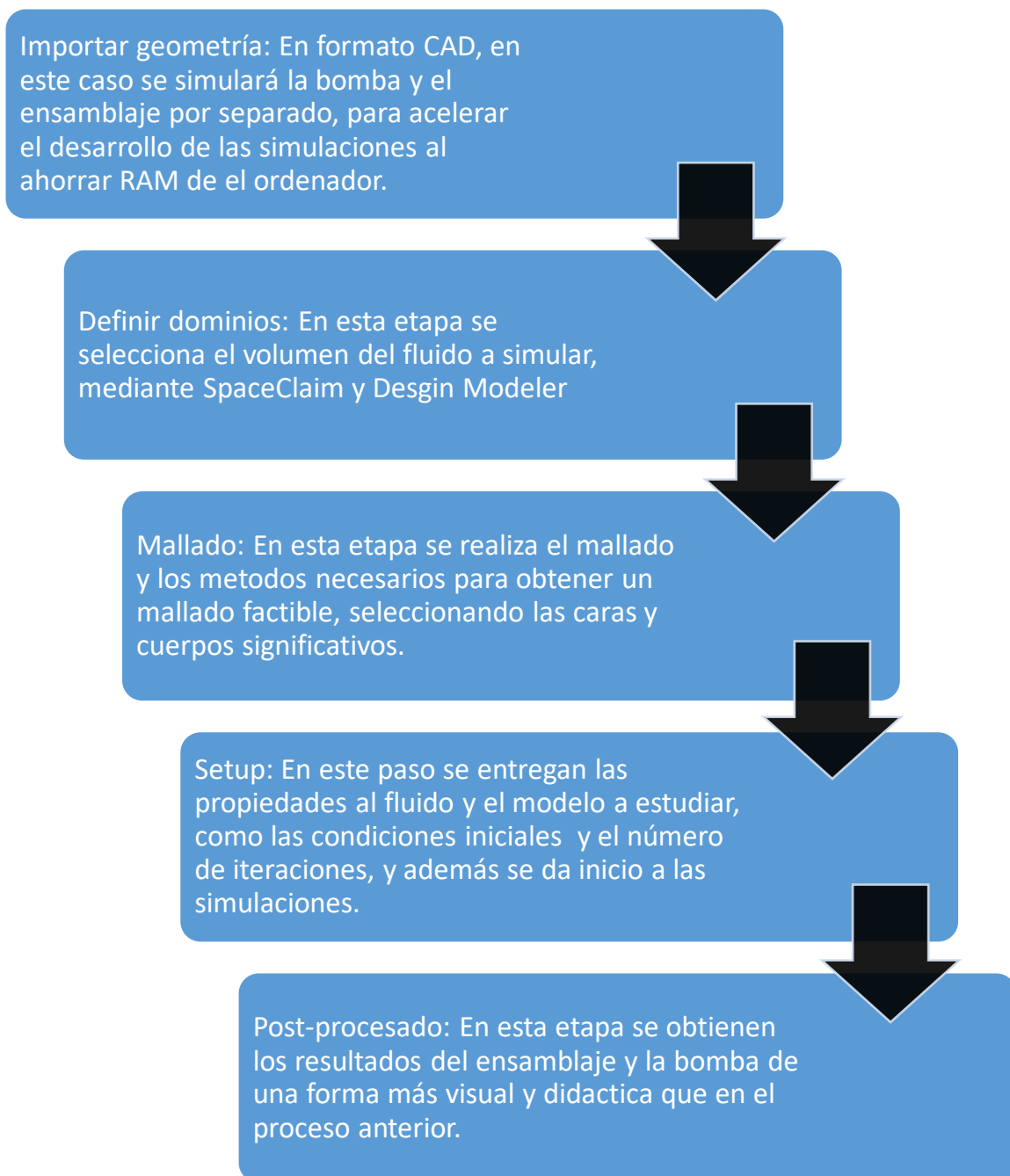


Figura 4-14 Esquema explicativo de las simulaciones

Como se muestra en la Figura 2-18, en la que se muestra el esquema de desarrollo de Ansys Fluent, primero es necesario detallar la geometría que se simulará. Para esto, se desarrolló un modelo CAD en Inventor, el cual posee formatos compatibles para Ansys. Este se puede apreciar en la Figura 4-15.

En esta se aprecia, destacada en azul, la válvula de bola, la cual en esta oportunidad se encuentra cerrada un 50%, a la izquierda de esta se observa una representación del manómetro, mientras que al lado derecho de esta se puede ver la representación del vacuómetro. Si bien estos instrumentos no servirán para realizar una medición de presión, es importante localizarlos y representarlos en el modelo CAD, dado que luego de la simulación de Ansys se podrá medir la presión en estos puntos para determinar los cambios de presión.

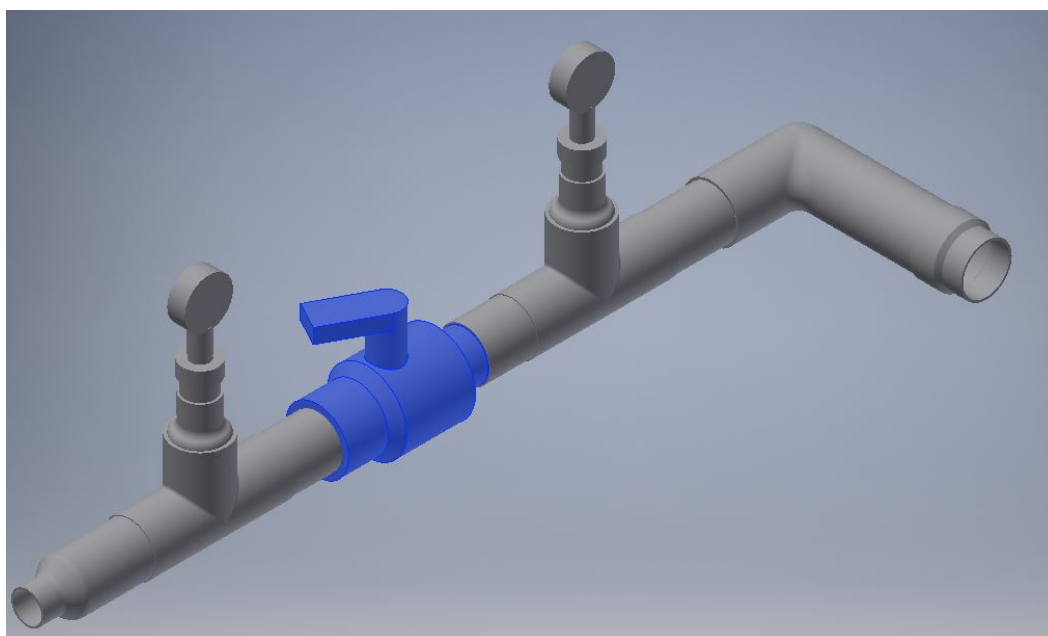


Figura 4-15 Modelo CAD

Posterior a esto, es necesario “llenar” las cavidades del modelo a estudiar, mediante el software de modelado que trae por defecto ANSYS, llamado SpaceClaim, donde por medio de la herramienta “Prepare”, seleccionando los extremos del ensamblaje, se creará automáticamente un volumen comprendido entre los extremos; esto se puede apreciar en la Figura 4-16.

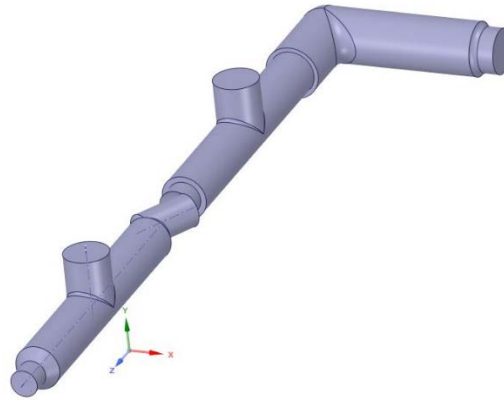


Figura 4-16 Volumen interior del ensamblaje

Luego de tener listo el modelo a analizar, sigue el mallado de este. Para esto mediante Ansys Meshing (programa incluido en el software ANSYS), en el cual utilizando una combinación de un sizing (metodo para realizar mallados más finos en ciertas caras) y un mallado automático, y escogiendo un factor máximo de tamaño (max size factor), del orden de 0.002, es posible obtener una malla lo suficientemente refinada para poder continuar con la simulación. Además, en esta etapa es posible nombrar las caras que actuarán como entrada (inlet) y salida (outlet) del fluido, siendo estas las de la izquierda y derecha, respectivamente, como se puede apreciar en la Figura 4-18.

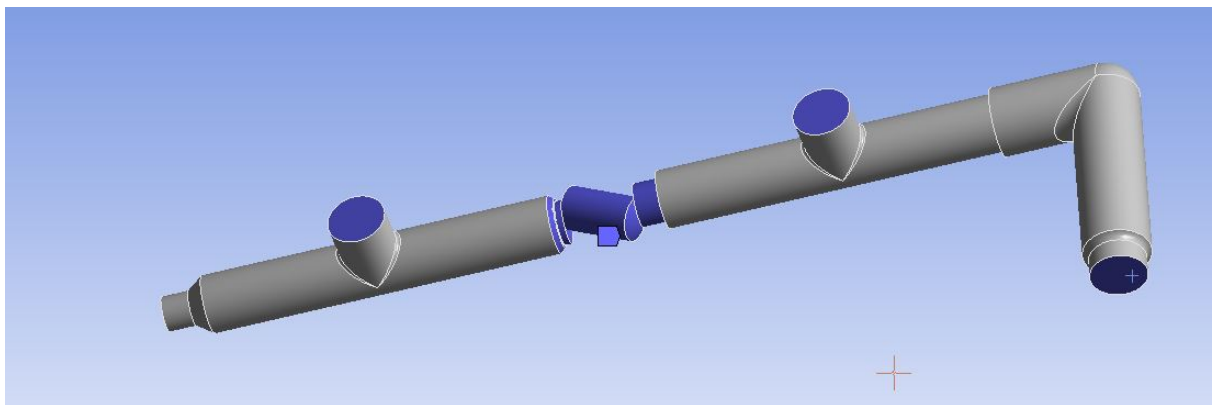


Figura 4-17 Caras malladas por un método en particular.

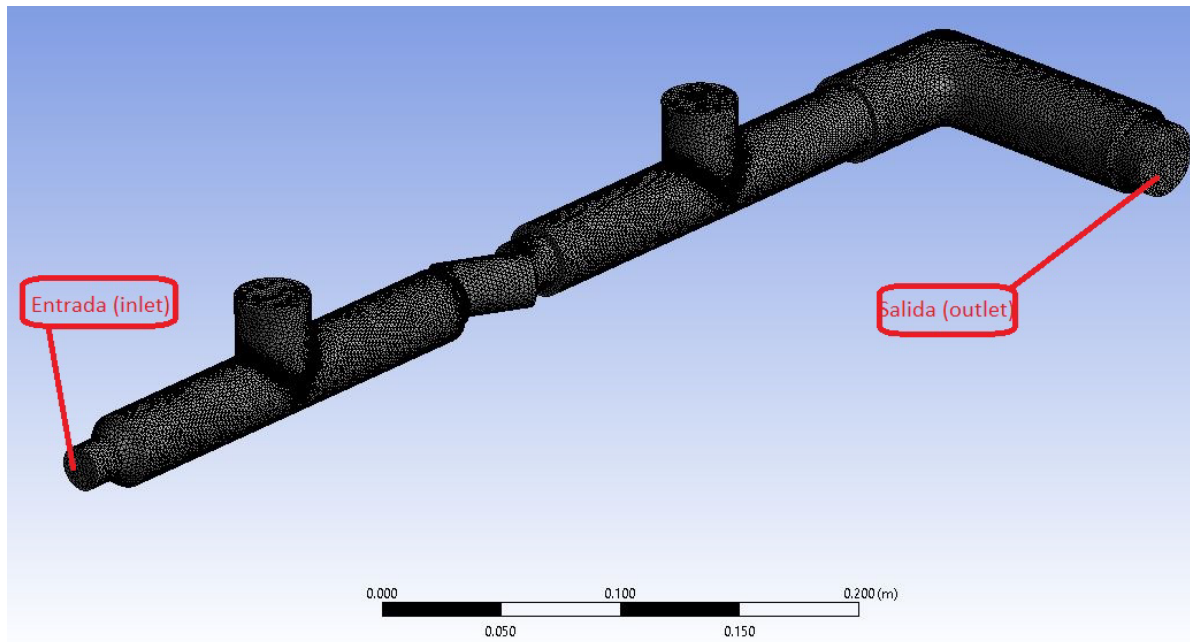


Figura 4-18 Mallado ensamblaje

Luego se pasa al módulo de fluent llamado “Setup” en donde se definen los parámetros del problema. Este módulo ofrece la posibilidad de escoger el tipo de flujo: estable o transiente. A la vez permite escoger entre 11 tipos de modelo de fluido, donde destaca el modelo “Viscous”, el que permite estudiar con mayor precisión la distribución y comportamiento de un flujo que viaja dentro de una cavidad, esto gracias a las distintas alternativas que ofrece el módulo para abordar cada problema.

En esta oportunidad se trabajará bajo el modelo de viscosidad, para tener en cuenta los efectos que la turbulencia tiene en el ensamblaje. Específicamente se utilizará en modelo k-epsilon 2, en el cual se relacionan dos variables de transporte para representar las propiedades turbulentas del flujo, estas son la energía cinética turbulenta y la disipación turbulenta. Esta selección se puede apreciar en la Figura 4-19.

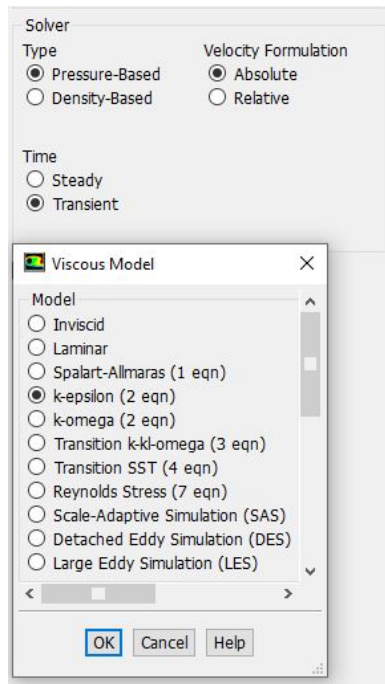


Figura 4-19 Selección de las propiedades turbulentas.

Después es necesario especificar el fluido con el que se está trabajando, en el menú de materiales de Ansys, el cual en este caso corresponde a agua (h2o<l>).

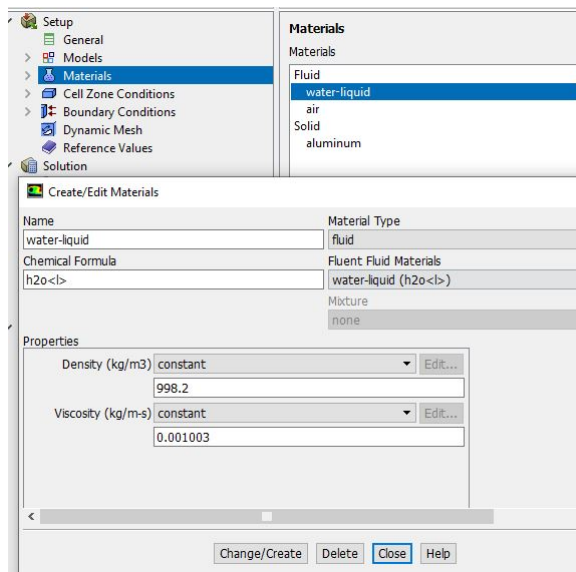


Figura 4-20 Selección del material fluido.

Una de las partes más importantes, corresponde a la cual se definen las condiciones de borde (boundary conditions), dependiendo del tipo parámetro, donde destacan principalmente: velocidad de entrada, presión de entrada, presión de salida, flujo de entrada y flujo de salida, entre otras. Dentro de las condiciones utilizadas se encuentran la velocidad y presión inicial, ambas correspondientes en la cara llamada “inlet”. Para el caso de la salida (outlet), se optará por la

condición “outflow” la cual corresponde a una condición de borde en la cual no se conoce la presión o la velocidad antes de iniciar la simulación.

Cabe recalcar que la velocidad de entrada será calculada a partir del caudal de salida y el área de entrada del ensamblaje, las que para esta medición corresponden a $34,7982 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$ y $2,85 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, dando una velocidad de $2,0348 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Por otro lado, la presión inicial será 0 PaG, ya que el agua se encuentra en un repositorio abierto a la atmosfera.

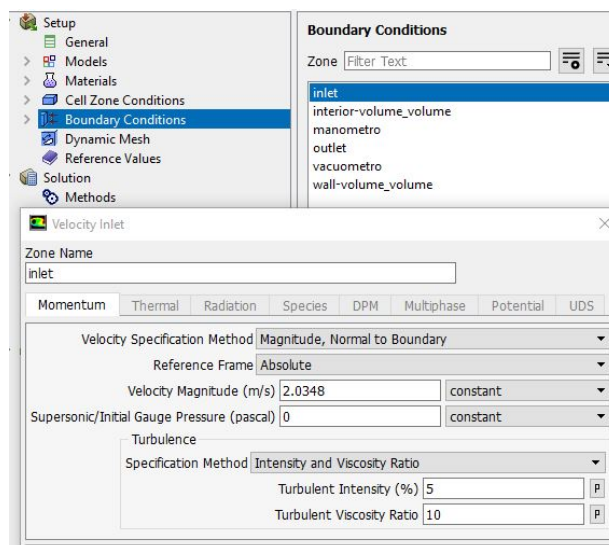


Figura 4-21 Condiciones iniciales de la entrada.

Luego de esto es necesario seleccionar cual será el algoritmo de resolución que utilizará ANSYS para la resolución del problema, esto en la ventana “Methods”. En este caso se utilizará el método PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), el cual es el recomendado cuando los problemas son del tipo transiente.

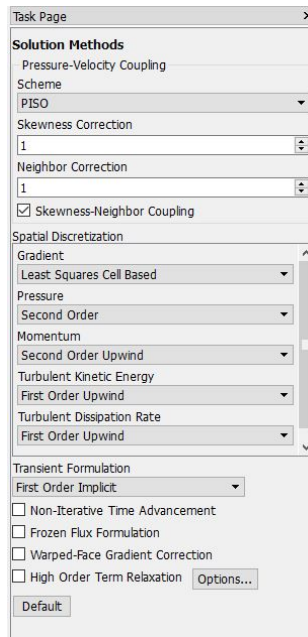


Figura 4-22 Selección del método.

Posteriormente es necesario escoger el modo de inicialización de la solución, en la ventana “Solution Initialization”, donde se puede observar dos opciones, como se observa en la Figura 4-23; y que son explicados a continuación:

- a) **Hybrid Initialization:** Corresponde a un conjunto de diversos métodos de interpolación donde las variables como temperatura, turbulencia, fracciones de volumen, entre otras, son calculados automáticamente según los valores promediados del dominio o a partir de un método de interpolación en específico.
- b) **Standard Initialization;** Esta opción permite definir valores de referencia para las variables del flujo y resolver las iteraciones utilizando estos valores como valores iniciales.

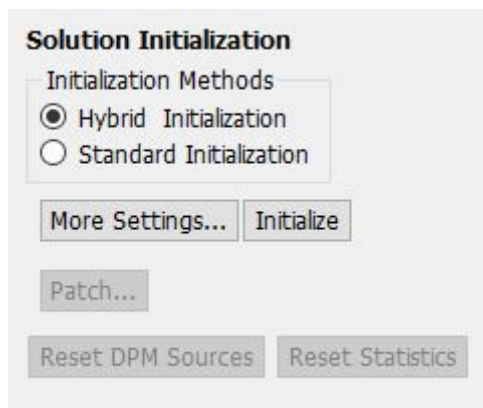


Figura 4-23 Tipos de inicialización.

En este caso como no se conocen todas las propiedades requeridas por la inicialización estándar, es necesario optar por la Hybrid initialization.

Finalmente es necesario definir el paso de tiempo “timestep”, el número máximo por paso de tiempo “Máx iteration / Time Step” y el avance entre cada paso de tiempo “Time Step Size” donde en esta oportunidad se utilizarán los valores 0,2, 10 y 50. Dando los siguientes resultados.

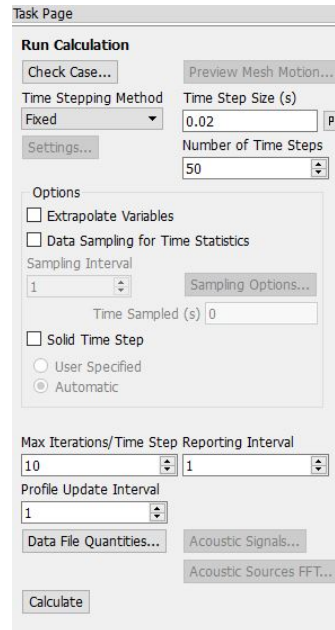


Figura 4-24 Ventana de inicio de cálculos.

De esta forma se obtienen los resultados, como se aprecia en la Figura 4-25, a la vez, se observa el gráfico de valores residuales que presenta esta simulación:

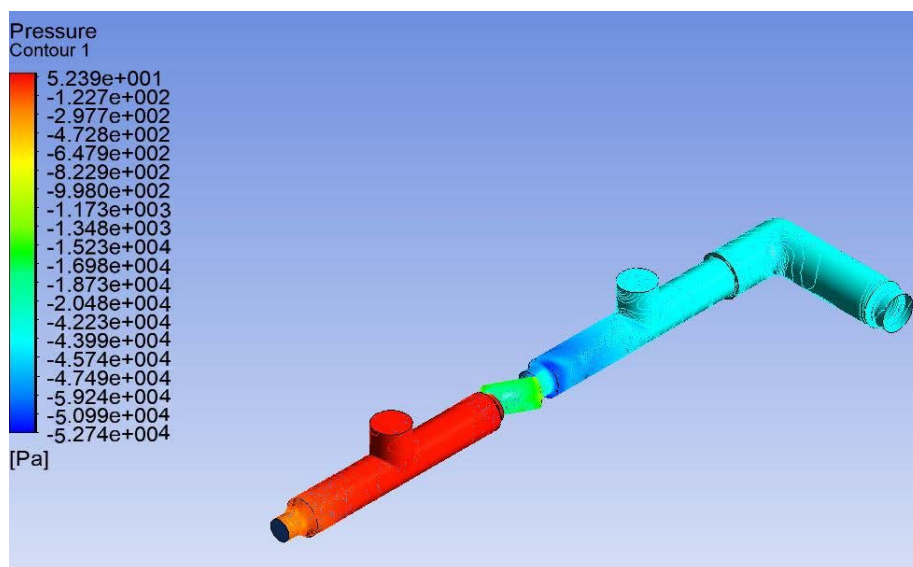


Figura 4-25 Simulación ensamble medición 3.

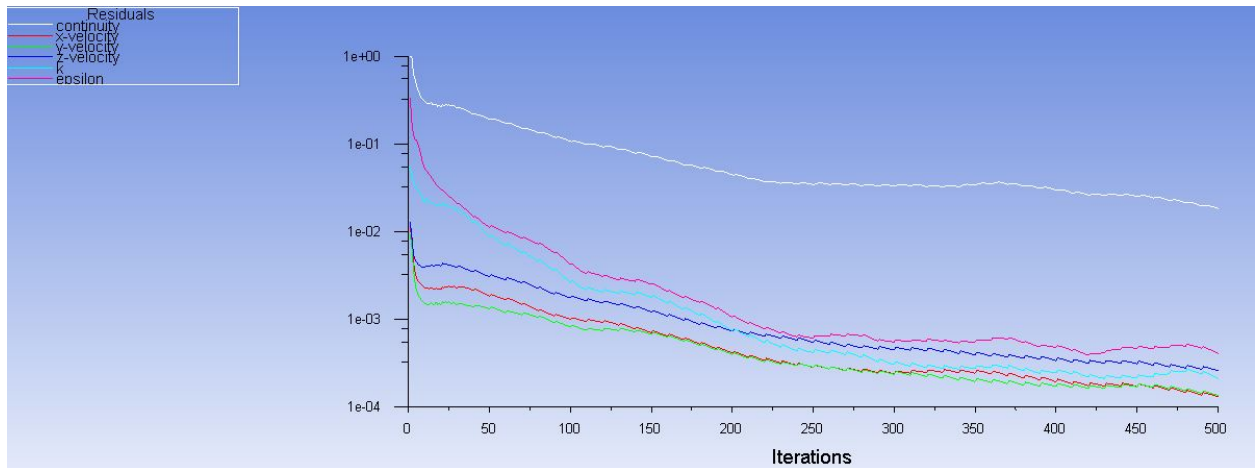


Figura 4-26 Gráfico de valores residuales

Como se aprecia la presión tiene una notoria disminución, la cual de acuerdo a la simbología en la plaza donde se ubica el medidor de vacío alcanza los $-47490 Pa$, lo que equivale a $-0,4749 bar$, un valor muy cercano a lo medido en la medición 3.

En la Figura 4-26 se puede observar que el valor residual de la simulación se encuentra en un valor muy bajo, del orden de 7×10^{-1} , por lo que los resultados son aceptables.

A continuación, en la Tabla 6, se presenta una tabla en la que se exponen los resultados de diversas simulaciones del mismo ensamblaje, en las cuales se variaron los métodos del mallado y el número de elementos de este, para observar los cambios en los resultados. Cabe recalcar que los resultados de la Figura 4-25 se obtuvieron con 479766 elementos:

Número de elementos	Presión en el vacuómetro (barG)
387562	-0,4678
430154	-0,4698
445235	-0,4723
479766	-0,4749
684321	-0,4750
756812	-0,4751

Tabla 6 Sensibilidad de la tabla.

Como se observa, los resultados tienen una mínima variación, por lo que se aceptarán los resultados obtenidos.

De la misma forma que se obtuvieron los resultados anteriormente, se obtuvieron los resultados de las otras mediciones; a la vez se encontrarán los resultados de las presiones obtenidas de forma

experimental y la variación que existe entre ambos. los que se pueden apreciar resumidos en la Tabla 7.

Medición	Porcentaje de apertura de la válvula %	Presión en el vacuómetro de la simulación (barG)	Presión medida experimentalmente (barG)	Variación entre resultados %
1	100%	0,43	0,5	14%
2	75%	-0,3875	-0,4	3.125%
3	50%	-0,4749	-0,5	5.02%
4	30%	-0,7864	-0,8	1.7%
5	25%	-0,5523	-0,6	7.95%

Tabla 7 Resultados de todas las mediciones.

Para saber si existe cavitación es necesario hacer la simulación del fluido cuando este entra en contacto con el rodete. Para esto, al igual que con el ensamblaje, es necesario hacer el modelo CAD de la bomba.

De acuerdo a los datos y planos recopilados de la empresa fabricante de la bomba, con ayuda del soporte técnico que se encuentra en la página oficial de ésta, es posible obtener el modelo 3-D de la bomba en formato CAD, el cual corresponde al representado en la Figura 4-27.

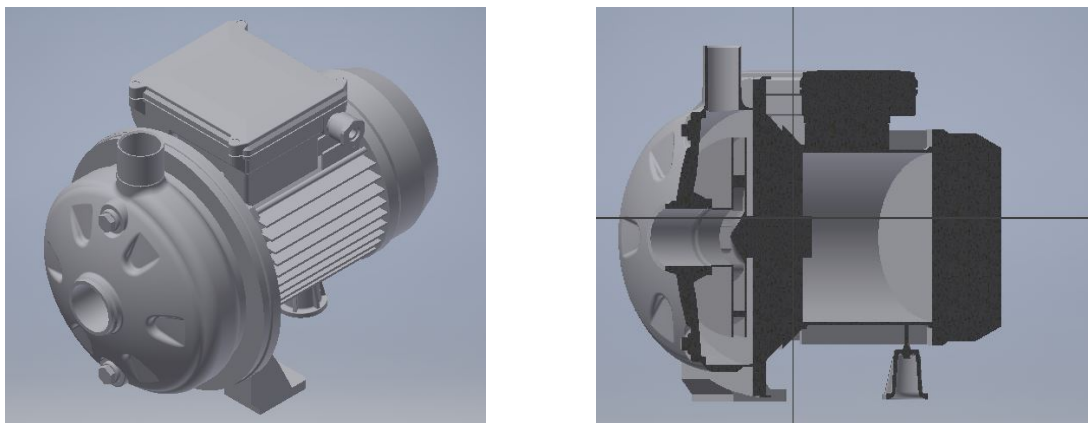


Figura 4-27 Formato CAD bomba.

Como se puede apreciar el ensamblaje de la bomba viene con el rodete cerrado de 5 aspas , el cual corresponde al de la Figura 4-28. Este elemento, junto al entorno de éste, es fundamental al análisis que se llevará a cabo en ANSYS.

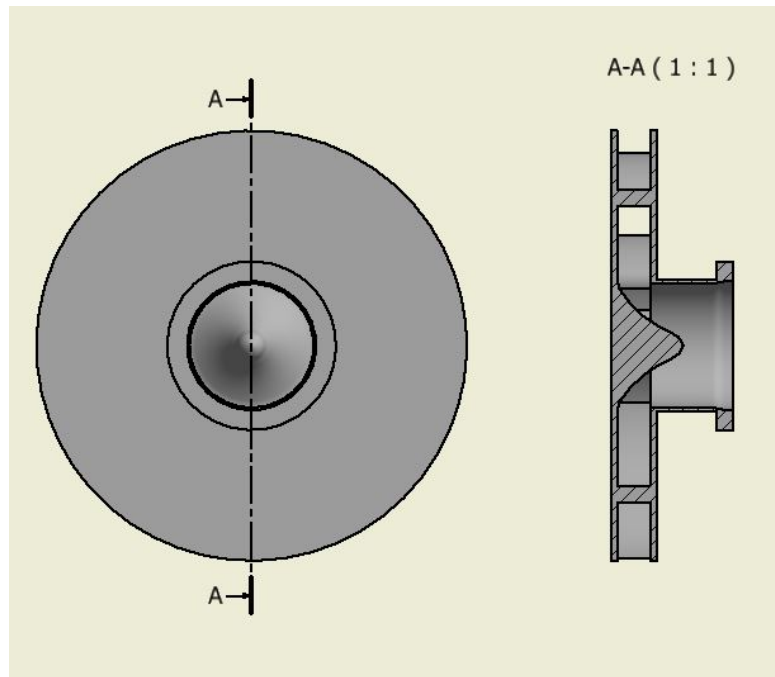


Figura 4-28 Rodete bomba Ebara.

Al igual que los pasos seguidos para el desarrollo del ensamblaje de la Figura 4-15, este procedimiento es similar, primero es necesario capturar el volumen encerrado en la carcasa de la bomba con la herramienta “Volume extract”, donde quedará el rodete con el interior de la carcasa, la que pasará a ser el dominio de la simulación. Cabe recalcar que, en este caso, se distinguirán dos elementos, el volumen del dominio y el rodete “sólido”; por lo que es necesario extraer este último, dejando su negativo en el dominio, debido a que en este caso sólo interesa estudiar el comportamiento del fluido, esto a través de la operación “Boolean” que trae el editor CAD “Design Modeller” incluido en fluent, como se observa en la Figura 4-29.

Posteriormente viene el mallado, el cual estará compuesto de un mallado automático y un mallado más refinado en la zona donde se extrajo el rodete, para obtener resultados más precisos en esta área, tal como se observa en la Figura 4-30.

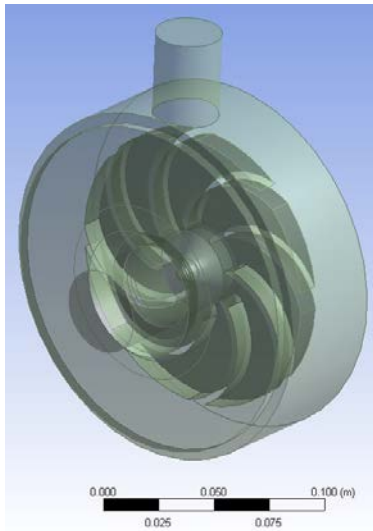


Figura 4-29 Dominio del rodete.

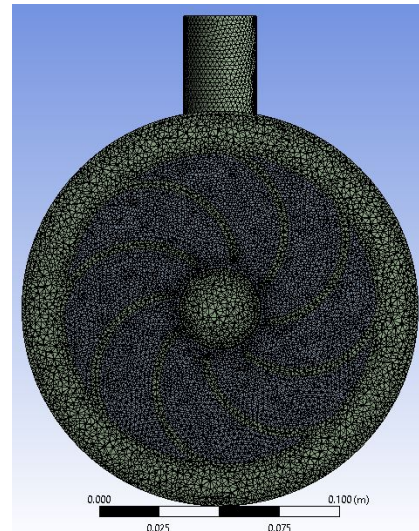


Figura 4-30 Mallado del dominio

Siguiendo los mismos pasos del caso del ensamblaje, e introduciendo los nuevos valores de velocidad y presión, que en este caso serán para la medición 3 (50% abierta), es posible iniciar la simulación, pero en este caso además es necesario agregar el parámetro de la rotación del volumen alrededor del rodete extraído, tal como se observa en la Figura 4-30. Como se trata de la medición 3, las revoluciones por minuto que corresponden en este caso son 2843. Este parámetro se agrega en la ventana “Cell zone Condition”, donde a la vez es necesario introducir el centro de rotación del rodete y el sentido de giro, siendo estos 0.0185 (m) y Z=-1 respectivamente.

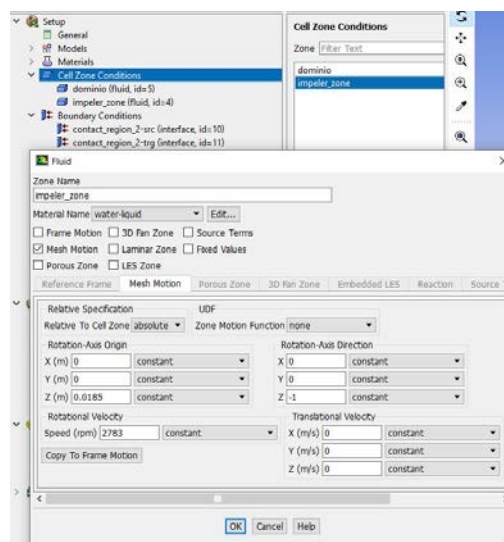


Figura 4-31 Parámetros de rotación.

Cabe recalcar que en este caso la velocidad de entrada será en función del caudal y el área de entrada a la bomba, los cuales son $34,7982 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$ y $7,9173 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ para un diámetro de 1,25

pulgadas respectivamente. De esta forma los valores de entrada de la fluido corresponden a $0,7325 \frac{m}{s}$ y $-0,4749 \text{ bar}$ respectivamente.

A la vez en esta simulación se cambiarán los parámetros de cálculo de la simulación, donde se reducirá el tamaño del paso de tiempo, donde se escogerá uno muy pequeño, igual a 0,0003 (s), se incrementará el número de pasos de tiempo y el número máximo de iteraciones por paso de tiempo, siendo estos 500 y 20 respectivamente, lo que dará origen a 10000 iteraciones.

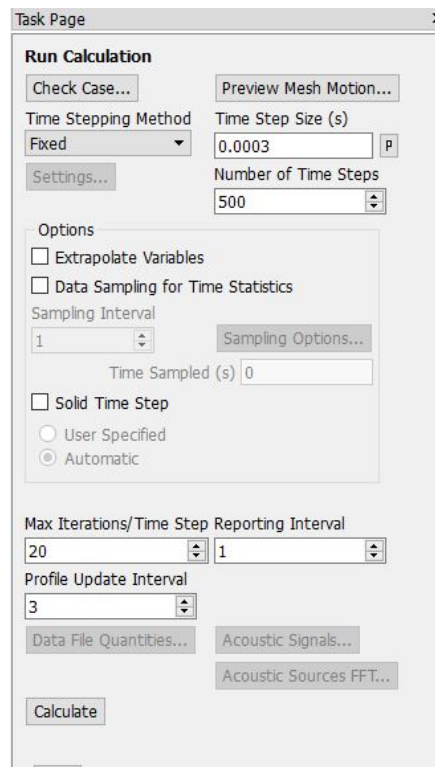


Figura 4-32 Parámetros de simulación.

De este modo se obtienen los resultados presentes en la Figura 4-33, en donde se puede apreciar que la presión aumenta considerablemente entre la salida de la válvula y la entrada del rodete. De esta forma; si la presión del líquido es menor o igual a la presión de vapor a la temperatura del agua (alrededor de 20°C), el vapor producido por la baja presión que se produce en la válvula, pasa al rodete donde la alta presión hace que el vapor se comprima, por efecto de la presión de descarga; provocando así violentas implosiones en los álabes del rodete dando origen a la cavitación.

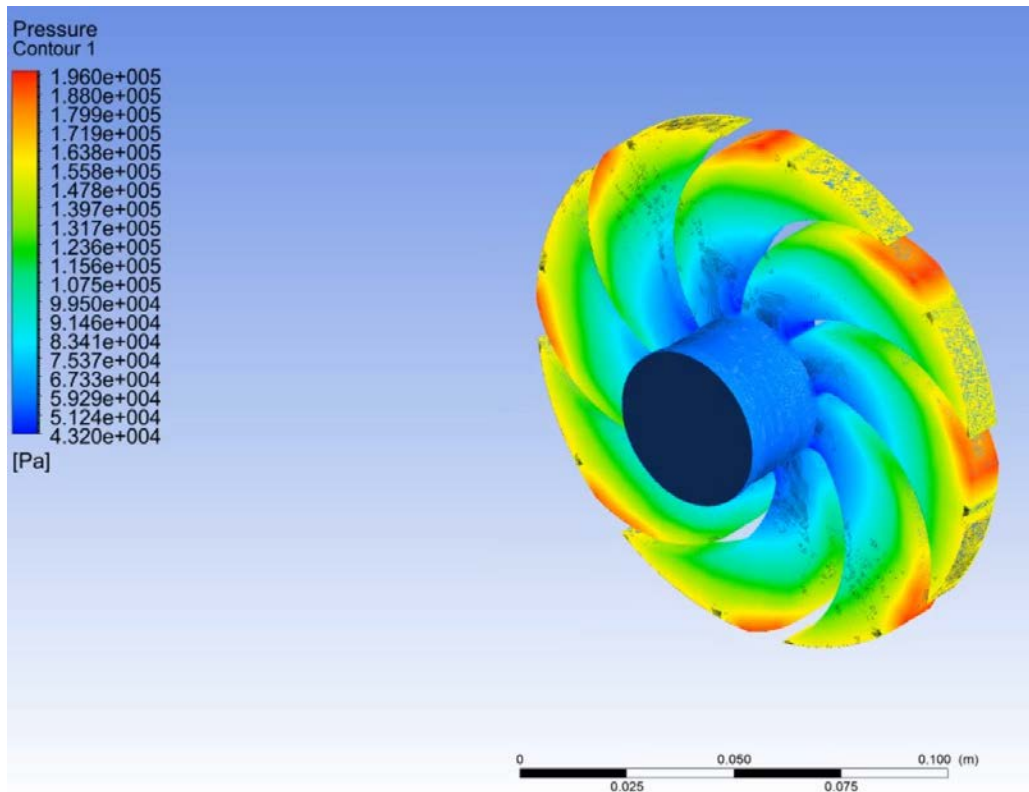


Figura 4-33 Rodete simulación 3

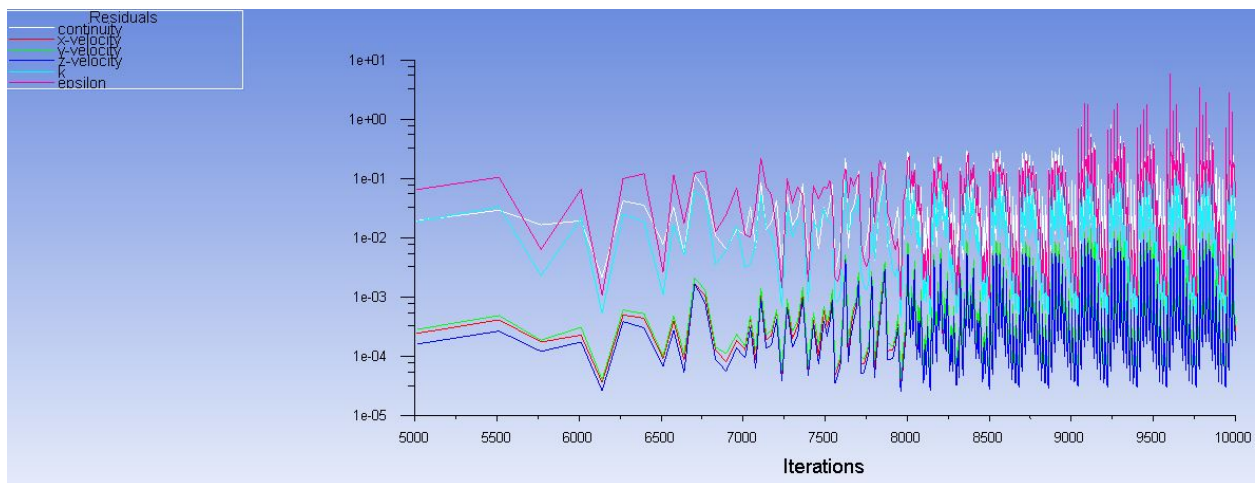


Figura 4-34 Valore residuales simulación 3.

De la misma forma en que se obtuvieron los resultados de la medición 3, se obtienen los resultados de las demás mediciones; siendo estas las mostradas en la Tabla 8. Cabe destacar que estos resultados corresponden a las simulaciones, de cada medición, con un mejor valor residual.

Medición	% de apertura de la válvula	Presión de entrada al rodete (Pa abs)	Presión de vapor a 20°C (Pa abs)	Presencia de cavitación	Resultados simulación
1	100	171065	2339,21	No	Figura 4-35
2	75	153265	2339,21	No	Figura 4-37
3	50	144525	2339,21	No	Figura 4-33
4	30	-22175	2339,21	Si	Figura 4-39
5	25	-45775	2339,21	Si	Figura 4-41

Tabla 8 Resultado simulaciones.

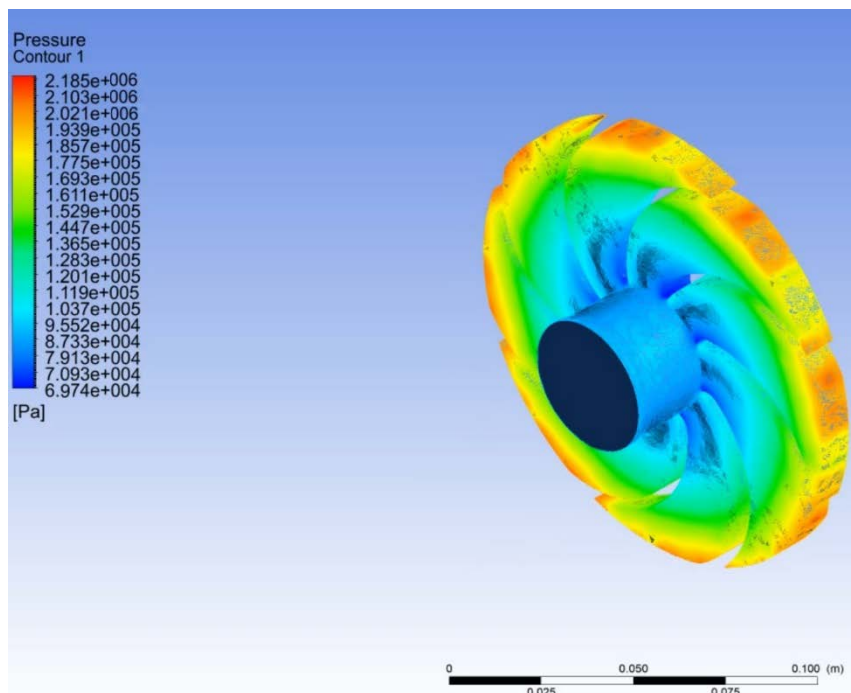


Figura 4-35 Rodete simulación 1

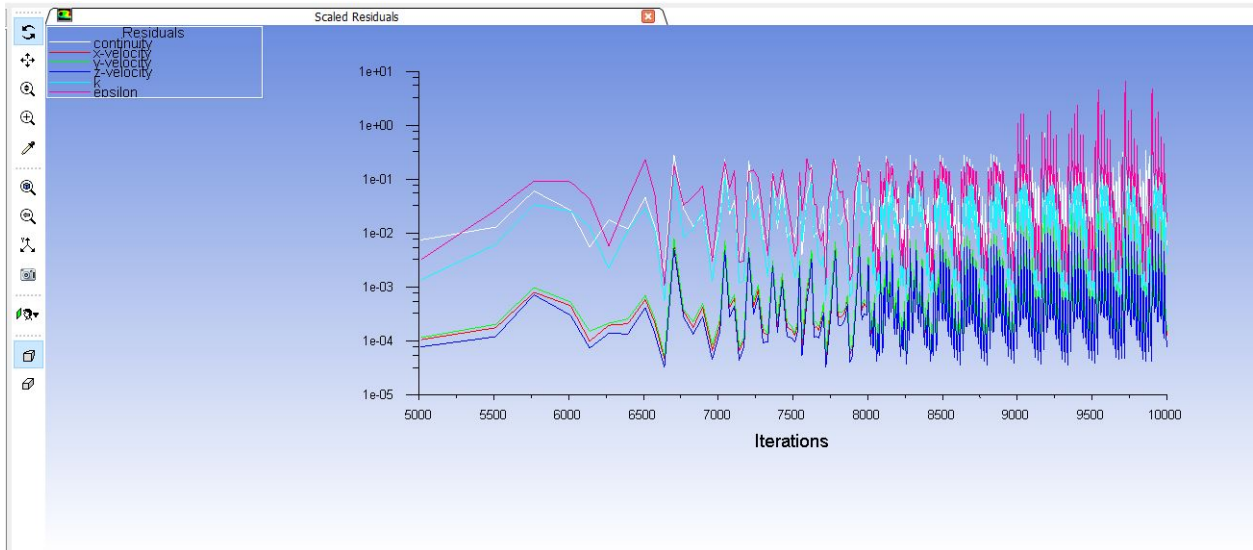


Figura 4-36 Valores residuales simulación 1.

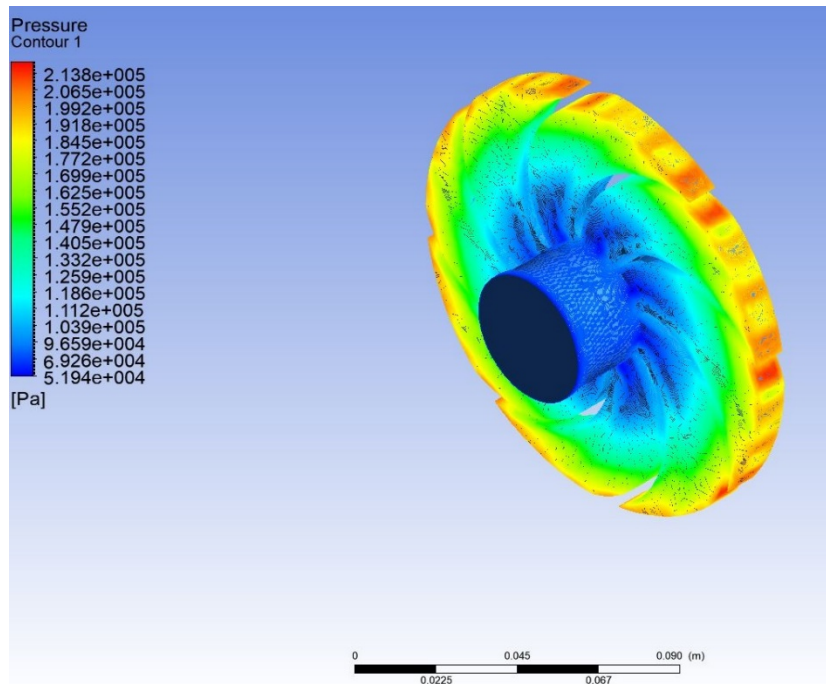


Figura 4-37 Rodete simulación 2

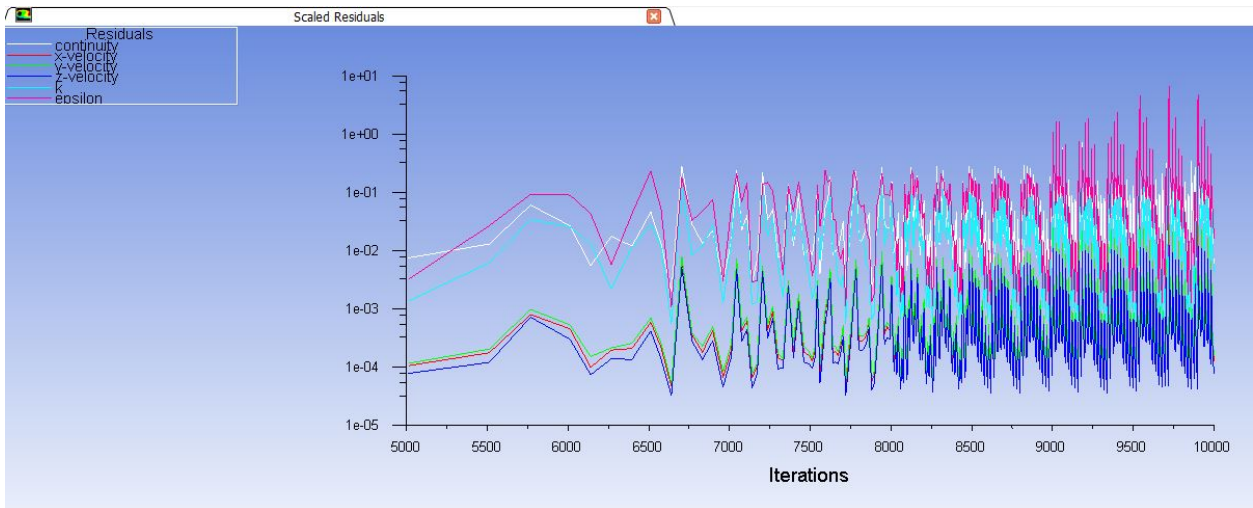


Figura 4-38 Valores residuales simulación 2.

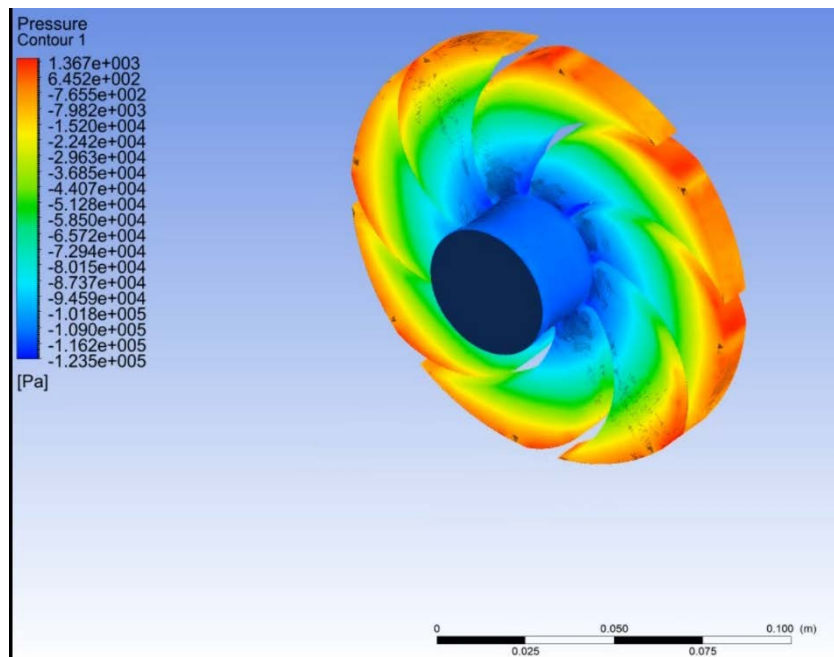


Figura 4-39 Rodete simulación 4.

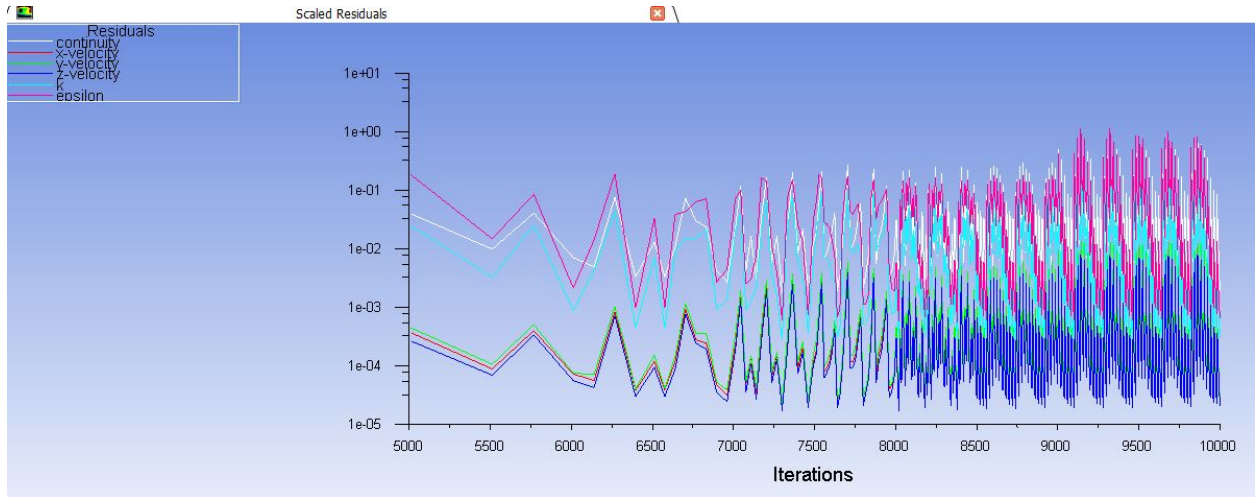


Figura 4-40 Valores residuales simulación 4.

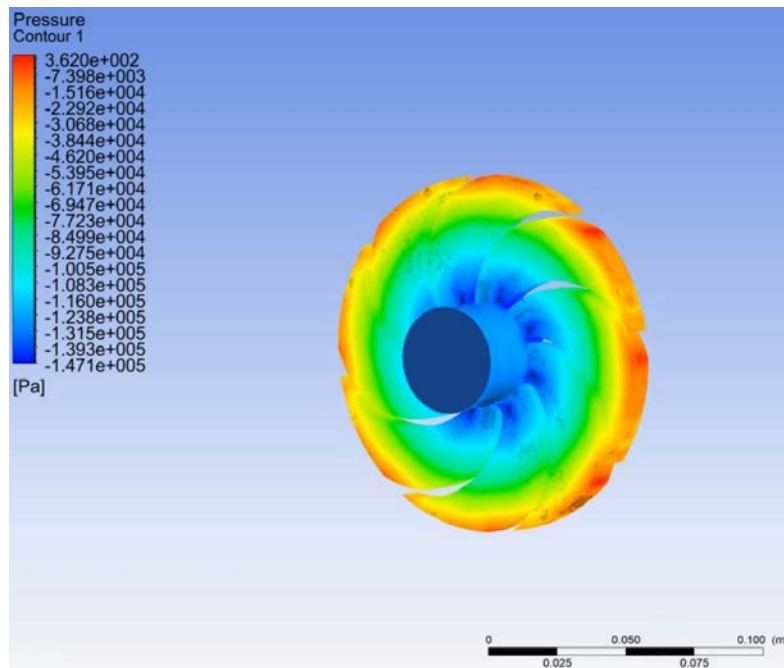


Figura 4-41 Rodete simulación 5

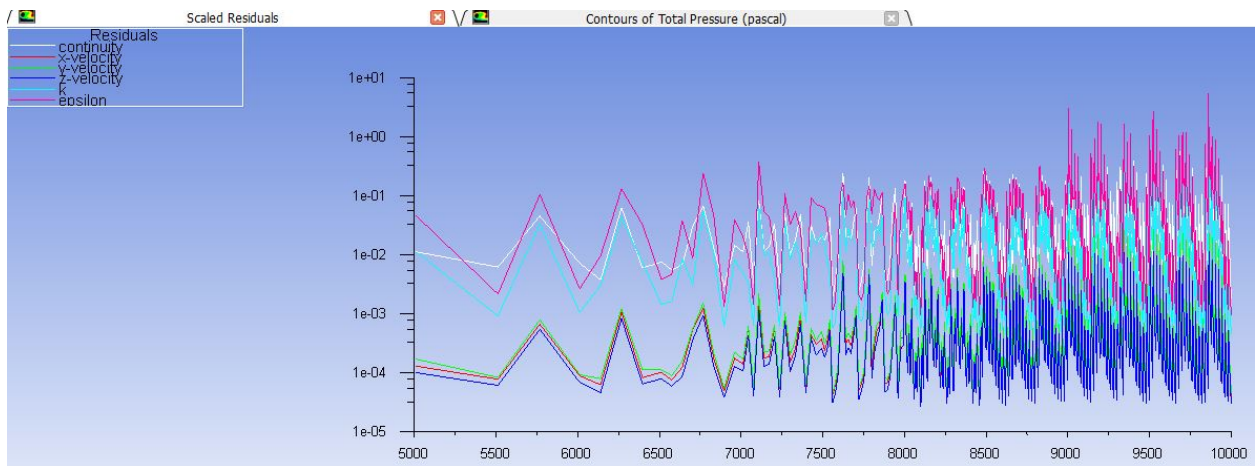


Figura 4-42 Valores residuales simulación 5

Como es posible observar en las imágenes de la simulación de los rodetes, existe un notorio patrón que coincide con la lógica y la realidad, esta es la presión máxima que se alcanza en cada simulación, esto por efecto de la disminución de la caída del caudal que ingresa en cada simulación y la cantidad de vacío que se forma en el rodete.

Analizando los resultados de cada imagen, se observa que la presión del fluido aumenta a la vez que se aleja del centro del rodete, tal como dice la teoría, llegando hasta el borde de los álabes donde alcanza la presión máxima (valores en color rojo) en cada simulación.

A la vez, se aprecia que en las simulaciones 4 y 5 presiones de vacío, esto debido al fenómeno del Stall, ya que en ellas el fluido no llena por completo el rodete.

Capítulo 5: Conclusiones:

Una vez finalizado este estudio de cavitación, es posible afirmar que:

1) Respecto a los objetivos:

- a) Se han podido cumplir todos los objetivos propuestos al inicio de esta habilitación profesional, siendo el cuarto objetivo específico el más difícil de lograr dado al desconocimiento físico y real del comportamiento de la presión dentro del rodete cuando este funciona bajo distintos niveles cavitación.
- b) Respecto al segundo objetivo específico hay que recalcar que el análisis de vibraciones es una herramienta muy eficaz al momento de no solo diagnosticar la presencia de cavitación, sino que de una amplia gama de fenómenos relacionados a las máquinas rotatorias. Cabe decir a la vez que este método requiere equipamiento con un gran valor económico, por lo que las técnicas CFD toma una gran ventaja cuando se trata de fluidos.

2) Respecto a los resultados obtenidos:

- a) Al momento de analizar los resultados obtenidos en la Tabla 7 se puede observar que existe una variación, mínima, en los resultados obtenidos en las simulaciones y los resultados medidos. Esto puede ser un reflejo de que no se utilizó un instrumento adecuado, o con una graduación más exacta, al momento de medir la presión real, o bien puede ser efecto de que no se utilizó un valor de referencia inicial, de la presión, al momento de iniciar las simulaciones.

Comentando esto último es necesario mencionar que no se utilizó un valor inicial de referencia de la presión de salida debido a que con este estudio se pretende validar las técnicas CFD de manera simultánea a una situación real, tratando de que existiesen la menor interferencia de estos entre sí.

- b) Analizando los resultados de la Tabla 8 se puede apreciar que, si bien existieron pequeñas variaciones de presión expuestas en el punto anterior, no se pudo llegar a los resultados congruentes con los medidos, esto ya que sólo las mediciones 4 y 5 dieron resultados correctos para cavitación..

A la vez se aprecia que en la Figura 4-39 y Figura 4-41 se observan presiones de vacío en el rodete, esto es debido a que con ese nivel de apertura de la válvula, 30 y 25% respectivamente, el caudal que llega al rodete es tan poco que no alcanza a llenar el dominio

de la simulación, por lo que se formarían cavidades en las que el impulsor giraría libre (sin presencia de fluido) dándose así el fenómeno de hambruna de la bomba (Stall). Esto último coincide con la realidad, ya que en estas mediciones se observaban grandes burbujas en la manguera de salida de la bomba, impidiéndose así la expulsión continua del agua.

- c) Observando las presiones de las imágenes del rodete se puede apreciar un orden lógico de estas, ya que, al tener menores pérdidas de carga presentes en la bomba, esta alcanza una mayor presión máxima, por lo que la simulación con una mayor presión alcanzada debería ser la 1 y la con menor presión máxima debería corresponder a la simulación 5, lo que coincide con los resultados obtenidos.
- d) Cabe recalcar que se podrían obtener resultados más precisos utilizando instrumentos más especializados, pero que tienen un mayor valor económico, como por ejemplo utilizando hidrómetros, manómetros digitales o en su defecto sensores de presión ubicados antes y después de la válvula.

3) Respecto al desarrollo de la habilitación:

Al término de este estudio es posible decir que las técnicas CFD poseen un notorio amplio campo de aplicaciones que no sólo se apegan a la industria, donde son enfocados más comúnmente este tipo de softwares, sino que posee una gran ventaja al momento de ejemplificar visualmente un fenómeno físico, tal como la cavitación, o el simple hecho de como varía la presión, velocidad, temperatura, etc, de un fluido al pasar por distintos escenarios, por lo que posee un gran potencial en el ámbito educacional y de investigación.

Al término de esta habilitación surgen varias líneas de investigación, o ampliación de esta misma que no fueron efectuadas en esta oportunidad, debido a la falta de recursos computacionales, la falta de conocimiento del software o el desenfoque que se produce del tema principal, como por ejemplo la creación de una simulación visual de la cavitación a través de una simulación multifásica, o los efectos de la cavitación en el impulsor de la bomba.

Bibliografía y Linkografía:

- Munson, B., Young, D. and Okiishi, T. (2004). *Fundamentos de mecánica de fluidos*. 14th ed. México: Limusa.
- Balcazar, F. (2013). *Análisis de las variables de la cavitación en bombas centrífugas horizontales*. Ingeniero Mecánico. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Sanchez, R. Apuntes de “Mecánica de Fluidos”.
- C. Hirsch Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. ButterworthHeinemann. 2007
- EBARA. (2018). *Catálogo CDX(L)*. Recuperado de [https://www.centrifugal-pump-online.com/Ebara_CDX\(L\)_50HZ.pdf](https://www.centrifugal-pump-online.com/Ebara_CDX(L)_50HZ.pdf)
- https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.2/en-us/help/ai_sinfo/ai_sinfo.html
- Coussirat, Miguel. (2011). CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE CAVITACIÓN MEDIANTE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS PARA POSTERIORES APLICACIONES AL ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DAÑO POR CAVITACIÓN. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*
- Saavedra, P. Apuntes de “Análisis de Sistemas Dinámicos”.