



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**OBTENCIÓN DE CURVAS DE CARGA Y RENDIMIENTO DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS INDUSTRIALES RESTAURADAS APLICANDO INGENIERÍA
INVERSA.**

Autor:

Figuroa Rincón Alexander Andrés

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA

**OBTENCIÓN DE CURVAS DE CARGA Y RENDIMIENTO DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS INDUSTRIALES RESTAURADAS APLICANDO INGENIERÍA
INVERSA.**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autor:

Figueroa Rincón Alexander Andrés

Tutor(a):

Ing. Yndira Rodríguez Aguirre

San Diego, julio de 2023



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

ACTA DE APROBACIÓN

INFORME FINAL DE PASANTÍA

TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado: Obtención de curva de carga y Rendimiento de Bombas centrífugas Industriales restauradas aplicando Ingeniería inversa

Realizado por el (la) Br. Alexander Figueroa


C.I. N° 28.488.382 cursante de la carrera de Meccánica


hace constar después de analizar su contenido y oída la exposición oral, considera que el Informe Final o Trabajo de Grado ha obtenido la calificación de:


APROBADO

NO APROBADO

El Jurado


Tutor Académico (Coordinador)
Nombre: Andrea Rodríguez
C.I.: 1547002


Jurado
Nombre: LISSETTE A. HORNEBO A.
C.I.: 7.139.471


Jurado
Nombre: FREDY BARILAGAN
C.I.: 11.151.628

Fecha: 25/07/23







REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CONSTANCIA DE APROBACIÓN PARA LA PRESENTACIÓN
PÚBLICA DEL TRABAJO DE GRADO

Quien suscribe, ING. YNDIRA RODRÍGUEZ AGUIRRE, portador de la cédula de identidad N° 11.547.002, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano ALEXANDER FIGUEROA, portador de la cédula de identidad N° 28.88.382, titulado **“Obtención de curvas de carga y rendimiento de bombas centrífugas industriales restauradas aplicando ingeniería inversa”**, presentado como requisito parcial para optar al título de INGENIERO MECÁNICO, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 16 días del mes de junio del año dos mil veintitrés.

Ing. Yndira Rodríguez Aguirre
C.I.: 11.547.002



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

FIN 007 2022-3CR TG

Valencia, 14 de abril de 2023

Ciudadano:
FIGUEROA RINCÓN, ALEXANDER ANDRÉS
28.488.382
Presente -

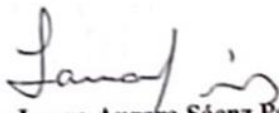
Cumplo con informarle que la comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 02-2023 de fecha 08/02/2023 aprobó el proyecto de grado titulado:

Obtención de curvas de carga y rendimiento de bombas centrífugas industriales restauradas aplicando ingeniería inversa.

Presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Tutor Académico que lo asesorará en el desarrollo de este proyecto a:
Dra. Yndira Deyanira Rodríguez Aguirre, titular de la cédula de identidad V-11.547.002

Atentamente


Dra. Laura Aurora Sáenz Palencia
Decana de la Facultad de Ingeniería



c.e. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería

DEDICATORIA

Hoy, en la recta final de mi carrera universitaria, quiero dedicar esta tesis de fin de grado a la persona que fui hace cuatro años. Quiero mostrarle que las metas que parecían inalcanzables en ese momento, sí se pueden lograr con perseverancia, disciplina y dedicación.

Recuerdo con claridad los sueños y ambiciones que tenía en ese entonces. Tenía miedo de enfrentarme a los desafíos que la universidad presentaría y dudaba de la capacidad para sobresalir en un campo tan exigente como la Ingeniería Mecánica. Pero aquí estoy, sin ninguna duda de haber superado mis propias expectativas.

Durante estos años he enfrentado desafíos académicos y personales, y he aprendido a convertir los obstáculos en oportunidades de crecimiento. He trabajado incansablemente, he invertido horas interminables de estudio y he sacrificado momentos de diversión y descanso para lograr las metas que en su momento me propuse. Ahora que empiezo a ver los resultados puedo decir que ha valido la pena.

Pero más allá de este logro académico, quiero destacar la transformación que he experimentado como persona. Esa persona se ha convertido en alguien más seguro, más resiliente y más consciente de su propio potencial. Ha aprendido a creer en sí mismo y en sus habilidades, y a pesar de que este final es solo el comienzo de un camino lleno de posibilidades infinitas, hay que celebrarlo y agradecer a Dios que se hizo posible.

Alexander, este trabajo de fin de grado es un tributo a tu dedicación, tenacidad y fe en tí mismo. Sigue persiguiendo tus sueños con pasión y determinación, porque sé que hay un futuro brillante esperándote.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, quiero agradecer a Dios por permitirme estudiar esta hermosa carrera y por poner en mi vida a quienes me inspiraron y me apoyaron día a día para alcanzar esta meta.

Por todo su apoyo a lo largo de estos años, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis futuros colegas, Cesar Gómez, Danilo Moreira, Darwin Flores, Dylan Rosales, Francesco Napolitano, Ismael Ayaro, Jefferson Méndez, José Amaro, José Brito, María Paola Díaz, Sahira Nazar, Samuel Lovera y Víctor López, con quienes he compartido risas, desafíos y triunfos. Su colaboración, motivación y disposición para ayudarme en momentos difíciles han sido invaluable.

A mi mamá, Belkis Rincón, a mi hermana, Alexandra Figueroa, a mi papá, Alexander Figueroa, y a Sai Roach les quiero agradecer por su amor, apoyo y sacrificio incondicional. Desde el principio, han creído en mí y me han animado a perseguir mis metas. Han estado a mi lado en los momentos de celebración y en los momentos más arduos, brindándome aliento y palabras de sabiduría. Su confianza inquebrantable en mí ha sido mi mayor motivación y fortaleza.

Cada uno de ellos ha contribuido de manera única a mi crecimiento personal y profesional, y no puedo expresar con palabras lo agradecido que estoy por eso. Con todo mi corazón, les agradezco por ser parte de mi viaje y por ayudarme a alcanzar mis metas. Su influencia y apoyo han sido fundamentales en mi éxito, y espero poder devolverles de alguna manera todo lo que han hecho por mí.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	pp.
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.3 Objetivos de la Investigación.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Alcance y limitaciones	5

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación.....	8
2.2. Teoría Central de la investigación.....	9
2.3 Bases teóricas.....	9
2.3.1. Conceptos básicos de la hidráulica.....	9
2.3.1.1. Densidad y peso específico.....	10
2.3.1.2. Ley de la viscosidad de Newton.....	11
2.3.1.3. Presión y sus propiedades.....	12
2.3.1.4. Caudal.....	13
2.3.2. Hidráulica de Turbomáquinas.....	13
2.3.2.1. Ecuación de conservación de la energía aplicada a Turbomáquinas Hidráulicas (Ecuación de Bernoulli).....	13
2.3.2.2. Aplicación global a sistemas de bombeo.....	15
2.3.3. Parámetros fundamentales de un sistema de bombeo.....	17

2.3.3.1	Altura manométrica total y cálculo en la etapa de diseño.....	20
2.3.3.2	Altura manométrica total y cálculo en la etapa de operación.....	20
2.3.4.	Curva característica de la bomba.....	21
2.3.4.1.	Gráfico de la curva del sistema.....	21
2.3.4.2.	Obtención de la curva característica del sistema.....	22
2.3.4.3.	Curva de potencia consumida por la bomba.....	24
2.3.4.4.	Cálculo de la potencia consumida por la bomba. Potencia hidráulica.....	24
2.3.4.5.	Potencia consumida por la bomba o potencia de accionamiento.....	25
2.3.4.6.	Rendimiento.....	25
2.3.4.7.	Curva de rendimiento.....	25
2.3.4.8.	Curvas de Iso-rendimiento.....	26
2.3.4.9.	Curva NPSH (Altura de aspiración neta positiva).....	27
2.3.4.10.	Consideraciones finales.....	27
2.3.5.	Bomba centrífuga y sus partes.....	29
2.3.5.1	Tipos de Bombas Centrífugas.....	32
2.3.5.2	Impulsores y sus tipos.....	32
2.3.6	Ingeniería inversa.....	36
2.4	Bases Legales.....	37
2.5	Definición de Términos.....	37

III MARCO METODOLÓGICO

3.1.	Enfoque de la Investigación.....	40
3.2.	Tipo de Investigación.....	40
3.3.	Diseño de la Investigación.....	41
3.4.	Nivel de la Investigación.....	41
3.5.	Población y Muestra.....	42
3.6.	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	42
3.7.	Técnicas de Análisis de resultados.....	44
3.8.	Fases Metodológicas.....	44

3.9. Viabilidad de la investigación.....	43
IV RESULTADOS	
4.1 Diagnóstico de la situación actual de la aplicación de la ingeniería inversa para talleres de reparación de bombas centrífugas industriales.....	46
4.1.1. Aplicación de entrevista estructurada a especialista.....	46
4.1.2. Matriz FODA.....	48
4.1.3. Pasos de la aplicación de la ingeniería inversa en el proceso de mantenimiento de bombas centrífugas industriales.....	48
4.2 Selección de diversos tipos de bombas centrífugas de acuerdo al fluido con el que trabaja e identificación de sus características geométricas.....	53
4.3 Simulación del campo de flujo de la bomba centrífuga seleccionada mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) con la finalidad de obtener el gráfico de las curvas de carga y rendimiento.....	57
4.4 Resultados y comparación del rendimiento original de las bombas centrífugas con el rendimiento obtenido mediante herramientas de CFD.....	67
4.5 Análisis de posibles causas de la diferencia entre los resultados obtenidos...	77
CONCLUSIONES.....	78
RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXOS.....	83
APÉNDICES.....	88

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PP.
1	Taller de equipos rotativos de TESTPUMP C.A. ubicado en Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.....	2
2	Desmontaje de bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.....	4
3	Clasificación de los fluidos.....	10
4	Sistemas de bombeo.....	15
5	Gráfico de la curva del sistema.....	22
6	Banco de pruebas de una bomba.....	23
7	Gráfico de la bomba para distintos rodetes.....	24
8	Curva de rendimiento de una bomba.....	26
9	Curva de Iso-rendimiento de una bomba.....	27
10	Curva de una bomba KSB Meganorm 80-250 - IV polos (1750 rpm) Q vs H	28
11	Curva de una bomba KSB Meganorm 80-250 - IV polos (1750 rpm) Q vs NPSH.....	28
12	Curva de una bomba KSB Meganorm 80-250 - IV polos (1750 rpm) Q vs P.....	29
13	Punto de trabajo de una bomba.....	29
14	Partes de una bomba centrífuga.....	31
15	Tipos de bombas centrífugas según el movimiento del fluido.....	32
16	Diagrama en corte de un impulsor cerrado.....	33
17	Impulsor abierto.	34
18	Impulsor semiabierto.....	35
19	Impulsor cerrado.....	36
20	Desmontaje de una bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.	49
21	Análisis de composición de una bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500	49
22	Medición de la carcasa de una bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.	50

23	Renderizado de una bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.....	51
24	HandySCAN 3D.....	52
25	Escaneado de un rodete de bomba marca KSB, modelo FB 800 en los talleres de TestPump Venezuela C.A.....	52
26	Bomba SCANPUMP SERIE BA.....	53
27	Curva característica de SCANPUMP SERIE BA.	54
28	Bomba KSB CPKN 2 ^a	55
29	Curva característica de KSB CPKN 2 ^a .	55
30	Bomba KSB Sewatec 3HM.....	56
31	Curva característica de KSB Sewatec 3HM.	56
32	Creación de nuevo proyecto en Flow Simulation.....	57
33	Selección de la velocidad angular.....	58
34	Selección del fluido de trabajo.....	59
35	Creación del dominio computacional.....	59
36	Selección del caudal de entrada.....	60
37	Selección de la presión de salida.....	60
38	Selección de “Surface Goals”.....	61
39	Inserción de la ecuación para obtener la altura.....	62
40	Inserción del torque de las piezas fijas.....	62
41	Inserción de “Equation Goal” para determinar la potencia del eje.....	63
42	Inserción de “Equation Goal” para determinar la potencia hidráulica...	63
43	Inserción de “Equation Goal” para determinar la eficiencia de la bomba.....	64
44	Simulación de flujo.....	64
45	Resultados de la simulación de flujo.....	65
46	Inserción de los “Goal Plots” para observar los resultados.....	65
47	Selección de parámetros y exportación de datos de forma tabulada a Excel.....	66
48	Resultados obtenidos por la simulación.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	pp.
1	Curva característica simulada de la bomba SCANPUMP SERIE BA con flujo de agua.....	68
2	Comparación gráfica de curva Q-H del fabricante y simuladas para la bomba SCANPUMP SERIE BA.....	69
3	Curva característica simulada de la bomba KSB CPKN 2 ^a con flujo de agua.....	70
4	Comparación gráfica de curva Q-H del fabricante y simuladas para la bomba SCANPUMP SERIE BA.....	71
5	Curva característica simulada de la bomba KSB Sewatec 3HM con flujo de agua.....	72
6	Comparación gráfica de curva Q-H del fabricante y simuladas para la bomba Sewatec 3HM.....	73

LISTA DE TABLAS

TABLA	DESCRIPCIÓN	pp.
1	Resultados tabulados de las simulaciones para la bomba SCANPUMP SERIE BA con flujo de agua.	67
2	Cálculo de desviación estándar para la bomba SCANPUMP SERIE BA..	68
3	Resultados tabulados de las simulaciones para la bomba KSB CPKN 2ª con flujo de agua.....	69
4	Cálculo de desviación estándar para la bomba KSB CPKN 2ª.....	70
5	Resultados tabulados de las simulaciones para la KSB Sewatec 3HM con flujo de agua.....	71
6	Cálculo de desviación estándar para la bomba Sewatec 3HM.....	72

LISTA DE CUADROS

CUADROS	DESCRIPCIÓN	pp.
1	Guión de preguntas.....	46
2	Matriz FODA.....	48



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA**

**OBTENCIÓN DE CURVAS DE CARGA Y RENDIMIENTO DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS INDUSTRIALES RESTAURADAS APLICANDO INGENIERÍA
INVERSA**

Autor: Alexander Andrés Figueroa Rincón
Tutor (a): Ing. Yndira Rodríguez Aguirre.
Fecha: julio 2023

RESUMEN

La presente investigación propone la obtención de las curvas de carga y rendimiento de bombas centrífugas industriales restauradas aplicando ingeniería inversa en una empresa de mantenimiento y fabricación de equipos rotativos. La cual está enmarcado dentro del tipo de investigación de proyecto factible, con un diseño de investigación de campo y de nivel explicativo, bajo la Línea de Investigación: Avances tecnológicos en tecnologías de información y comunicación. El objetivo general permitió alcanzar esta propuesta, valiéndose de los métodos numéricos de los softwares seleccionados para tal fin, pudiendo simular el campo de flujo e identificar las variables que se toman en cuenta para evaluar el rendimiento de una bomba centrífuga. Para identificar estas variables y demás datos necesarios para la investigación fueron necesarios, diversos métodos de recopilación de datos, tales como la observación, la revisión documental, las listas de control, el diario de campo y las fichas técnicas. De allí que se pudo comparar el rendimiento original de los equipos otorgados por el fabricante con el rendimiento real de las bombas restauradas obteniendo un porcentaje de desviación de 2,043% para luego realizar un análisis de las posibles causas de la diferencia entre los resultados obtenidos. Luego de las respectivas comparaciones se pudo llegar a la conclusión de que mediante el método empleado para obtener las curvas características de las bombas centrífugas se pueden obtener datos muy aproximados del comportamiento real de la bomba.

Descriptor: bomba centrífuga, CAD, CFD, rendimiento.

INTRODUCCIÓN

La realización de este proyecto trata sobre la selección de un método para obtener las curvas de carga y rendimiento de una bomba centrífuga restaurada mediante técnicas de ingeniería inversa por una empresa de mantenimiento y fabricación de equipos rotativos, puesto que los gráficos mencionados anteriormente son imprescindibles para obtener los parámetros básicos que permiten cumplir con los requerimientos del sistema donde son instalados los equipos.

Mediante la realización de este proyecto se analizan y evalúan las distintas alternativas tecnológicas para la obtención de estas curvas a través de programas de diseño asistido por computadora y dinámica de fluidos computacional, teniendo en cuenta los parámetros a evaluar para el desarrollo de las curvas, así como las tecnologías utilizadas en la industria, de tal manera que se pueda elegir el software más adecuado para la presente investigación.

Por último, se comparan los resultados obtenidos mediante los programas seleccionados con la curva de carga y rendimiento hecha por el fabricante para determinar el porcentaje de desviación y la efectividad de este nuevo método.

El trabajo consta de los siguientes capítulos:

Capítulo I: Explica todo lo relacionado al planteamiento y formulación del problema, además de los objetivos a alcanzados en la presente investigación, así como también las limitaciones que se presentaron al momento de solucionar el problema. SS

Capítulo II: Hace referencia a toda la terminología y conceptos necesarios que sirvieron de base para el desarrollo del estudio, además de un breve resumen sobre los antecedentes relacionados con la investigación.

Capítulo III: Consta de las distintas fases metodológicas empleadas en el desarrollo de las estrategias, que son establecidas para cumplir con los objetivos propuestos.

Capítulo IV: Se nombran los resultados, análisis de los resultados, con sus debidas conclusiones y recomendaciones.

Finalmente, se presentan las referencias bibliográficas que sirvieron de sustento para el desarrollo de la presente investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La ingeniería inversa es un proceso que consiste en recopilar datos e identificar las propiedades de un objeto físico mediante la realización de un análisis exhaustivo de su estructura, funciones y operaciones, permitiéndoles a los fabricantes comprender cómo se diseñó una pieza para replicarla, restaurarla o realizar modificaciones o mejoras. Siendo importante indicar que los equipos de ingeniería inversa trabajan «hacia atrás», pues parten del resultado final, despiezan el producto y realizan evaluaciones y mediciones para obtener la información del diseño físico.

Actualmente empresas como Test Pump Venezuela, C. A. ubicada en Puerto La Cruz, estado Anzoátegui (Ver figura 1) que se desarrollan en el área de ingeniería, se dedican a la reparación y fabricación de componentes de equipos rotativos; principalmente al mantenimiento de bombas centrífugas y en menor escala a la reparación de compresores, turbinas y ventiladores industriales, produciendo también materia prima para la industria metalúrgica, siempre con el propósito de ayudar a sus clientes a mantener los equipos en el mejor nivel de confiabilidad posible, incrementando el tiempo entre fallas; de allí que se ha planteado la búsqueda de nuevas técnicas y métodos para mejorar y optimizar sus procesos, ya que cuenta con tecnología suficiente para trabajar mediante ingeniería inversa.



Figura 1. Taller de equipos rotativos de TESTPUMP C.A. ubicado en Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.

Fuente: Figueroa (2023).

Esta aplicación ha tenido importantes beneficios para la compañía y de ahí surge la idea de desarrollarla haciendo énfasis en la eficiencia de los equipos, la cual se evalúa principalmente a través de la característica curva de carga y rendimiento, diagrama fundamental para identificar y saber qué máquina sirve para determinada aplicación. Para el caso específico de las bombas centrífugas industriales, el rendimiento de las mismas se ve reflejado por diversos factores, entre los cuales se puede considerar la relación entre el caudal suministrado, la altura o presión que da la bomba, la densidad del fluido y la energía consumida, así como las pérdidas por recirculaciones internas, cavitación, desgaste, entre otras cosas.

De allí que, para determinar el comportamiento de un fluido que pasa a través de una bomba centrífuga, es necesaria la aplicación de modelos matemáticos relativamente complejos, por lo que se suele buscar una alternativa al cálculo manual, para ser más específicos y minimizar los errores humanos. Es por esto que existen herramientas computacionales que basadas en dichos modelos y ecuaciones matemáticas logran simular eficientemente el comportamiento de los fluidos en determinadas situaciones; estas herramientas se conocen como Dinámica de Fluidos Computacional o Computational Fluid Dynamics, de allí sus siglas CFD.

El CFD es una gran opción a la hora de estudiar estos comportamientos, pues es casi igual de precisa y mucho más económica que un banco de pruebas, por ejemplo. Este instrumento consiste básicamente en analizar el movimiento de los fluidos mediante simulaciones computarizadas, cuyo objetivo es la búsqueda de una solución aproximada a las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos. Además, también es especialmente útil cuando se quiere evaluar el comportamiento de un sistema de bombeo bajo ciertas condiciones, como es el caso en el presente estudio de las bombas centrífugas.

Actualmente en la empresa Test Pump Venezuela, C. A; luego de aplicarle el respectivo análisis a determinada bomba centrífuga mediante la ingeniería inversa para determinar su condición, se procede a llevar a cabo el servicio de mantenimiento y/o reparación del equipo (Ver figura 2); posteriormente se entrega al cliente la bomba restaurada asumiendo la curva de carga y rendimiento original, sin tomar en cuenta que muchas veces al sustituir o reparar piezas y componentes, se alteran las tolerancias, por criterios de diseño, modificando considerablemente la curva de carga y rendimiento. Por ende, es prudente utilizar las herramientas de CFD para conocer el comportamiento de algún equipo bajo las nuevas condiciones de trabajo.



Figura 2. Desmontaje de bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.

Fuente: Figueroa (2023).

Es por esto que la empresa Test Pump Venezuela, C. A; en busca de mejorar la calidad de sus líneas de servicio, se encuentra en la necesidad de estimar el rendimiento de las bombas centrífugas industriales usando técnicas de CFD una vez hecho el respectivo proceso de mantenimiento mediante ingeniería inversa.

1.2 Formulación del problema.

Para dar una posible solución a la problemática antes expuesta, se plantea la siguiente interrogante: ¿Cómo se puede verificar los parámetros operacionales del fabricante de una bomba centrífuga restaurada por mantenimiento mayor?

1.3 Objetivos de la investigación.

1.3.1 Objetivo General.

Obtener las curvas de carga y rendimiento de las bombas centrífugas industriales restauradas mediante ingeniería inversa en la empresa Test Pump Venezuela, C. A.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Diagnosticar la situación actual de la aplicación de la ingeniería inversa para talleres de reparación de bombas centrífugas industriales.
- Seleccionar diversos tipos de bombas centrífugas de acuerdo al fluido con el que trabaja e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD), haciendo uso de técnicas de ingeniería inversa.
- Simular el campo de flujo de la bomba centrífuga seleccionada mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) con la finalidad de obtener el gráfico de las curvas de carga y rendimiento.

- Comparar las curvas características originales de las bombas centrífugas con las curvas obtenidas mediante herramientas de CFD
- Realizar un análisis de posibles causas de la diferencia entre las eficiencias calculadas.

1.4 Justificación.

El propósito de la obtención de las curvas de carga y rendimiento de las bombas centrífugas industriales restauradas por la empresa Test Pump Venezuela C.A; mediante ingeniería inversa es de suma importancia en el área de reparación y mantenimiento industrial, su aplicación se hace necesaria en las empresas de la región oriental del país, tales como petroleras, petroquímicas, de gas natural, entre otras, ya que dicha región cuenta con la tercera reserva de crudo y gas natural más grande del país por lo que es prudente mantener los equipos y la maquinaria en condiciones de operación para poder cumplir con la producción requerida.

En este sentido, el proceso innovador que corresponde a la ingeniería inversa, y que se pretende desarrollar en esta investigación se justifica en el área de ingeniería porque permitirá ser certero y específico al momento de reconocer las circunstancias reales para las cuales está diseñada alguna bomba, de esta forma se permitirá aprovechar al máximo las virtudes del equipo. Asimismo, se estima tener mayor confiabilidad sobre las condiciones de las instalaciones de la industria, garantizando la prolongación de la vida útil de las bombas centrífugas y por ende el incremento de la productividad en función de los objetivos planteados.

Además, la utilización de herramientas de dinámica de fluido computacional (CFD), otorga una gran ventaja en estos proyectos de investigación, ya que esta permite realizar simulaciones de campos de flujos utilizando los modelos numéricos previamente establecidos, de una manera fácil, rápida y precisa, disminuyendo la necesidad de ensayos en bancos de pruebas.

Del mismo modo se justifica académicamente, porque el estudio describirá toda la información en el área de ingeniería inversa, completando conocimientos generales de diseño, bombas industriales, mecánica de los fluidos, entre otros, por medio de la obtención de la experiencia obtenida en el desarrollo del proyecto de esta investigación.

1.5 Alcance y limitaciones.

En cuanto al alcance, el estudio se desarrolla en diversos tipos de bombas centrífugas industriales restauradas por la empresa Test Pump Venezuela, C. A. Estos distintos modelos de bombas van a variar de acuerdo a su clasificación según el fluido con el que trabajan.

Por otro lado, la principal limitante es la poca información referente a la ingeniería inversa aplicada, al ser una estrategia relativamente nueva e inexplorada. Además de lo costoso de su aplicación debido a las herramientas que necesita. También es importante mencionar la

pérdida o el extravío de documentos tales como planos de diseño o las fichas técnicas de los equipos de la empresa, algo que complicaría la recopilación de datos. Esto suele ser común en grandes plantas, con una considerable cantidad de maquinaria, o de larga data. Precisamente por esta razón es que muchas veces se utiliza la ingeniería inversa para modelar algún equipo en programas de diseño asistido por computadora (CAD), debido a la poca información del mismo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Según Arias (2016, p. 106) el marco teórico es “el producto de la revisión documental-bibliográfica, y consiste en una recopilación de ideas, posturas de autores, conceptos y definiciones, que sirven de base a la investigación por realizar” Es decir, se enmarcan aquellas leyes, métodos y fundamentos en los que se basa la investigación, para así sustentar el problema planteado.

2.1 Antecedentes de la investigación.

Las bombas hoy en día representan a los equipos más usados en el mundo industrial, pues se estima que están presentes en más del 70% de los procesos industriales. Y como es bien sabido, bombas con baja confiabilidad generan un alto costo de mantenimiento por presentar altas tasas de falla y baja disponibilidad para la operación. Es por esto que durante los últimos años se han realizado diversas investigaciones en torno a bombas centrífugas, a sus condiciones de desempeño y al flujo con el que trabajan, motivadas principalmente por la necesidad de describir con mayor precisión su funcionamiento con fines predictivos, lo que a su vez incurre en el diseño y realización de equipos más confiables. A continuación, se presentan algunas investigaciones en el ámbito internacional, nacional y regional estrechamente relacionadas con el problema abordado.

A nivel nacional, Navas Moncada (2021) desarrolló un trabajo de aplicación profesional en la Universidad Nacional Experimental del Táchira titulado “**Diseño de sistema para la reutilización del agua en el proceso de enfriamiento para embutidos en hornos VEMAG**” para optar al título de ingeniero mecánico. En la planta objeto de estudio se desperdiciaba el agua usada en el proceso de enfriamiento de los embutidos introducidos en los hornos, por lo que para reutilizar el agua desechada se diseñó por completo una red de tuberías, centrándose en los equipos de bombeo para agua, como las bombas centrífugas y sumergibles que son accionadas por motores eléctricos, haciendo ver sus diferencias, ventajas y desventajas.

Así mismo, se hace un análisis del sistema de bombeo a manera de ilustrar los inconvenientes de la extracción de caudales considerablemente grandes con diámetros inadecuados, implicando esto en la utilización de recursos adicionales para dividir la carga total del sistema. Finalmente se selecciona una bomba centrífuga marca “Goulds Pumps”, debido a que luego de aplicarle ciertos criterios se consideró fácil de transportar, de conseguir, acorde económicamente y de funcionamiento e instalación es simple en comparación con otros tipos de bombas. El trabajo realizado por este autor aporta un contenido explicativo y detallado

referente a los parámetros que se toman en cuenta para evaluar el rendimiento de una bomba al momento de seleccionar un equipo de bombeo para el agua.

Por otro lado, en el ámbito internacional, Callo Conto (2020) para aspirar al título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional De San Agustín De Arequipa, ubicada en Perú realizó su respectivo trabajo de grado titulado “**Optimización en la instalación y uso de bombas centrífugas mediante la aplicación de criterios de confiabilidad**”, donde se busca predecir las fallas más comunes de los equipos para obtener ciertos criterios de confiabilidad, buscando la optimización de su operación, algo que es fundamental para conocer el comportamiento de las máquinas y permitir tomar acciones de mejora continua, eliminando estas fallas o reduciendo sus consecuencias.

Este trabajo hace énfasis en el denominado “Best Efficiency Point (BEP)”, que indica aquel punto de operación o área de trabajo a lo largo de la curva de rendimiento de una bomba, en donde es posible obtener la mayor eficiencia para un determinado diámetro del impulsor. Se llega a la conclusión de que a medida que el punto de operación de una bomba se aleja del BEP, se produce un desequilibrio de presión dentro de la bomba, que tiene la capacidad de generar desviaciones en el eje, cargas excesivas en los rodamientos y sellos mecánicos, vibración excesiva y calentamiento, además de que el equipo pierde eficiencia, desperdicia energía y presenta diferentes condiciones desfavorables que logran reducir significativamente la vida útil de la bomba y sus componentes.

De la presente investigación se puede destacar el desarrollo del estudio del “BEP”, que busca aprovechar al máximo la capacidad de una bomba teniendo en cuenta sus valores de diseño, enfocándose en las causas de las fallas más importantes de los equipos, que se ven reflejadas a lo largo de la curva de rendimiento de una bomba según su punto de operación.

A nivel local, Fernández y Brizuela (2019) presentaron un trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico de la Universidad José Antonio Páez. Dicho trabajo se titula “**Estudio del fenómeno de cavitación en el dominio fluidizado impulsor-voluta de una bomba centrífuga usando técnicas de CFD**”. Dicho proyecto tuvo como objetivo investigar acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de una bomba centrífuga, y simular dicho campo de flujo mediante herramientas de CFD.

Es importante reseñar que en la investigación se definieron condiciones de simulación, los parámetros de entrada y salida, los valores límites, los criterios de convergencia y los modelos matemáticos a utilizar para representar el comportamiento del fluido, para luego dar inicio a la simulación y analizar los resultados. Este trabajo es de utilidad para el presente

proyecto de investigación ya que se amplían los conocimientos en el campo de estudio en el área de la dinámica de los fluidos computacionales, a través del estudio del fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas.

Finalmente, en cuanto a la academia nacional, Ferranti (2018) en su investigación para optar por el grado de Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional Experimental del Táchira desarrolló un Proyecto Especial de Grado de nombre “**Simulación numérica y tridimensional de flujo bifásico aire-agua patrón estratificado a través de una válvula de compuerta de 2” DN**”, el cual tuvo como objetivo modelar el comportamiento del flujo bifásico aire-agua cuando pasa a través de una válvula de compuerta de dos pulgadas de diámetro nominal empleando técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD).

En el presente trabajo se llegó a demostrar que el software de simulación de fluidos puede desarrollar y predecir resultados óptimos, para generar respuestas a situaciones complejas de manera eficiente. Este estudio realiza un aporte significativo al presente trabajo ya que permite obtener los parámetros necesarios para evaluar, predecir y entender el comportamiento del flujo bifásico, además, se pudo caracterizar de manera gráfica el comportamiento de los modelos matemáticos propuestos en la investigación.

2.2. Teoría central de la investigación

Esta teoría describe el comportamiento y las propiedades de la materia en base a cuatro postulados:

- La materia está constituida por partículas que pueden ser átomos o moléculas cuyo tamaño y forma característicos permanecen en estado sólido, líquido o gas.
- Estas partículas están en continuo movimiento aleatorio. En los sólidos y líquidos los movimientos están limitados por las fuerzas cohesivas, las cuales hay que vencer para fundir un sólido o evaporar un líquido.
- La energía depende de la temperatura. A mayor temperatura más movimiento y mayor energía cinética.
- Las colisiones entre partículas son elásticas. En una colisión la energía cinética de una partícula se transfiere a otra sin pérdidas de la energía global.

2.3. Bases teóricas.

2.3.1. Conceptos básicos de la hidráulica.

Un fluido es aquella sustancia que debido a su poca o nula cohesión intermolecular, carece de forma propia, por lo que adopta la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos pueden ser divididos en líquidos y gases. De una manera práctica, se pueden distinguir a los

líquidos, de los gases de la siguiente forma: los líquidos, cuando son vertidos en un recipiente, toman la forma de este presentando una superficie libre, mientras que los gases, llenan totalmente el recipiente, sin presentar una superficie libre definida (ver figura 3).

En este trabajo de investigación se profundizará acerca de las características de los líquidos. Un fluido puede considerarse ideal cuando viscosidad es nula, es decir, entre sus moléculas no se producen fuerzas de roce tangenciales. Es aquel en el que su volumen no varía en función de la presión. En la práctica la mayoría de los líquidos tienen un comportamiento próximo a este tipo, pudiendo, por lo tanto, ser considerados como fluidos incompresibles.

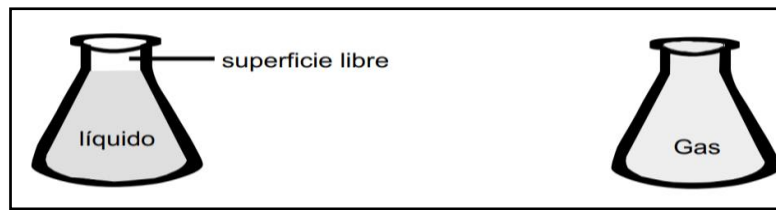


Figura 3. Clasificación de los fluidos
Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

2.3.1.1. Densidad y peso específico.

La densidad específica de una sustancia es la masa de esa sustancia por la unidad de volumen que ella ocupa.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(Ec. 1)

Siendo

“ ρ ” la densidad específica,

“ m ” la masa de la sustancia

“ V ” el volumen ocupado por la sustancia.

La densidad relativa de una sustancia es la razón entre el peso específico o densidad específica de esa sustancia y el peso específico o densidad específica de una sustancia de referencia. Para sustancias en estado líquido o sólido, la sustancia de referencia es el agua. Es decir, esta relación es igual a los pesos específicos del cuerpo en cuestión y del agua en las mismas condiciones. Es una magnitud adimensional.

$$\delta_{Fluido} = \frac{\rho_{Fluido}}{\rho_{H_2O}}$$

(Ec. 2)

El peso específico de una sustancia es el peso de la misma por la unidad de volumen que ella ocupa.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

(Ec. 3)

Siendo

“ γ ” el peso específico

“ W ” el peso de la sustancia.

Como el peso de una sustancia es el producto de su masa por la constante de aceleración de gravedad, resulta la siguiente relación entre el peso específico y la densidad específica.

$$\gamma = \rho \cdot g$$

(Ec. 4)

Siendo

“ g ” la aceleración de la gravedad.

2.3.1.2. Ley de la viscosidad de Newton.

La viscosidad es la propiedad física de un fluido que expresa la resistencia a los esfuerzos de corte internos, es decir, a cualquier fuerza que tienda a producir el escurrimiento entre sus capas. La viscosidad tiene una influencia importante en el fenómeno de, sobre todo en las pérdidas de presión de los fluidos. La magnitud del efecto depende principalmente de la temperatura y de la naturaleza del fluido.

Newton descubrió que, en muchos fluidos, la tensión de corte era proporcional al gradiente de velocidad, llegando a la siguiente fórmula:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

(Ec. 5)

Siendo

“ τ ” la tensión de corte

“ μ ” el coeficiente de proporcionalidad

“ $\frac{dv}{dy}$ ” el gradiente de velocidad

Los fluidos que obedecen esta ley son los fluidos llamados Newtonianos y los que no obedecen son los llamados No Newtonianos. La mayoría de los fluidos que son de interés, como el agua, diversos aceites, entre otros, se comportan cumpliendo esta ley.

La viscosidad dinámica o absoluta expresa la medida de las fuerzas de roce internas del fluido y es el coeficiente de proporcionalidad entre la tensión de corte y el gradiente de velocidad de la Ley de Newton. El símbolo normalmente utilizado para indicarla es la letra “ μ ”.

Por otro lado, la viscosidad cinemática es definida como el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad específica. La viscosidad dinámica de los fluidos varía mucho con la temperatura, aumentando con la temperatura en los gases y disminuyendo en los líquidos; pero en unos y otros prácticamente es independiente de la presión. Por el contrario, la viscosidad cinemática de los gases varía mucho con la presión y la temperatura, mientras que la de los líquidos prácticamente sólo varía con la temperatura. El símbolo normalmente utilizado para indicarla es la letra “ ν ”.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{Ec. 6}$$

2.3.1.3. Presión y sus propiedades.

Es la fuerza ejercida por unidad de área.

$$P = \frac{F}{A} \tag{Ec. 7}$$

Siendo

“P” la presión

“F” la fuerza

“A” el área.

- 1° propiedad: La presión en un punto de un fluido en reposo es igual en todas direcciones (principio de pascal).
- 2° propiedad: La presión situada en todos los puntos situados en un mismo plano horizontal en el seno de un fluido en reposo es la misma.
- 3° propiedad: En un fluido en reposo la fuerza de contacto que ejerce en el interior de un fluido una parte del fluido sobre la otra contigua al mismo tiene la dirección normal a la superficie de contacto.
- 4° propiedad: La fuerza de presión de un fluido en reposo se dirige siempre hacia el interior del fluido, es decir, es una compresión, jamás de tracción. Tomando como positivo el signo de compresión, la presión absoluta no puede ser jamás negativa.
- 5° propiedad: La superficie de un fluido en reposo es siempre horizontal.

La presión atmosférica (P_{atm}) es la presión ejercida por el peso de la atmósfera. Esta presión puede adquirir un valor cualquiera en recipiente cerrado; pero si el recipiente está abierto, sobre la superficie libre de líquido reina la presión atmosférica, debida al peso de la columna de aire que gravita sobre el fluido. La presión atmosférica varía con la temperatura y la altitud. La presión media normal a 0 °C y al nivel del mar es de 760 mmHg = 1.01396 Bar y se llama atmosférica normal. En la técnica se utiliza mucho la atmósfera técnica que es igual a 1 Bar.

La presión manométrica ($P_{manométrica}$), también llamada sobrepresión, es la presión medida con respecto a la presión atmosférica. La presión manométrica está referenciada a cero con respecto a la presión del aire ambiente (o atmosférico). Esto significa que la presión manométrica varía en función de la altura sobre el nivel del mar y de las condiciones meteorológicas.

La presión absoluta (P_{abs}) es la presión medida en relación al vacío total o cero absoluto. Todos los valores que expresan presión absoluta son positivos. Está dada mediante la siguiente ecuación:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{Manometrica} \quad (\text{Ec. 8})$$

2.3.1.4. Caudal.

El caudal volumétrico está definido como el volumen de fluido que pasa por una determinada sección por unidad de tiempo.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Ec. 9})$$

Siendo

“Q” el caudal volumétrico

“t” el tiempo.

El caudal másico (Qm) es la masa de fluido que pasa por una determinada sección, por unidad de tiempo.

$$Qm = \frac{m}{t} \quad (\text{Ec. 10})$$

2.3.2. Hidráulica de Turbomáquinas.

2.3.2.1. Ecuación de conservación de la energía aplicada a Turbomáquinas Hidráulicas (Ecuación de Bernoulli)

Para régimen permanente, flujo unidimensional, una entrada y una salida, la ecuación de conservación de la masa resulta:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (\text{Ec.11})$$

La Primera Ley de la Termodinámica para régimen permanente, flujo unidimensional y despreciando el calor intercambiado entre la máquina y el ambiente resulta en:

$$\dot{m} \left(u_1 + P_1 v_1 + \frac{V_1^2}{2} + z_1 g \right) \pm \dot{W}_{1-2} = \dot{m} \left(u_2 + P_2 v_2 + \frac{V_2^2}{2} + z_2 g \right) \quad (\text{Ec.12})$$

Dividiendo entre el flujo másico (\dot{m}) y multiplicando por “ $\frac{1}{g}$ ” se tiene:

$$\frac{u_1}{g} + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \pm \frac{\dot{W}_{1-2}}{g} = \frac{u_2}{g} + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{Ec. 13})$$

Como $\frac{\dot{W}_{1-2}}{g} = H_{1-2}$ (altura intercambiada entre la entrada y la salida de la máquina) y $\gamma = \rho \cdot g$, se puede escribir:

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right) - \frac{1}{g} (u_2 - u_1) \pm H_{1-2} = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right) \quad (\text{Ec. 14})$$

La energía interna del fluido (u) se incrementa debido a la fricción hidráulica, cambios bruscos de dirección, desprendimiento de capa límite, entre otras cosas. Es decir, el incremento de u , representa pérdidas por irreversibilidades que ocurren en el interior de la máquina y se acostumbra a escribir:

$$h_{fint} = \frac{1}{g} (u_2 - u_1) \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde “ h_{fint} ” se denomina altura de pérdidas o energía por unidad de peso perdida debido a irreversibilidades dentro de la turbomáquina hidráulica. Por lo tanto, el balance de energía resulta en:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - h_{fint} \pm H_{1-2} = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right) \quad (\text{Ec. 16})$$

La altura de pérdidas h_{fint} es muy difícil de calcular analíticamente, por lo que se toma en cuenta a través del rendimiento interno de la máquina. Además, La presión total (P_0) en un fluido incompresible se define como:

$$P_0 = P + \gamma \frac{V^2}{2g}$$

(Ec. 17)

Dónde “ P ” es la presión estática y “ $\gamma \frac{V^2}{2g}$ ” es la presión dinámica. Usando “ P_0 ”, el balance de energía resulta en:

$$\frac{P_{01}}{\gamma} + z_1 \pm H_{1-2} = \frac{P_{02}}{\gamma} + z_2$$

(Ec. 18)

Si la diferencia de cotas entre la entrada y la salida de la máquina se puede despreciar se tiene:

$$\frac{P_{01}}{\gamma} \pm H_{1-2} = \frac{P_{02}}{\gamma}$$

(Ec. 19)

2.3.2.2. Aplicación global a sistemas de bombeo.

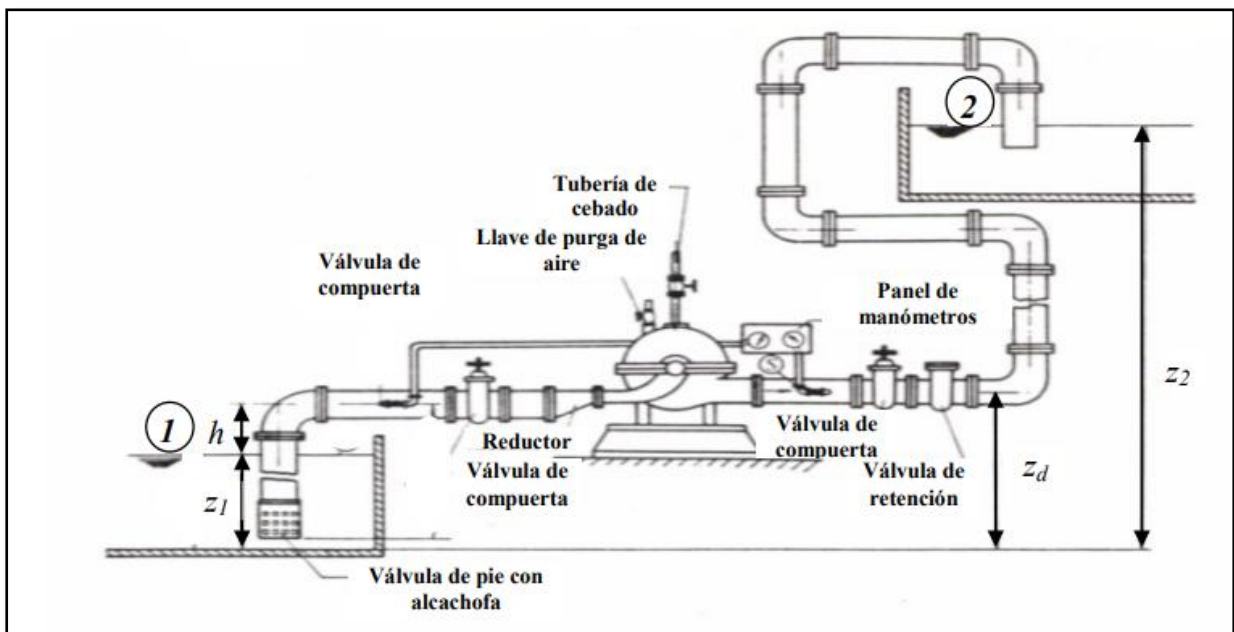


Figura 4. Sistemas de bombeo.
Fuente: Guía de Turbomáquinas. ULA (2014)

La aplicación de la ecuación de Bernoulli a un sistema de bombeo (ver figura 4) incluyendo los conductos y accesorios que conducen y controlan el fluido desde el depósito de

aspiración o succión hasta la entrada a la máquina y desde la salida de la máquina hasta el depósito de descarga resulta en:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - h_{f1-2} + H_{B,V} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{Ec. 20})$$

Dónde $h_{f1-2} = h_{f1-s} + h_{fd-2}$ es la suma de las perdidas primarias y secundarias de las tuberías de succión y descarga del sistema de bombeo. Si los depósitos están abiertos a la atmósfera, $P_1 = P_2 = P_{atm} = 0$ en unidades manométricas. La velocidad del fluido sobre las superficies libres de los depósitos es muy baja y puede despreciarse, siendo $V_1 = V_2 \approx 0$. Entonces;

$$H_{B,V} = (z_2 - z_1) + h_{f1-2} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$H_{B,V} = (\Delta z) + h_{f1-2} \quad (\text{Ec. 22})$$

Bajo estas condiciones la bomba debe comunicar al fluido una altura o energía por unidad de peso suficiente para vencer la altura geodésica y la altura de pérdidas entre los depósitos. La altura de pérdidas en las tuberías se divide en altura de pérdidas primarias que ocurre en tramos rectos de tubería de sección transversal constante y en altura de pérdidas secundarias que ocurre en los accesorios tanto en la succión como en la descarga.

$$h_{f1-2} = h_{f1-s} + h_{fd-2} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$h_{f1-2} = h_{fp1-s} + h_{fs-2} \quad (\text{Ec. 24})$$

Para calcular las perdidas primarias se usa la ecuación de Darcy-Weisbach

$$h_{fpd} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec. 25})$$

O en función del caudal:

$$h_{fpd} = f \frac{8fL}{g\pi^2 D^5} Q^2$$

(Ec. 26)

Dónde “ f ” es el factor de fricción de Moody. Para las pérdidas secundarias se tienen dos métodos cálculo, siendo el primero el Método de Longitud Equivalente:

$$h_{fs} = f \frac{\sum L_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g}$$

(Ec. 27)

Dónde $\sum L_{eq}$ es la sumatoria de las longitudes equivalentes de todos los accesorios instalados en la tubería. También:

$$h_{fs} = K \frac{V^2}{2g}$$

(Ec. 28)

Dónde el coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria se define como:

$$K = f \frac{L_{eq}}{D}$$

(Ec. 29)

Usando el método de longitud equivalente, las pérdidas totales en la tubería de succión:

$$h_{f1-s} = f_s \frac{L_s}{D_s} \frac{V_s^2}{2g} + f_s \left(\frac{\sum L_{eqs}}{D_s} \right) \frac{V_s^2}{2g} = f_s \frac{(L_s + \sum L_{eqs})}{D_s} \frac{V_s^2}{2g}$$

(Ec. 30)

O usando la formulación en caudal:

$$h_{f1-s} = \frac{8f_s(L_s + \sum L_{eqs})}{g\pi^2 D_s^5} Q^2$$

(Ec. 31)

Usando la formulación en caudal, las pérdidas totales en el sistema de bombeo son:

$$h_{f1-2} = \left[\frac{8f_s(L_s + \sum L_{eqs})}{g\pi^2 D_s^5} + \frac{8f_d(L_d + \sum L_{eqs})}{g\pi^2 D_d^5} \right] Q^2$$

(Ec. 32)

2.3.3 Parámetros fundamentales de un sistema de bombeo.

- **Altura estática.**

La altura estática de un sistema de bombeo está compuesta por los siguientes términos:

- **Altura geométrica (H_{geo}).**

Es la diferencia de cota entre el nivel del líquido en la succión y en la descarga. Si la tubería de descarga esta sobre el nivel del líquido en el depósito de descarga, entonces H_{geo} se debe referir a la línea de centro de la tubería de descarga y no al nivel del líquido.

- **Carga de presión.**

Es la diferencia de presión existente entre los depósitos de descarga y succión. Esta expresión es aplicable en depósitos cerrados. Para sistemas abiertos, esta expresión puede ser considerada como nula. Esta carga se puede representar a través de la fórmula:

$$\left(\frac{P_{rd} - P_{rs}}{\gamma} \right)$$

(Ec. 33)

- **Altura dinámica.**

La altura dinámica de un sistema de bombeo está compuesta por las expresiones:

- **Pérdida de carga total (H_p).**

Es la suma de todas las pérdidas de carga que se producen en el sistema, tales como las pérdidas de carga en la tubería, válvulas, accesorios, entre otros. La pérdida de carga total considera tanto la succión como la descarga de la instalación.

- **Carga de velocidad.**

Es la diferencia entre la carga de velocidad del fluido en el depósito de succión y en el depósito de descarga. En la práctica, esta expresión puede ser despreciada. Esta altura se puede representar a través de la fórmula:

$$\left(\frac{V_{rd}^2 - V_{rs}^2}{2g} \right)$$

(Ec. 34)

- **Altura total del sistema.**

La altura total del sistema, más adecuadamente llamada como Altura Manométrica Total del Sistema, está compuesta por la Altura Estática más la Altura Dinámica, es decir:

$$H = H_{geo} + \frac{P_{rd} - P_{rs}}{\gamma} + H_p + \frac{V_{rd}^2 + V_{rs}^2}{2g}$$

(Ec. 35)

Si se desprecia la carga de velocidad, se tiene:

$$H = H_{geo} + \frac{P_{rd} - P_{rs}}{\gamma} + H_p$$

(Ec. 36)

Para sistemas abiertos, se tiene:

$$H = H_{geo} + Hp \quad (\text{Ec. 37})$$

- **Altura de succión (Hs).**

La altura de succión está compuesta por las siguientes expresiones:

- **Altura geométrica de succión (H_{geod}).**

Es la diferencia de cota entre el nivel del depósito de succión y la línea central del rodete de la bomba.

- **Carga de presión en la sección ($\frac{P_{rs}}{\gamma}$).**

Es la altura de presión existente en el depósito de succión. Este término es nulo para depósitos abiertos.

- **Pérdida de carga en la succión (H_{ps}).**

Es la suma de todas las pérdidas de carga entre los de succión y el flange de succión de la bomba.

- **Carga de velocidad en la succión ($\frac{V_{rs}^2}{2g}$).**

Es la altura de velocidad en el de succión. Así, la altura de succión puede ser expresar por:

$$H = H_{geos} + \frac{P_{rs}}{\gamma} + Hps + \frac{V_{rs}^2}{2g} \quad (\text{Ec. 38})$$

- **Altura de descarga (Hd).**

La altura de descarga está compuesta por las siguientes expresiones:

- **Altura geométrica de descarga (H_{geod}).**

Es la diferencia de cota entre el nivel del depósito de descarga y la línea de centro del rodete de la bomba.

- **Carga de presión en la descarga ($\frac{P_{rd}}{\gamma}$).**

Es la carga de presión existente en el depósito de descarga. Esta es nula para depósitos abiertos.

- **Pérdida de carga en la descarga (H_{pd}).**

Es la suma de todas las pérdidas de carga entre el flange de descarga de la bomba y el depósito de descarga.

- **Carga de velocidad en la descarga ($\frac{V_{rd}^2}{2g}$).**

Es la carga de velocidad del fluido en el depósito de la descarga. Así, la altura de descarga se puede expresar por:

$$H = H_{geod} + \frac{P_{rd}}{\gamma} + Hpd + \frac{V_{rd}^2}{2g}$$

(Ec. 39)

2.3.3.1 Altura manométrica total y cálculo en la etapa de diseño.

La altura Manométrica Total es la energía por unidad de peso que el sistema requiere para transportar el fluido desde el depósito de succión al de descarga, para un cierto caudal. En los sistemas que nosotros estudiaremos, esa energía es entregada por una bomba, siendo la altura Manométrica Total, un parámetro fundamental para el dimensionamiento de la misma. Es importante notar que, en un sistema de bombeo, el parámetro a fijar es el Caudal (Q), ya que la altura Manométrica Total (H) es consecuencia de la instalación.

$$H = H_{geo} + \frac{P_{rd} - P_{rs}}{\gamma} \cdot 10 + Hp + \frac{V_{rd}^2 + V_{rs}^2}{2g}$$

(Ec. 40)

Siendo “ H_{geo} ” la altura geométrica, “ P_{rd} ” la presión en el depósito de descarga ($\frac{kgf}{cm^2}$), “ P_{rs} ” la presión en el depósito de succión ($\frac{kgf}{cm^2}$), “ γ ” el peso específico del fluido ($\frac{kgf}{dm^3}$), “ Hp ” la pérdida de carga total (m), “ V_{rd}^2 ” la velocidad en el depósito de descarga ($\frac{m}{s}$), “ V_{rs}^2 ” la velocidad de succión ($\frac{m}{s}$), “ g ” la aceleración de gravedad ($\frac{m}{s^2}$) y “10” el factor de conversión de unidades

O mediante la expresión:

$$H = Hd - Hs$$

(Ec. 41)

2.3.3.2 Altura manométrica total y cálculo en la etapa de operación.

Las fórmulas presentadas son utilizadas para determinar la Altura Manométrica Total del sistema en etapa de diseño, es decir, realizando los cálculos para determinar las pérdidas de carga, etc. Sin embargo, cuando se tiene un sistema instalado y en funcionamiento, algunas expresiones pueden ser obtenidas directamente de la propia instalación. En este caso, aunque las fórmulas presentadas siguen siendo válidas, la Altura Manométrica Total correspondiente para un cierto caudal se puede obtener de la siguiente forma:

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \cdot 10 + \frac{V_d^2 + V_s^2}{2g} + Z_{sd}$$

(Ec. 42)

Siendo “ P_d ” la presión obtenida del manómetro de descarga ($\frac{kgf}{cm^2}$), “ P_s ” la presión obtenida del manómetro de succión ($\frac{kgf}{cm^2}$), “ γ ” el peso específico del fluido ($\frac{kgf}{dm^3}$), “ V_d^2 ” la velocidad del fluido en la descarga de la bomba ($\frac{m}{s}$), “ V_s^2 ” la velocidad del fluido en la succión de la bomba ($\frac{m}{s}$), “ Z_{sd} ” la diferencia de cota entre las líneas de centro de los manómetros ubicados en la succión y descarga de la bomba (m), y “ 10 ” el factor de conversión. Para efectos de simulación, se tomará en cuenta la siguiente expresión:

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

(Ec. 43)

2.3.4. Curva característica de la bomba.

Los sistemas de bombeo están normalmente compuestos por diversos elementos, tales como bombas, válvulas, tuberías y accesorios, los que son necesarios para transferir el fluido desde un punto hacia otro. Las curvas características de las bombas son representaciones gráficas que muestran el funcionamiento de la bomba, obtenidas a través de las experiencias del fabricante, los que construyen las bombas para vencer diversas alturas manométricas con diversos caudales, verificando también la potencia absorbida y la eficiencia de la bomba. Ya se ha estudiado en puntos anteriores, cómo calcular la Altura Manométrica Total del sistema para un cierto caudal deseado.

Los parámetros Caudal (Q) y Altura Manométrica Total (H) son fundamentales para el dimensionamiento de la bomba adecuada para un sistema específico. Sin embargo, muchas veces, es necesario conocer además del punto de operación del sistema (Q y H), la Curva característica del mismo, es decir, la Altura Manométrica Total correspondiente a cada caudal, dentro de un cierto rango de operación del sistema.

2.3.4.1. Gráfico de la curva del sistema.

La curva característica del sistema (ver figura 5) se obtiene graficando la Altura Manométrica Total en función del caudal del sistema, según las siguientes indicaciones:

- 1° Paso: Considerar una de las fórmulas para la obtención de la Altura Manométrica Total;
- 2° Paso: Fijar algunos caudales dentro del rango de operación del sistema. Se sugiere fijar del orden de cinco puntos, entre ellos el de caudal cero (Q = 0) y el caudal del diseño;
- 3° Paso: Determinar la Altura Manométrica Total que corresponde a cada caudal fijado;
- 4° Paso: Dibujar los puntos obtenidos en un gráfico Q v/s H, (el caudal en el eje de las abscisas y altura manométrica en el eje de las ordenadas), según el siguiente gráfico:

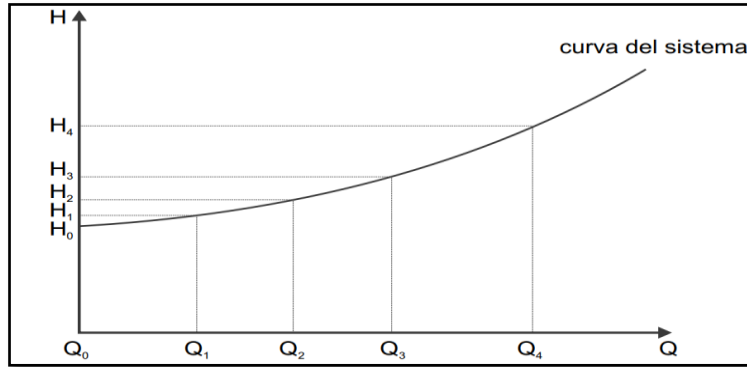


Figura 5. Gráfico de la curva del sistema.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

La curva característica de un sistema del bombeo presenta dos partes diferentes, es decir, una componente estática y otra dinámica. La componente estática corresponde la altura estática y es independiente del caudal del sistema, es decir, de la carga de presión en los depósitos de la descarga y succión, así como de la altura geométrica. La componente dinámica corresponde a la altura dinámica, es decir, con un caudal en movimiento, generando carga de velocidad en los depósitos de descarga y succión y las pérdidas de carga, que aumentan en forma cuadrática con el caudal del sistema.

Componente Dinámica:

$$H_p + \frac{V_{rd}^2 - V_{rs}^2}{2g} \quad (\text{Ec. 44})$$

Componente Estática:

$$H_{geo} + \frac{P_{rd} - P_{rs}}{\gamma} \quad (\text{Ec. 45})$$

2.3.4.2. Obtención de la curva característica del sistema.

Los ensayos de las curvas características de las bombas son realizados por el fabricante del equipo, en bancos de prueba equipados para tal servicio (ver figura 6). De una manera simplificada, las curvas son graficadas de la siguiente forma, conforme al siguiente esquema.

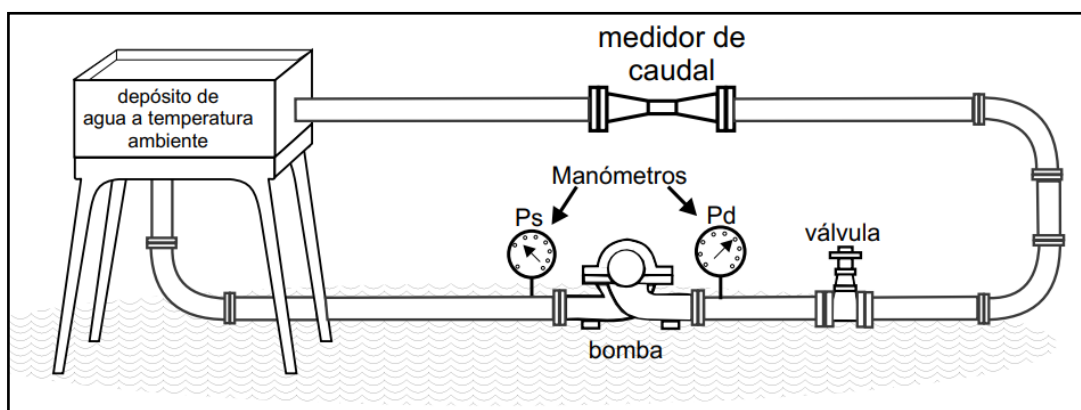


Figura 6. Banco de pruebas de una bomba.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

Siendo:

- “ P_s ” es la presión de succión en el flange de succión de la bomba;
- “ P_d ” es la presión de descarga en el flange de descarga de la bomba;
- La bomba en cuestión tiene un diámetro de rodete conocido;
- Existe una válvula ubicada poco después de flange de descarga de la bomba, con el propósito de controlar el caudal;
- Existe un medidor de caudal, sea el que fuera, para obtener los valores de caudal en cada instante.

1° - Se pone la bomba en funcionamiento, con la válvula de la descarga totalmente cerrada ($Q=0$); obteniéndose la presión entregada por la misma, que será igual a la presión de descarga menos la presión de la succión. Con esa presión diferencial, se obtiene la altura manométrica entregada por la bomba, a través de la fórmula:

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \quad (\text{Ec. 46})$$

Esa altura es normalmente conocida como la altura de “Shut-Off”, en otros términos, altura desarrollada por la bomba correspondiente a caudal cero, que se llamará “ H_0 ”.

2° - Se abre parcialmente la válvula, obteniéndose así un nuevo caudal, determinado por el medidor de caudal, que tendrá el nombre de “ Q_1 ” y se procede de manera análoga a la anterior, para determinar la nueva altura desarrollada por la bomba en una nueva condición que se llamará “ H_1 ”.

3° - Se abre un poco más la válvula, obteniéndose así un caudal “ Q_3 ” y una altura “ H_3 ”, de la misma forma anteriormente descrita.

4° - Se realiza el proceso algunas veces, obteniendo otros puntos de caudal y altura, con los que se graficará la curva, dónde en el eje de las abscisas o eje horizontal tendrá los valores de los caudales y en el eje de las ordenadas o eje vertical los valores de las alturas manométricas.

Normalmente, los fabricantes alteran los diámetros de los rodets para un mismo equipo, obteniéndose así que la curva característica de la bomba es una familia de curvas de diámetros de rodets (ver figura 7).

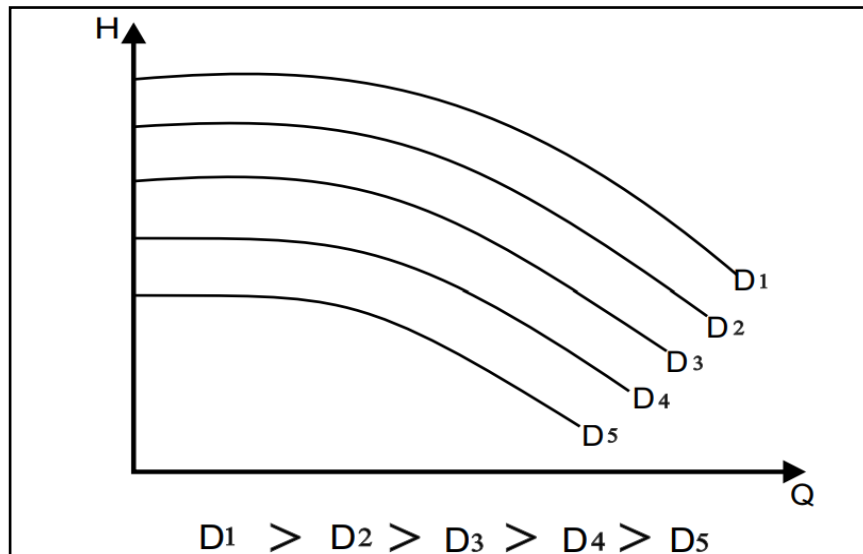


Figura 7. Gráfica de la bomba para distintos rodets.
Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

2.3.4.3. Curva de potencia consumida por la bomba.

En función de las características eléctricas del motor que acciona la bomba, se determina la potencia que está siendo consumida por ella, es decir, junto con el levantamiento de los datos para graficar la curva de caudal versus altura (Q v/s H), como se mostró previamente, en el panel de comando del motor que acciona la bomba que está siendo testada, se instalan instrumentos de medición eléctrica que entregan los datos para graficar la curva de potencia consumida versus el caudal (P v/s Q). Esas curvas son dibujadas en un gráfico dónde en el eje de las abscisas o eje horizontal, tenemos los valores del caudal (Q) y en el eje de las ordenadas o eje vertical los valores de la potencia consumida (P).

2.3.4.4. Cálculo de la potencia consumida por la bomba. Potencia hidráulica.

El trabajo útil realizado por una bomba centrífuga es naturalmente el producto del peso del líquido movido por la altura desarrollada. Si se considera este trabajo por unidad de tiempo, se tendrá la potencia hidráulica, que se expresa por la fórmula:

$$Ph = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{270}$$

(Ec. 47)

Siendo “Ph” la potencia hidráulica, en CV y “270” un factor de conversión.

2.3.4.5. Potencia consumida por la bomba o potencia de accionamiento

Para calcular la potencia consumida por la bomba, basta con utilizar el valor del rendimiento de la bomba, porque la potencia hidráulica no es igual a la potencia consumida, ya que existen pérdidas debidas al roce en el propio motor, en la bomba, etc. Para efectos de diseño y simulación se utilizará la siguiente fórmula.

$$Potencia\ consumida = \tau - (\tau_{pf} \cdot \omega)$$

(Ec. 48)

Siendo “ τ ” el torque global, “ τ_{pf} ” el torque de las piezas fijas y “ ω ” la velocidad angular.

2.3.4.6. Rendimiento.

Se conoce como rendimiento a la relación entre la potencia hidráulica y la potencia consumida por la bomba.

$$\eta = \frac{Potencia\ Hidráulica}{Potencia\ consumida}$$

(Ec. 49)

Entonces;

$$\eta = \frac{Ph}{P} \rightarrow \eta = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{P} \rightarrow P = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{\eta}$$

(Ec. 50)

Análogamente al desarrollo realizado para la potencia hidráulica, se puede escribir la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{270 \eta}$$

(Ec. 51)

2.3.4.7. Curva de rendimiento.

El rendimiento se obtiene de la división de la potencia hidráulica por la potencia consumida (ver figura 8).

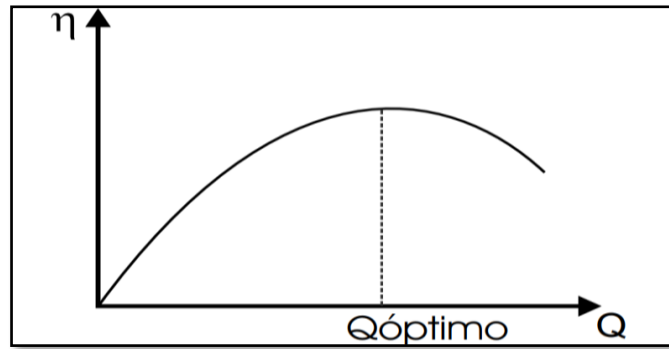


Figura 8. Curva de rendimiento de una bomba.
Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

Donde “Q” óptimo es el punto de mejor eficiencia de la bomba, para el rodete considerado.

2.3.4.8. Curvas de Iso-rendimiento.

Toda bomba presenta limitación en los rodetes, es decir, la familia de rodetes en una curva característica va desde un diámetro máximo a un diámetro mínimo. El diámetro máximo es consecuencia del espacio físico existente dentro de la bomba y el diámetro mínimo es limitado hidráulicamente, es decir, si se utilizan diámetros menores de los indicados en las curvas de las bombas, se tendrían problemas de operación en la bomba, tales como bajos valores de caudal, bajas alturas manométrica, bajos rendimientos, entre otros.

Las curvas de rendimiento de las bombas, que se encuentran en los catálogos técnicos de los fabricantes, se presentan en algunos casos graficadas individualmente, es decir, el rendimiento obtenido para cada diámetro de rodete en función del caudal. En otros casos, que son los más comunes, se grafican sobre las curvas de los diámetros de los rodetes (ver figura 9). Esta nueva presentación se basa en graficar sobre la curva de Q x H de cada rodete, el valor de rendimiento común para todos los demás; posteriormente se unen los puntos de ese igual rendimiento, formando así las curvas de rendimiento de las bombas. Esas curvas son también llamadas como curvas de Iso-rendimiento, representadas como sigue:

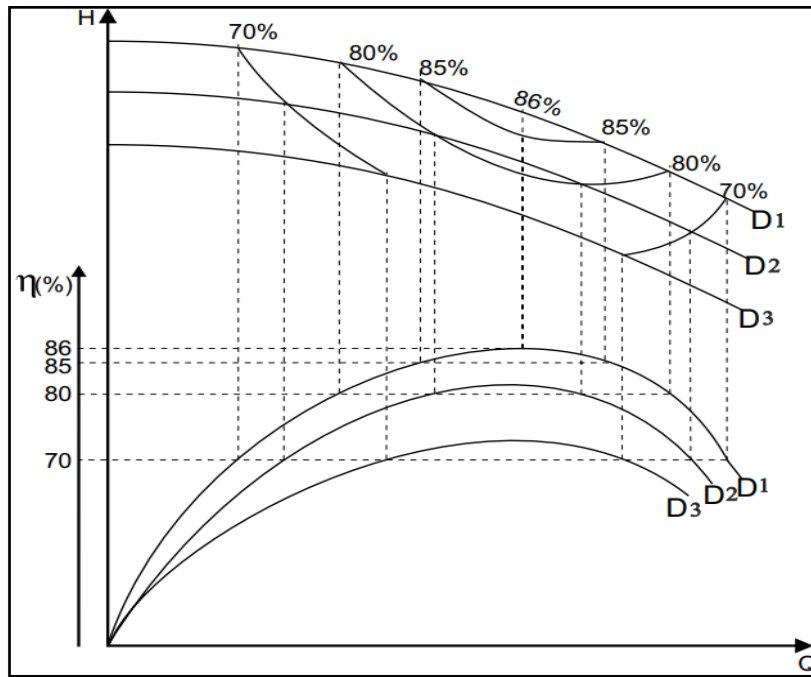


Figura 9. Curva de Iso-rendimiento de una bomba.
Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

2.3.4.9. Curva NPSH (Altura de aspiración neta positiva).

Actualmente, toda curva característica de una bomba, incluye la curva de NPSH requerido en función de caudal. Esta curva representa la energía mínima necesaria que el líquido debe tener, en unidades absolutas, en el flange de succión de la bomba, para garantizar su perfecto funcionamiento.

2.3.4.10. Consideraciones finales.

- Las curvas características presentadas por los fabricantes, son obtenidas en bancos de pruebas, bombeando agua limpia a temperatura ambiente.
- La curva (Q v/s H), representa la energía entregada expresada en altura de columna de líquido (ver figura 10).

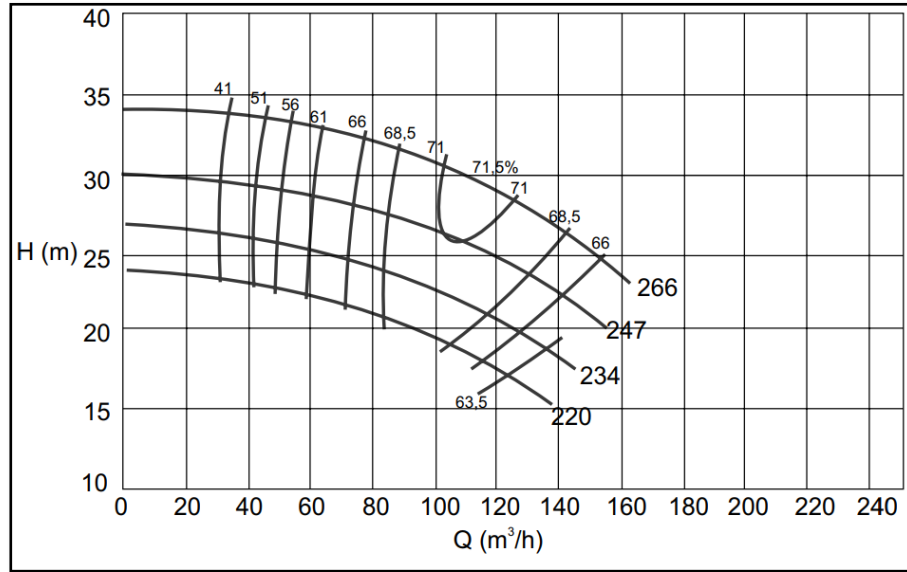


Figura 10. Curva de una bomba KSB Meganorm 80-250 - IV polos (1750 rpm) Q vs H.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

- La curva de (Q v/s NPSHr), representa la energía requerida en el flange de succión de la bomba (ver figura 11).

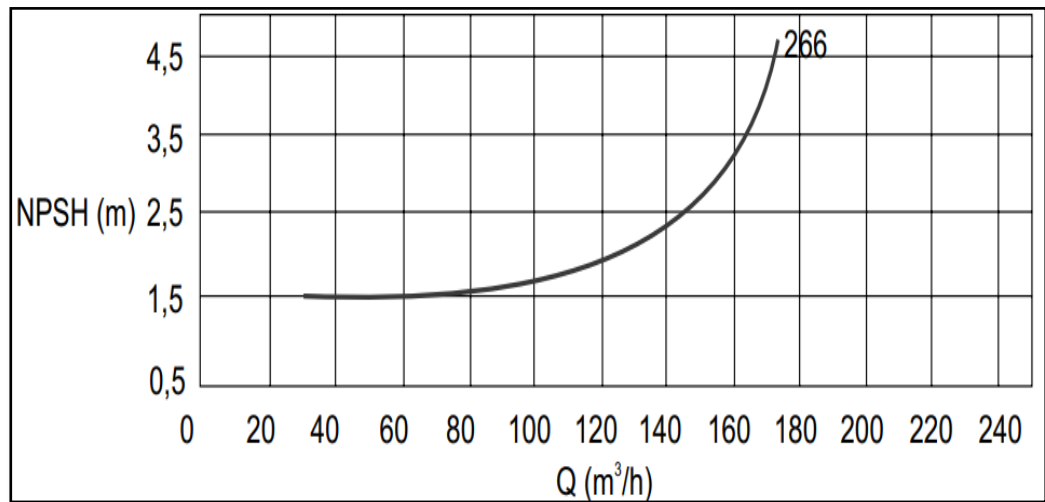


Figura 11. Curva de una bomba KSB Meganorm 80-250 - IV polos (1750 rpm) Q vs NPSH.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

- La curva de (Q v/s η), y la curva de (Q v/s P), representan los rendimientos y potencias consumidas por la bomba, cuando trabaja con agua (ver figura 12).

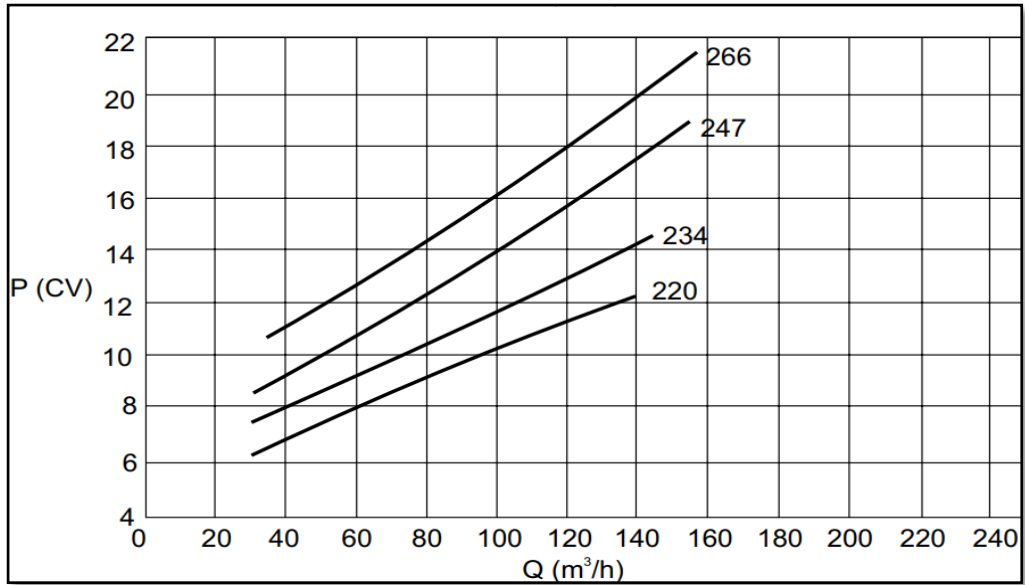


Figura 12. Curva de una bomba KSB Meganorm 80-250 - IV polos (1750 rpm) Q vs P.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

- Para el bombeo de fluidos con viscosidades diferente a la del agua, es necesario realizar una corrección a estas curvas para esta nueva condición de trabajo.
- Si se dibuja la curva del sistema en el mismo gráfico donde está la curva característica de la bomba, se obtiene el punto de operación normal, de la intersección de estas curvas (ver figura 13).

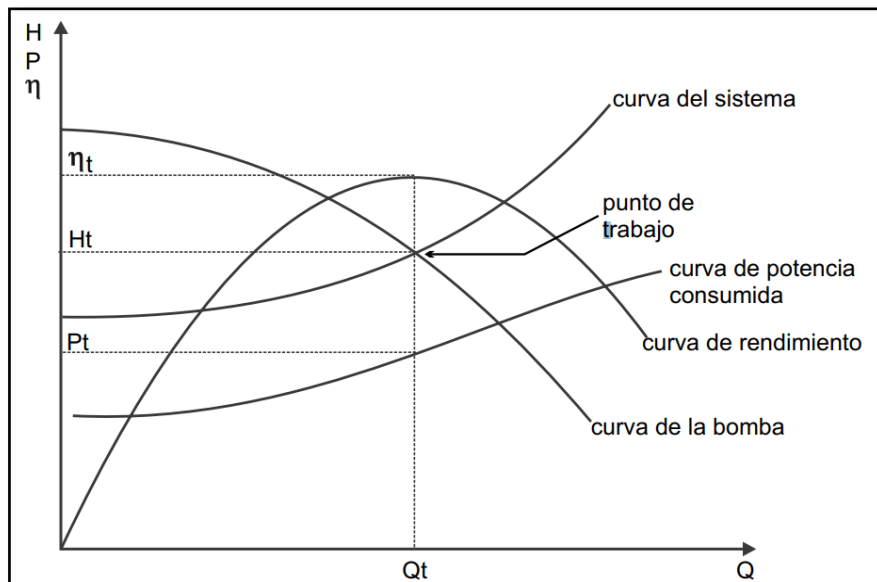


Figura 13. Punto de trabajo de una bomba.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

2.3.5. Bomba centrífuga y sus partes.

Las bombas son máquinas usadas para mover fluidos a través de tuberías, mediante diferentes transformaciones de energía. Existen muchos tipos de bombas y diferentes maneras

de clasificarlas. La clasificación más difundida es la que reúne a dos grupos principales de bombas: las bombas dinámicas y las bombas de desplazamiento positivo.

En las bombas de desplazamiento positivo la energía es periódicamente suministrada al fluido por la aplicación de una fuerza directa sobre un volumen de líquido, el cual incrementa su presión al valor requerido para moverse en la tubería de descarga. Por otro lado, en las bombas dinámicas la energía es continuamente suministrada al fluido el cual incrementa su velocidad, luego esa velocidad es reducida en la voluta o difusor de la bomba, produciendo un incremento de presión. La máxima exponente de este tipo de bomba es la bomba centrífuga.

Las bombas centrífugas son máquinas operadas hidráulicamente caracterizadas por su capacidad de transmitir energía a fluidos (en particular a líquidos) a través del trabajo de un campo de fuerzas centrífugas. Su objetivo principal es transferir fluidos a través de un aumento de presión. Las bombas centrífugas pueden tener diferentes estructuras, pero su principio de funcionamiento y características dinámicas de fluido son siempre las mismas. Esquemáticamente, las bombas centrífugas están formadas por un impulsor que gira dentro de la carcasa. El impulsor comprende una serie de palas, preferiblemente de diseño radial, que transmiten energía cinética al fluido que se bombea.

La carcasa está equipada con boquillas de succión y descarga para el fluido que se bombea. La boquilla de succión tiene un eje que corresponde con el eje de rotación del impulsor, mientras que la boquilla de descarga tiene un eje normal con respecto al eje del impulsor, pero aún está en el plano que pasa por el eje mismo. El fluido que se bombea entra continuamente a través de la boquilla de succión de la bomba en el centro del impulsor. A partir de ahí, se acelera en dirección radial hasta el borde del impulsor, donde drena hacia la carcasa.

La corriente de fluido se acelera por el empuje que las palas del impulsor, gracias a su curvatura, transmiten a la corriente misma. De esta manera, el fluido adquiere energía, principalmente en forma de un aumento en su velocidad promedio (energía cinética).

Dentro de la carcasa, el líquido se ralentiza adecuadamente gracias a la sección de crecimiento gradual en la dirección del movimiento. Un aumento de sección como este generalmente se obtiene diseñando la parte periférica de la carcasa (aireador de tubo) en forma de espiral con una sección transversal (generalmente una forma circular, trapezoidal o rectangular) que varía desde cero hasta el valor de la descarga de la boquilla de selección. De esta manera, la energía cinética retenida por el fluido se convierte en energía de presión. Sus principales componentes son (Ver figura 14):

Impulsor o rodete: Es la parte móvil de la bomba. Se encarga de impulsar el agua contenida en la carcasa. Está formado por una serie de álabes radiales y semiaxiales que giran dentro de una carcasa circular.

Carcasa: Su función es la de proteger a todos los mecanismos internos de la bomba, que hacen que esta pueda funcionar. Son fabricadas en hierro fundido cuando se emplean para el agua potable. Aunque también las podemos encontrar elaboradas de bronce o acero inoxidable cuando van a bombear líquidos corrosivos.

Eje: Es la parte de la bomba que se fija sobre el impulsor para que gire con la fuerza del motor. La posición de este cambiará si es una bomba horizontal o si es vertical.

Difusor: Junto con el impulsor o rodete están en el interior de la carcasa. Con su función consiguen mejorar el rendimiento de la bomba.

Entrada y Salida: Son los conductos por donde circula el agua. Conocidos como tubería de aspiración y tubería de impulsión.

Cojinetes: Son el soporte del eje. Esta parte debe fabricarse con sumo cuidado, ya que su correcta construcción permitirá que los elementos rotatorios puedan alinearse a la perfección.

Motor: Componente clave para el correcto funcionamiento de la bomba. Este es el que hace mover el eje y este a su vez al impulsor. Con esta fuerza se conseguirá el movimiento del líquido a tratar.

Sellos: actúan como un método para contener el fluido dentro de la bomba. Se instalan dentro del “área de sellado” y permite que el eje giratorio pase a través de una carcasa estacionaria. Permite que el eje giratorio de una bomba centrífuga asegure el área “húmeda” de la bomba, sin permitir que se escape el fluido.

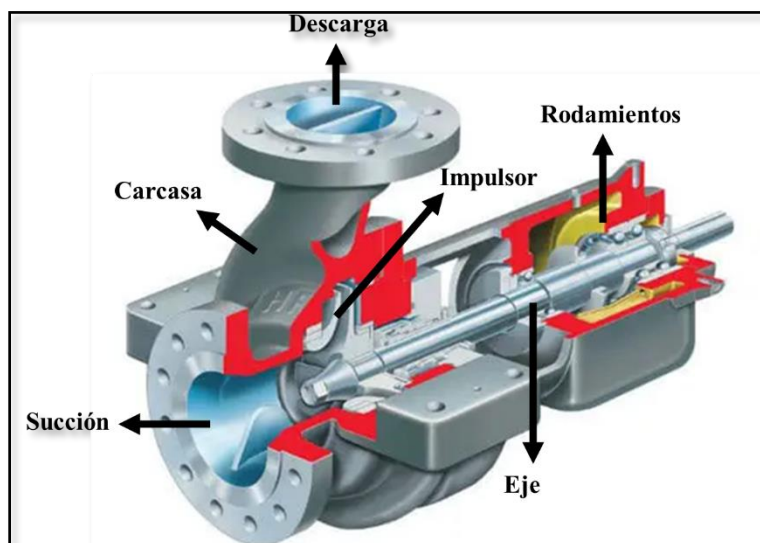


Figura 14. Partes de una bomba centrífuga.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

2.3.5.1 Tipos de Bombas Centrífugas

Según el movimiento del fluido al atravesar el impulsor, las bombas centrífugas se clasifican en (Ver figura 15): bombas **radiales**, en las cuales el fluido entra al impulsor en la dirección axial (paralelo al eje) y lo abandona en la dirección radial (perpendicular al eje), son bombas muy eficientes y versátiles y son las bombas centrífugas más comunes; también se encuentran las bombas **axiales**, en las cuales el fluido entra al impulsor en la dirección axial y lo abandona en la misma dirección. El flujo es paralelo al eje en todo momento, son muy eficientes a la hora de elevar grandes caudales a poca altura; por último, están las **mixtas**, en las cuales el fluido entra al impulsor en la dirección axial y sale con componentes en la dirección radial y axial.

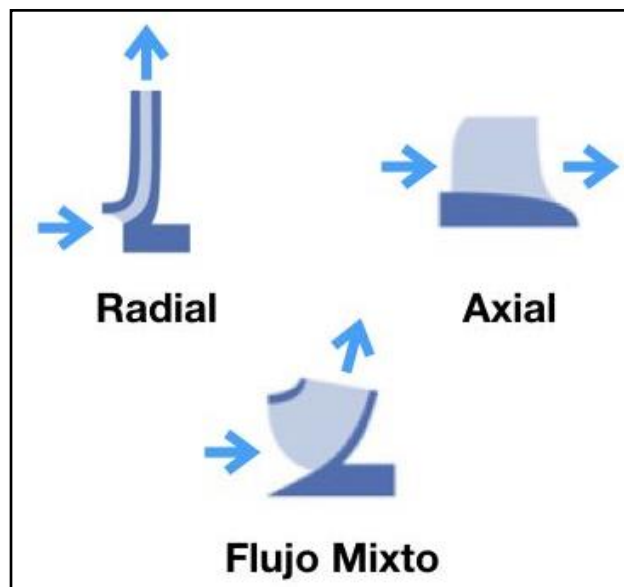


Figura 15. Tipos de bombas centrífugas según el movimiento del fluido.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

2.3.5.2 Impulsores y sus tipos.

Los impulsores son el corazón de la bomba, ya que son los elementos por medio de los cuales se transmite la energía al fluido. Están compuestos por un cubo que lo une al eje y por los alabes que son los elementos que imparten velocidad o energía cinética al líquido que se bombea. Dependiendo del diseño los impulsores también poseen un disco posterior que refuerza los alabes, que sirve para separar el área de succión del área de descarga y un protector en la parte frontal que se denomina gualdera. Un área importante para el desempeño del impulsor es la zona del ojo del impulsor, que es por donde el fluido entra a la bomba (Ver figura 16). Los materiales de fabricación pueden ser diversos dependiendo de la aplicación para

la cual fueron diseñados, variando desde fundición de hierro, acero al carbono, acero inoxidable, bronce, latón, aluminio y hasta los termoplásticos.

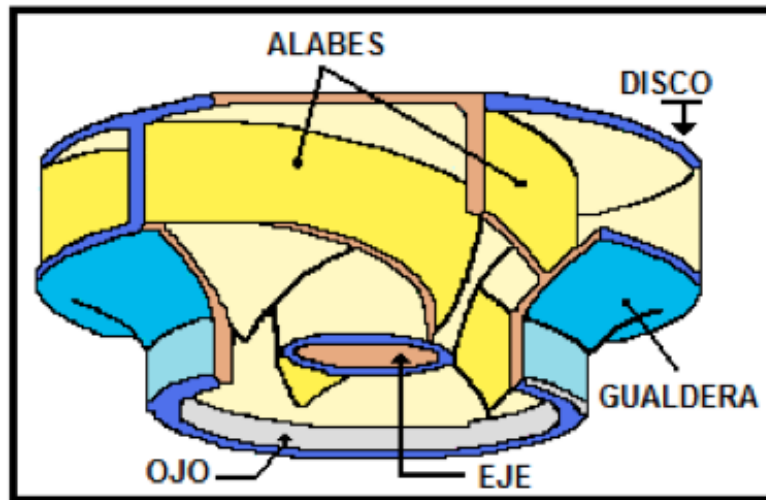


Figura 16. Diagrama en corte de un impulsor cerrado.

Fuente: Manual de entrenamiento KSB (2002).

El número de alabes usado en cada impulsor de las bombas comerciales, por lo general, está entre dos y siete dependiendo de la aplicación. Por ejemplo, en impulsores para el manejo de sólidos, donde es necesario que los sólidos pasen por el cuerpo de la bomba sin atascarse, se utilizan solamente de dos a tres alabes por impulsor. Cuando se requiere mayor Eficiencia y flujo más uniforme y estable desde el punto de vista hidráulico, se utilizan de cinco a siete alabes por impulsor. Los impulsores se pueden fabricar con succión simple o doble succión.

Existen diferentes diseños, definiciones y configuraciones para clasificar los impulsores, como por ejemplo por el flujo que circula en ellos, impulsores de flujo radial, impulsores de flujo mixto e impulsores de flujo axial. La clasificación más utilizada es la comercial que utiliza el punto de vista mecánico, que fundamentalmente consta de tres diseños básicos de impulsores, los impulsores abiertos, los semiabiertos y los cerrados.

En los impulsores abiertos los alabes están libres, extendiéndose desde el cubo que los soportan. Estos impulsores son usados para manejar mezclas de sólidos y líquidos, debido a que se disminuye la posibilidad de que los elementos sólidos se atasquen en los pasajes formados por los alabes. También su uso está generalizado en bombas pequeñas donde la Eficiencia no es el elemento determinante para la selección, en este tipo de bomba los impulsores permiten un aprovechamiento máximo a un mínimo costo.

Por no tener los alabes ningún tipo de cubierta las áreas de succión y de descarga se encuentran en contacto permanente, por lo que no se requiere ningún elemento adicional para

equilibrar las fuerzas axiales. Al no poseer disco posterior no existen superficies que pudiesen reaccionar con la presión hidráulica para generar las fuerzas axiales. La desventaja básica del impulsor abierto es que genera una eficiencia global menor en la bomba.

En bombas centrífugas más elaboradas se evita el uso de impulsores abiertos (Ver figura 17) debido a que los alabes están expuestos a mayor esfuerzo hidráulico y su eficiencia resulta baja comparada con otros diseños, al menos 5% por debajo de una bomba con impulsor semiabierto con las mismas características.

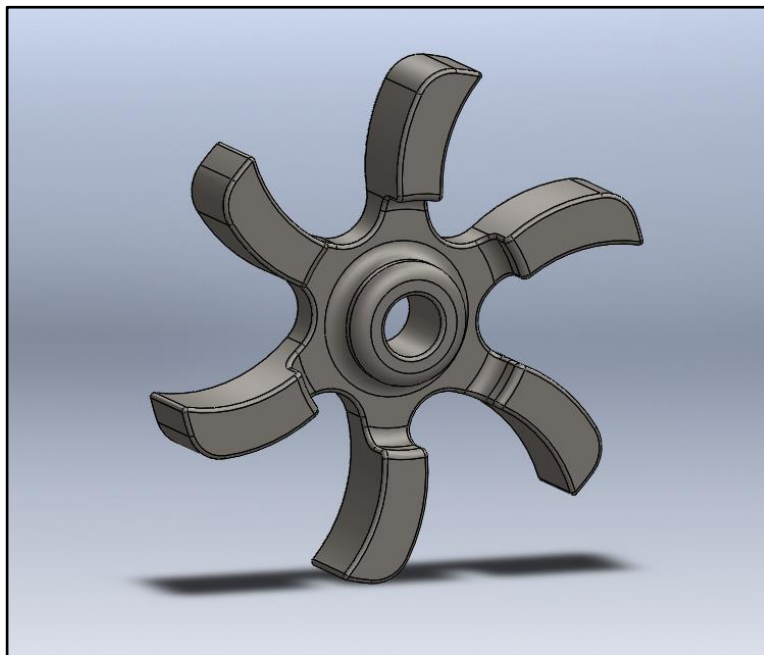


Figura 17. Impulsor abierto.

Fuente: Figueroa (2023).

En los impulsores semiabiertos los alabes están soportadas por un plato posterior, pero están libres en la parte frontal (Ver figura 18). Son usados en las bombas de procesos de aplicación general y en servicios donde se requiere el manejo de sólidos. En bombas de baja y media energía son más eficientes que otros diseños de impulsores debido a que la eliminación de la tapa frontal o gualdera reduce la fricción contra la voluta, por esta razón mantienen un equilibrio entre el costo y el rendimiento. Se usan en bombas que contienen pequeñas cantidades de sólidos en suspensión

En los impulsores semiabiertos para lograr equilibrar las fuerzas axiales, por lo general se perforan agujeros en el impulsor, lo cual comunica la zona de succión con la zona de descarga generando el balance de las presiones. Estos agujeros afectan en algo la eficiencia del sistema, pero sin llegar a tener un impacto importante. En equipos de mayor energía, como es

el caso de las bombas centrífugas multietapas se utilizan otros dispositivos para lograr el balance de fuerzas axiales como es el caso de los pistones para el balance axial.

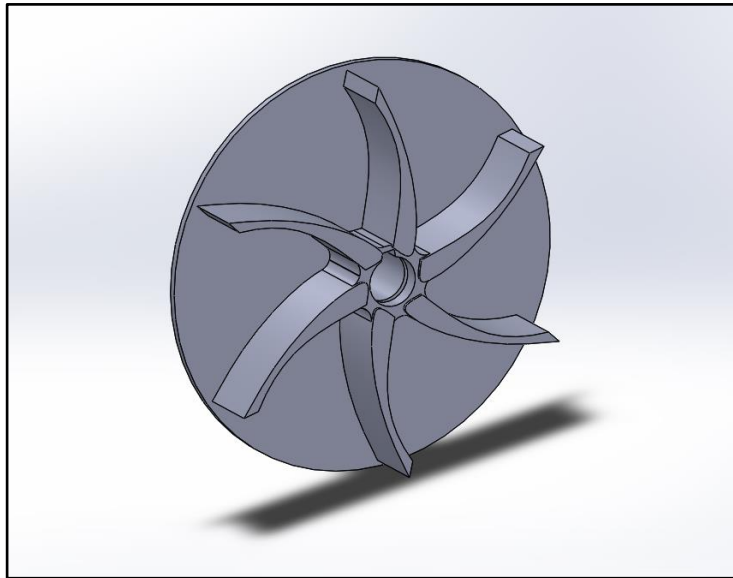


Figura 18. Impulsor semiabierto.

Fuente: Figueroa (2023).

En los impulsores cerrados los álabes están cubiertos con un plato frontal y uno plato posterior (Ver figura 19). Este impulsor resulta ser más conveniente para bombas que desarrollan altas presiones, ya que las tapas ayudan a separar el área de succión del área de descarga, permiten mayor control de la dirección del fluido bombeado, disminuyen el deslizamiento de fluido entre la zona de alta presión y la zona de baja presión y mejoran la Eficiencia general de la bomba. Los impulsores cerrados son usados en bombas multietapas y de alta energía donde se requiere mayor control del flujo. Por su complejidad en cuanto a configuración resultan más costosos en su fabricación que los impulsores abiertos y semiabiertos. El tipo de impulsor cerrado es el tipo de impulsor más utilizado para bombas centrífugas que manejan líquidos sin sólidos en suspensión.

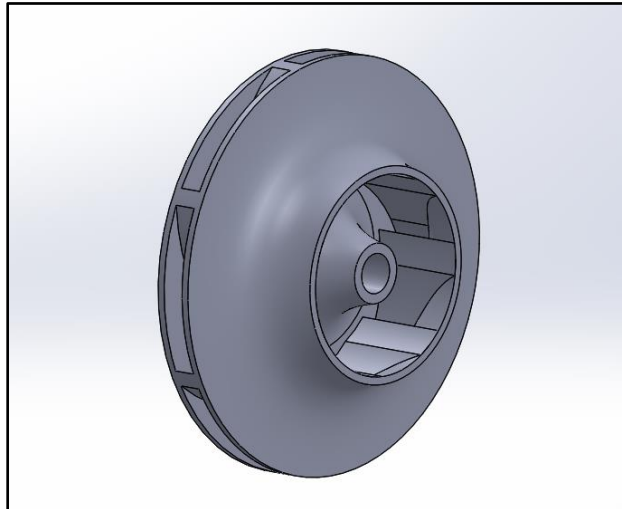


Figura 19. Impulsor cerrado.

Fuente: Figueroa (2023).

2.3.6 Ingeniería inversa.

La ingeniería inversa o reingeniería es un proceso que consiste en la regeneración, reconstrucción o digitalización de una pieza basada en una muestra que sufrió algún tipo de desgaste, tomando como referencia las dimensiones, dónde y cómo trabajan las piezas y manuales de equipos. Para el dimensionamiento se utilizan instrumentos especiales como el vernier, micrómetros exteriores, interiores y de profundidades, calibrador de alturas y patrones de comparación, escáneres 3D, entre otros instrumentos.

El escaneado 3D puede servir para conseguir un modelo de cualquier pieza en muy poco tiempo, con el fin de reproducirla o rediseñarla. Esto ha supuesto un gran avance en el terreno del modelado de piezas para la industria, en su parametrizado y en la elaboración de planos acotados.

La ingeniería inversa mediante el escaneo 3D se hace necesaria ya que, posibilita la reproducción inmediata de repuestos para bombas que difícilmente estarán disponibles o que ya no lo están., además, es común que se extravíen los planos de diseño, también es necesario adaptarse a las nuevas condiciones de operación. Algunas ventajas de este método son:

- Su alto nivel al detalle, pues es posible obtener una alta resolución que permite modelar superficies de forma libre lo más detallado posible.
- La versatilidad, ya que mide cualquier pieza sin importar su tamaño, forma, material, acabado de superficie y complejidad por medio de tecnologías ópticas, láseres avanzados y volúmenes de escaneado ilimitados.
- Es posible obtener una malla instantánea en diversos softwares de diseño a medida que se escanea la pieza en tiempo real.

- Los tiempos de diseño y producción son muy reducidos en comparación con otros métodos de reconstrucción.

2.4. Bases Legales.

La presente investigación es sustentada por la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), ente encargado de velar por la estandarización y normalización bajo lineamientos de calidad en Venezuela, COVENIN establece determinados requisitos para la elaboración de procedimientos, materiales, productos, actividades y demás aspectos que estas normas rigen. En esta comisión participaron entes gubernamentales y no gubernamentales especialistas en un área. La norma COVENIN 1561:1997 nombrada “BOMBAS HIDRAULICAS CENTRIFUGAS (2° Revisión) establece los requisitos mínimos que deben cumplir las bombas hidráulicas centrifugas, tanto horizontales como verticales, en cuanto a sus materiales, diseño y fabricación. La norma se aplica para sistemas diseñados para el bombeo de agua a temperatura ambiente.

Por otro lado, la norma 643 de la mencionada COVENIN hace referencia meramente a las curvas de funcionamiento de las bombas hidráulicas centrifugas, contemplando los métodos de ensayo para determinar caudal, altura, velocidad de rotación, potencia y rendimiento en las bombas hidráulicas centrifugas, así como también se ocupan de estandarizar el ensayo hidrostático para las mismas y el ensayo de funcionamiento continuo para motobombas con motor de combustión interna.

Del mismo modo en cuanto a las normas internacionales, la Organización Internacional de Clasificación (ISO), una organización no gubernamental cuya principal actividad es la elaboración de normas técnicas de vigencia internacional, destaca la norma "ISO 5199:2002 Especificaciones técnicas para bombas centrífugas Clase II ", donde se incluyen las características de diseño relativas a la instalación, el mantenimiento y la seguridad de este tipo de bombas, incluyendo la bancada o placa de base, los acoplamientos y las tuberías auxiliares, pero no especifica ningún requisito para el motor, distinto de los relacionados con su potencia nominal.

2.5. Definición de términos.

Bomba Centrífuga: Las bombas son máquinas hidráulicas que transfieren energía al fluido con la finalidad de transportarlo desde un punto a otro. Este tipo de bomba tiene por principio de funcionamiento la transferencia de energía mecánica hacia el fluido bombeado en forma de energía cinética. A su vez, esta energía cinética es transformada en energía potencial (energía de presión) siendo ésta su característica principal. El movimiento rotatorio de un rodete inserto en una carcasa (cuerpo de la bomba) es el órgano funcional responsable por tal transformación.

Banco de prueba: Un banco de pruebas de es una máquina hidráulica que comprueba la presión hidráulica, el caudal y la potencia total de las bombas hidráulicas en los sistemas hidráulicos. También puede determinar el desplazamiento de la bomba hidráulica y determinar si la bomba hidráulica funcionará en un sistema hidráulico antes de su construcción.

CAD: El Diseño Asistido por Computadora es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y diseñadores. Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo 2D y de modelado 3D. Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos.

CFD: La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos.

Flange: Una brida, flange o flanche es una pieza de la línea de arreglo del sistema la cual se encarga de unir dos piezas (principalmente cañerías y válvulas), a través de pernos, permitiendo en un futuro desarmar la línea sin necesidad de procedimientos destructivos, permitiendo un montaje y desmontaje más accesible, económico y seguro.

Flujo Axial: Se considera de este tipo cuando la dirección del fluido bombeado es paralela en relación al eje de rotación.

Flujo Radial: Se considera cuando el flujo a la salida del rodete tiene dirección perpendicular al mismo.

Hidráulica: Es la rama de la física que estudia el comportamiento de los líquidos en función de sus propiedades específicas. Es decir, estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos. Todo esto depende de las fuerzas y las condiciones a las que esté sometido el fluido, relacionadas con la viscosidad de este.

Impulsor: Un impulsor es un disco giratorio de hierro o acero con álabes en una bomba centrífuga. El impulsor transfiere energía desde el motor que impulsa a la bomba al líquido que se va a bombear, sin más que acelerar radialmente el líquido hacia fuera desde el centro de giro. La velocidad alcanzada por el impulsor se transforma en presión cuando el movimiento radial del líquido se ve confinado por la carcasa de la bomba.

Tensión de corte: La cortadura (cizalladura o tensión cortante) es el esfuerzo que soporta una pieza cuando sobre ella actúan fuerzas contenidas en la propia superficie de actuación.

Voluta: Se denomina voluta a la cámara o carcasa en forma de espiral de una bomba centrífuga dentro de la cual gira el rodete y que recoge el fluido propulsado radialmente por éste, dirigiéndolo hacia la salida.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de la Investigación.

Con el propósito de lograr dar una visión más técnica y metodológica a la investigación, se buscará desarrollar y definir lo que es un marco metodológico, que según Tamayo y Tamayo (2003, p.37) lo define como “El proceso, que, mediante el método científico, procura obtener información relevante para entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento”. Es importante señalar que la investigación, dada a su propia naturaleza, exige el tratamiento de algunos elementos. En este caso, se utilizarán métodos sustentados por diversos autores para resolver el problema planteado y que resulten convenientes a las metas que se persiguen; ya que la conformación de estos tiene que estar en perfecta concordancia con los objetivos de la investigación.

Basado en esta definición, en el presente capítulo se presentará la descripción de la metodología utilizada en la investigación, formada por los siguientes tópicos: tipos, diseño de la investigación, nivel de investigación, fases y la descripción de cada una para el desarrollo de la misma. Su finalidad, es una investigación aplicada, que busca estudiar los resultados obtenidos del comportamiento del campo de flujo y los fenómenos presentes en el funcionamiento de una bomba centrífuga.

3.2. Tipo de Investigación.

El marco metodológico presenta la descripción de la naturaleza de la presente investigación. Su finalidad, es una investigación aplicada, que busca estudiar los resultados obtenidos del comportamiento del fluido, los fenómenos presentes y los datos resultantes del funcionamiento de una bomba centrífuga, específicamente en la obtención de la curva de rendimiento en la bomba anteriormente seleccionada.

La presente investigación se identifica y se ajusta de acuerdo a los tipos de diseño de investigación, concluyéndose que el mismo corresponde a un proyecto factible, puesto que busca proponer una solución a un problema práctico a corto plazo y consiste en obtener las curvas de carga y rendimiento de una bomba centrífuga restaurada por la empresa Test Pump Venezuela, C.A.

Con respecto a los proyectos factibles, la UPEL (2016) señala que se trata de una propuesta de acción para resolver un problema práctico o satisfacer una necesidad. Es indispensable que dicha propuesta se acompañe de una investigación, que demuestre su factibilidad o posibilidad de realización. Es decir, se realiza una propuesta con el fin de resolver problemas prácticos acompañado de una investigación que manifieste su factibilidad.

3.3. Diseño de la Investigación.

Teniendo en cuenta que Arias (2006), expone el diseño de la investigación, como la estrategia general, que adopta el investigador para responder al problema planteado; definido por el origen de los datos, tanto primarios, en diseños de campo como secundarios en estudios documental y la manipulación o no de las condiciones en las cuales se realiza el estudio; se puede definir el presente trabajo como investigación de campo, que según la UJAP (2020), es aquel dónde:

“Los datos serán recogidos en forma directa de la realidad; en este sentido se trata de investigaciones a partir de datos originales o primarios. Sin embargo, se aceptarán también estudios sobre datos censales o muestrales no recogidos por el estudiante, siempre y cuando se utilicen los registros originales con los datos no agregados; o cuando se trate de estudios que impliquen la construcción o uso de series históricas y, en general, la recolección y organización de datos publicados para su análisis mediante procedimientos estadísticos, modelos matemáticos, econométricos o de otro tipo.” (p.33)

La presente investigación se considera de campo, ya que los datos recolectados para determinar la curva de rendimiento de las bombas centrífugas, así como cualquiera de sus gráficos de trabajo y funcionamiento, son obtenidos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna y sin intervenir o alterar las condiciones existentes de la simulación o el banco de prueba correspondiente.

De igual manera, la investigación se encuentra apoyada a su vez de un diseño documental, ya que para la misma recolecta datos obtenidos por otros investigadores con el fin de adquirir nuevos conocimientos. En relación a esto, Arias (2006) dicen que el diseño documental en un “proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas” (p. 27).

Es por esto que la investigación presenta un diseño apoyado en una investigación de campo y documental, ya que se recolectaron datos directo del sujeto de estudio y de fuentes documentales secundarias como registros previos que existen en la planta sobre el caso de estudio.

3.4. Nivel de la Investigación.

El nivel de investigación es considerado el grado de dificultad o la profundidad con la cual se aborda un objeto o fenómeno. Arias (2006), define las investigaciones explicativas como las que “su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables” (p. 23).

Está investigación posee un nivel explicativo ya que en ella se desarrolla el procedimiento para determinar el rendimiento de una bomba centrífuga, estudiando las variables, condiciones necesarias y la combinación de parámetros que definen el comportamiento de esta.

3.5. Población y muestra.

La población Arias (2006), la define como la composición de todos los elementos a ser estudiados y a quienes podrán ser generalizados los resultados de la investigación, una vez concluida ésta, para lo que es necesario que la muestra con la cual se trabaje sea representativa de la población. Por ende, la población consistió en los distintos tipos de bombas centrífugas seleccionadas de acuerdo al fluido con el que trabajan las mismas.

Por otro lado, la UPEL (2016) determina que la muestra es: "un subgrupo o subconjunto dentro de la población, que puede ser estudiado para investigar las características o el comportamiento de los datos de población". Por lo tanto, la muestra se limita a todas aquellas bombas a las que se les presta mantenimiento y servicio en la empresa TESTPUMP VENEZUELA C.A.

3.6. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.

Arias (2006), define como recolección de datos a la elaboración de un plan detallado de procedimientos que permite reunir datos para un propósito específico, el cual, determina: ¿Cuáles son las fuentes de donde se obtendrán los datos?, ¿En dónde se localizan tales fuentes?, ¿A través de qué medio o método vamos a recolectar los datos? y una vez recolectados, ¿de qué forma vamos a prepararlos para que puedan analizarse y respondamos al planteamiento del problema?

En ese sentido, las técnicas que se utilizaron fueron:

- **Observación:** Consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos y situaciones observables. En el trabajo de grado en desarrollo, se aplicaron la observación directa para recaudación de datos, ya que es una herramienta fundamental por el tipo y diseño de investigación, en donde la información es captada directamente en sitio.
- **Revisión documental:** Es una técnica en la cual se recurre a información escrita, ya sea bajo la toma de datos que pueden haber sido producto de menciones hechas por otros o como texto que en sí mismo constituyen los eventos de estudio. Para esta investigación se aplicó la técnica de revisión documental, consultando textos asociados

a los sistemas de información bajo ambiente web, de igual forma, fue estudiada la gestión electrónica de documentos, con el fin de obtener una base de conocimiento.

- **Entrevista estructurada:** La entrevista estructurada se prepara con preguntas específicas las cuales se centran en que el entrevistado conteste de forma precisa a la pregunta, sin divagar en sus respuestas. Esto con la finalidad de obtener información por medio del dialogo entre dos personas. En esta técnica, el investigador prepara con anticipación la ficha, estructurándola él mismo por medio de preguntas fijas y ordenadas que permiten que se dé la unificación de criterios. La información se obtuvo de un especialista vinculado con el área de estudio para la recolección de datos importantes para la realización del diseño y simulación de las bombas centrífugas. Según Arias (2006), la entrevista estructurada “Es lo que se realiza a partir de una guía prediseñada que contiene las preguntas que serán formuladas al entrevistado” (p. 33).

El autor mencionado establece que en la investigación se dispone de diversos tipos de instrumentos para medir variables de interés que en algunos casos pueden llegar a combinarse con varias técnicas de recolección de datos. Para efectos de esta investigación se seleccionaron los siguientes instrumentos:

- **Las listas de control:** Las cuales; “Permiten orientar la observación y obtener un registro claro y ordenado de todo cuanto acontece. Sirven para sistematizar los distintos niveles de logro de cada investigado, mediante el uso de proposiciones, ítems, indicadores y de una escala cualitativa previamente seleccionados.” Palella Y Martins (2012, p. 126).
- **Diario de Campo:** Es un instrumento que permite ir recopilando información progresivamente de determinado fenómeno, permitiéndole al investigador un monitoreo permanente del proceso de observación.
- **Ficha técnica:** La ficha técnica es un documento que describe las características principales, las propiedades, las especificaciones técnicas, la composición y las aplicaciones de un equipo determinado, aportando información detallada sobre los aspectos del mismo. La información se presenta en tablas, gráficos, o detallada numéricamente.
- **Escáner 3D:** El escaneado 3D consiste en la toma de datos de un objeto mediante un sistema óptico para obtener una malla o nube de puntos tridimensional y convertirlo en un archivo digital manipulable con un software específico de CAD 3D.

3.7. Técnicas de análisis de resultados.

Según Arias (2006), en este punto se describen las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos que se obtengan. Por lo tanto, siguiendo ese mismo orden de ideas, es necesario establecer que, una vez obtenidos los datos, se procedió a organizarlos y tabularlos para posteriormente introducirlos al software correspondiente de simulación y de esa forma no solo modelar la bomba que se está estudiando, sino que también se pudo obtener la gráfica de carga y rendimiento del mismo equipo.

De igual forma se empleó el análisis FODA, el cual consiste en realizar una evaluación de los factores fuertes y débiles que, en su conjunto, diagnostican la situación interna de una organización, así como su evaluación externa, es decir, las oportunidades y amenazas. Se utiliza esta técnica para profundizar en el estudio de la situación en la cual se encuentra la investigación analizando sus características internas y su situación externa.

3.8. Fases metodológicas.

A continuación, se presentan las fases de la investigación, donde se describen el procedimiento a seguir para cumplir con los objetivos específicos planteados en el capítulo I de la presente investigación.

Fase I: Diagnóstico de la situación actual de la aplicación de la ingeniería inversa para talleres de reparación de bombas centrífugas industriales.

En la primera fase del trabajo de investigación se planteó como objetivo diagnosticar cómo se utiliza y señalar la importancia que tiene la aplicación de la ingeniería inversa en la restauración de las bombas centrífugas. Para esto se toma como base de datos los argumentos expuestos por los técnicos encargados de aplicar la ingeniería inversa a la respectiva bomba, mediante un escáner en 3D que identifica los puntos previamente ubicados en la pieza a escanear. Además, también se toman en cuenta las múltiples bases teóricas obtenidas por medio de diversas publicaciones que se consideran pertinentes para entender la naturaleza de la investigación.

Fase II: Selección de diversos tipos de bombas centrífugas de acuerdo al fluido con el que trabaja e identificación de sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD), haciendo uso de técnicas de ingeniería inversa.

Para esta segunda fase se seleccionan diversos tipos de bombas centrífugas restauradas, las cuáles se clasifican de acuerdo al fluido con el que trabajan, con el objeto de tener una amplia población en la cual basar un modelo probabilístico. En esta fase también se usan los

datos obtenidos mediante la ingeniería inversa, que consiste en un escaneo 3D de la pieza a restaurar. Esto se hace para generar un modelado en 3D por medio de la herramienta CAD (Diseño Asistido por Computadora) SolidWorks. Además, también es necesario utilizar datos obtenidos de los manuales de las bombas en cuestión y otros trabajos previos en los que usan este modelo.

Fase III: Simulación del campo de flujo de la bomba centrífuga seleccionada mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) con la finalidad de obtener el gráfico de las curvas de carga y rendimiento.

En base a las condiciones de diseño y a las condiciones de funcionamiento, se toman los modelos hechos previamente, se le asignan valores predeterminados y se simula el campo de flujo en funcionamiento. Todo esto con la ayuda de la herramienta de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) SolidWorks® Flow Simulation, de esta manera se puede obtener una serie de datos en el comportamiento del fluido y del equipo que incluyen los gráficos de las curvas de carga y rendimiento.

Fase IV: Comparación de la curva característica original de las bombas centrífugas con las obtenidas mediante herramientas de CFD.

En la cuarta fase de este trabajo de investigación, se presentan los resultados obtenidos por medio del estudio, análisis, diseño, parametrización y simulación del campo de flujo de la bomba seleccionada. Esto con fin de generar tablas de datos, gráficas y simulaciones que permitan cuantificar los resultados obtenidos para comparar con los valores reales para el mismo equipo y determinar la desviación existente.

Fase V: Análisis de posibles causas de la diferencia entre los resultados obtenidos.

Por último, en la quinta fase, con los resultados obtenidos se espera determinar las causas más importantes que justifiquen el porcentaje de desviación de los parámetros en ambas condiciones de estudio.

3.9. Viabilidad de la investigación.

La confiabilidad se refiere al nivel de exactitud y consistencia de los resultados obtenidos al aplicar las técnicas e instrumentos de recolección de datos por segunda vez en condiciones tan parecida como sea posible. Este apartado, en este caso, se ve íntimamente relacionado con los softwares seleccionados para la simulación del fluido, la curva de rendimiento y el modelado de la bomba centrífuga seleccionada que corresponderían a Solidworks®. Tomando en cuenta que dentro de este software es posible seleccionar la norma que se desea usar, ya se ANSI, ISO, DIN, entre otras, esto garantiza la igualdad de resultados aplicados en igualdad de condiciones.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

El presente capítulo explica de manera clara y concisa el desarrollo de la investigación para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos planteados anteriormente, abarcando de manera individual cada uno de ellos. Otorgándole las propiedades necesarias a los casos estudio de acuerdo con distintos caudales, presiones y velocidad para generar la curva característica en diversas bombas centrífugas seleccionadas y evaluar los resultados de las simulaciones.

4.1 Diagnóstico de la situación actual de la aplicación de la ingeniería inversa para talleres de reparación de bombas centrífugas industriales.

4.1.1 Aplicación de entrevista estructurada a especialista.

Cómo parte importante para la realización del proyecto se inició con el diagnóstico del proceso de estudio y la recolección de datos por medio de los distintos instrumentos que fueron tomados en cuenta por el investigador, se inició realizando una entrevista estructurada a Hendry Figueroa (Ver cuadro 1), especialista y Gerente de servicios generales en la empresa TestPump Venezuela C.A.

Cuadro 1: Guión de entrevista

N°	Guión de entrevista
1	Desde su óptica, ¿cómo se aplica la ingeniería inversa al proceso de restauración y/o reparación de bombas centrífugas industriales?
Respuesta	Al momento de realizar un mantenimiento se procede al desmontaje, luego a la identificación del material, y posteriormente se aplica la ingeniería inversa en el proceso de medición e identificación de las propiedades geométricas del equipo, permitiendo reconocer sus medidas con total exactitud mediante las herramientas correspondientes de escaneo 3D para el posterior modelado. Ahorrando a la empresa tiempo y trabajo que resulta crucial para satisfacer las necesidades del cliente.
2	De acuerdo a su experiencia en el ramo hidráulico, ¿qué herramientas y equipamientos se utilizan para llevar a cabo el proceso de ingeniería inversa en la identificación de fallas y la reconstrucción de piezas y componentes de la bomba?

Respuesta	En la empresa TESTPUMP C.A. para el modelado 3D de los equipos se cuenta principalmente con el escáner 3D HandySCAN de AMETEK, debido a su fácil manejo, confiabilidad, precisión y a la compatibilidad con los programas utilizados. Por otra parte, para la identificación del material de las máquinas se utiliza un analizador de aleaciones, específicamente el modelo XRF portátil DELTA de la marca OLYMPUS.
3	Desde su experiencia, ¿cómo se verifican las curvas de carga y rendimiento de una bomba centrífuga luego de realizar cualquier servicio de reparación y/o mantenimiento?
Respuesta	Al realizarle un servicio a cualquier bomba, se realiza de forma impecable y sin alterar sus propiedades mecánicas, geométricas o materiales para seguir teniendo de referencia las curvas características proporcionadas por el fabricante original. Debido a que la utilización de un banco de pruebas se hace muy costosa y no resultaría rentable para la empresa.
4	Desde su punto de vista, ¿cómo influye la viscosidad de un fluido en el funcionamiento de una bomba centrífuga?
Respuesta	La viscosidad de un fluido tiene un impacto significativo en el funcionamiento de una bomba centrífuga. Por ejemplo, a medida que la viscosidad aumenta, la eficiencia de la bomba disminuye, se producen mayores pérdidas de carga debido a la fricción interna del fluido, tiene más consecuencias el fenómeno de la cavitación y aumenta la altura neta positiva en la aspiración (NPSH), entre otras cosas.
5	Desde su experiencia, ¿cuáles son los principales tipos de bombas centrífugas con los que trabaja la empresa, de acuerdo a su fluido de trabajo?
Respuesta	De acuerdo con el fluido de trabajo, se suelen realizar servicio a bombas centrífugas de diversas industrias, entre las que destacan las petroquímicas, alimentación y bebidas, y tratamiento de aguas residuales.

Fuente: Figueroa (2023).

Con los datos que se obtuvieron por medio de los instrumentos de recolección de datos, se procedió a aplicar las distintas técnicas de análisis de resultados para abordar el problema.

4.1.2. Matriz FODA.

Con esta técnica se evaluaron las distintas variables relacionadas con la zona de estudio. Variables tanto internas como externas, así mismo se plantearon las distintas estrategias aplicadas según las variables expuestas (Ver cuadro 2).

Cuadro 2: Matriz FODA.

Matriz FODA	Fortalezas	Debilidades
	Precisión y detalles gracias al CFD	Conocimiento técnico requerido
	Ahorro de costos frente a las otras opciones de estudios (Banco de pruebas)	Falta de demanda por parte de los clientes
Oportunidades	Estrategias FO	Estrategias DO
Innovación y desarrollo en el uso de tecnologías en la industria	Confiabilidad brindada a los clientes	La confiabilidad que brinda el estudio
Mejoría en el rendimiento de la bomba	Optimización del diseño	
Amenazas	Estrategias FA	Estrategias DA
Recursos limitados	Ahorro de costos y tiempo	Posibilidad de simulación en condiciones adversas
Validación experimental	Posibilidad de evaluar prototipos	

Fuente: Figueroa (2023).

En base a este planteamiento y análisis se procedió a observar directamente el proceso de mantenimiento de bombas centrífugas industriales y a tomar nota mediante listas de control y diario de campo para profundizar en la aplicación de la ingeniería inversa en dicho proceso.

4.1.3. Pasos de la aplicación de la ingeniería inversa en el proceso de mantenimiento de bombas centrífugas industriales.

La aplicación de la ingeniería inversa en los talleres de TestPump Venezuela C.A., implica una serie de pasos y técnicas que se llevan a cabo para comprender el diseño y funcionamiento de las bombas existentes.

- El primer paso consiste en el desmontaje y estudio visual (Ver figura 20), es decir, desmontar la bomba centrífuga para acceder a sus componentes internos. Durante este proceso, se deben tomar fotografías detalladas y registrar observaciones visuales de cada componente y su ubicación en la bomba.

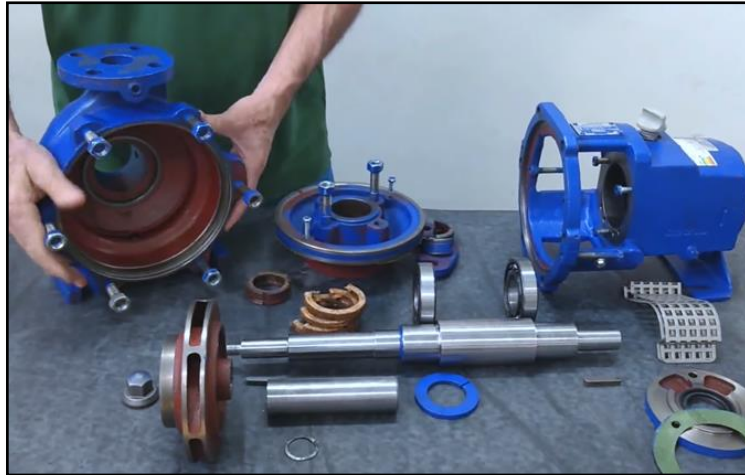


Figura 20. Desmontaje de una bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.

Fuente: Figueroa (2023).

- Seguidamente sigue la identificación y análisis de los materiales utilizados en la construcción de los componentes de la bomba centrífuga. Esto se puede lograr mediante analizadores destinados a aleaciones y metales (Ver figura 21), que proporcionan la composición química de la aleación y la identificación de grados en segundos, específicamente se utiliza el Analizador XRF portátil DELTA de la marca “OLYMPUS”.



Figura 21. Análisis de composición de una bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.

Fuente: Figueroa (2023).

- El tercer paso es la medición y documentación. Se deben realizar mediciones precisas de las dimensiones clave de los componentes, como el diámetro de los rodetes, el espesor de las carcassas (Ver figura 22) y las dimensiones de los ejes.

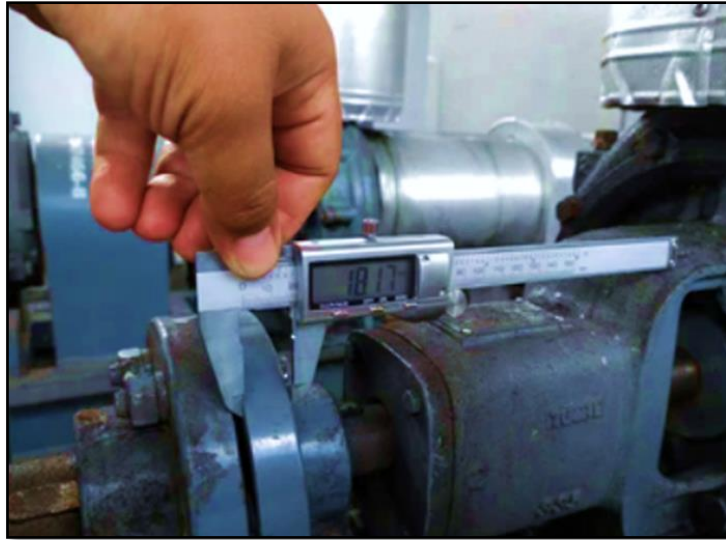


Figura 22. Medición de la carcasa de una bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.

Fuente: Figueroa (2023).

- Por último, viene el modelado en el software de diseño correspondiente (Ver figura 23). Con las mediciones previamente realizadas se crean modelos en 3D para su reparación, reconstrucción o para identificar áreas de mejora. Esto puede incluir la optimización de los componentes, el ajuste de los parámetros de diseño o la incorporación de nuevas tecnologías.



Figura 23. Renderizado de una bomba modelo KSB MONOBLOCK 25-500.

Fuente: Figueroa (2023).

Para este proceso de reingeniería se utilizan escáneres 3D, debido a que se logran unificar los últimos dos pasos con total precisión. Esto es posible ya que, al momento de escanear las piezas correspondientes, se pueden modelar las mismas en tiempo real en diversos programas de diseño. De esta forma se ahorra tiempo y trabajo sin comprometer la calidad del trabajo.

El escáner utilizado por la empresa es el “HandySCAN 3D” del grupo Creaform/AMETEK® (Ver figuras 24 y 25), debido a sus resultados precisos, a su alta resolución, y a su versatilidad y portabilidad. Es fácil de transportar y se puede usar en cualquier condición ambiental sin afectar su rendimiento. Sus especificaciones técnicas son las siguientes:

- Exactitud: 0,025 mm (0,0009 pulg.).
- Exactitud volumétrica: 0,020 + 0,040 mm/m (0,0008 pulg. + 0,0005 pulg./pies).
- Velocidad de medición: Hasta 1.300.000 mediciones/s.
- Resolución de malla: 0,100 mm.
- Pruebas de aceptación conforme a: ISO 17025.
- Rango de tamaño de piezas recomendado: 0,05 – 4 m.
- Área de escaneo: 310 x 350 mm.
- Profundidad de campo: 250 mm.
- Peso: 0,94 kg (2,1 lb).
- Dimensiones (longitud x ancho x altura): 79 x 142 x 288 mm.
- Rango de temperatura de operación: 5 - 40 °C.
- Rango de humedad de operación (sin condensación): 10-90%.
- Compatibilidad: Es compatible con los softwares 3D Systems (Geomagic® Solutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Metrologic Group (Metrolog X4), New River Kinematics (Spatial Analyzer), Verisurf, Dassault Systèmes (CATIA V5, SOLIDWORKS), PTC (Creo), Siemens (NX, Solid Edge), Autodesk (Inventor, PowerINSPECT)



Figura 24. HandySCAN 3D.

Fuente: Catálogo de productos “BLACK SERIES” de grupo Creaform/AMETEK® (2018).



Figura 25. Escaneado de un rodete de bomba marca KSB, modelo FB 800 en los talleres de TestPump Venezuela C.A.

Fuente: Figueroa (2022).

4.2 Selección de diversos tipos de bombas centrífugas de acuerdo al fluido con el que trabaja e identificación de sus características geométricas.

Para esta fase se seleccionan tres modelos de bombas centrífugas distintas tomando en cuenta dos principales aspectos, por un lado, los modelos 3D facilitados por la empresa TestPump Venezuela C.A., con la geometría exacta empleando el Software SolidWorks, y por el otro lado, se tomaron en cuenta los distintos tipos de impulsores para seleccionar diversos tipos de bombas centrífugas de acuerdo al fluido con el que trabajan. El primer equipo seleccionado va a ser la bomba SCANPUMP SERIE BA a 2900 RPM (Ver figuras 26 y 27), utilizado para bombear para aceite vegetal para consumo humano. Construida con hierro fundido, con una entrada de 150mm y un impulsor semiabierto de 260mm de diámetro.

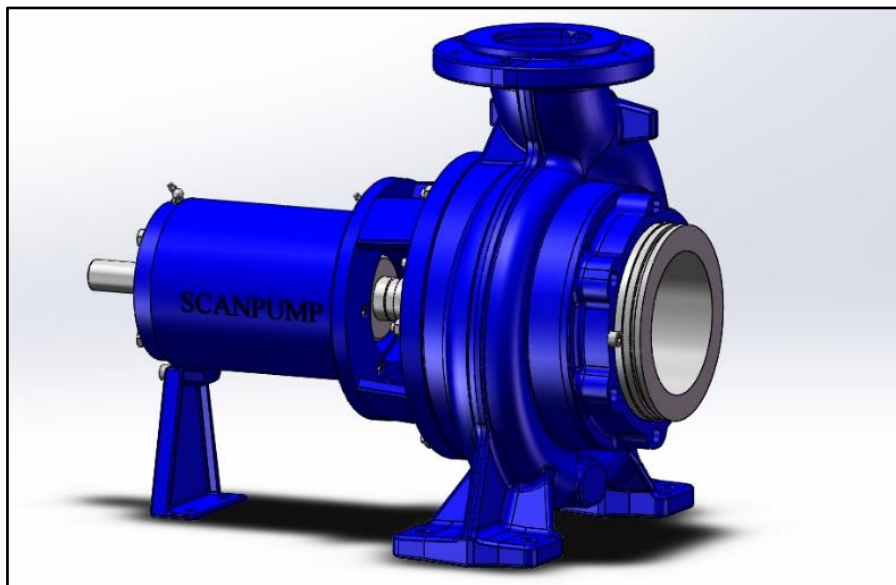


Figura 26. Bomba SCANPUMP SERIE BA.
Fuente: TESTPUMP VENEZUELA C.A. (2023).

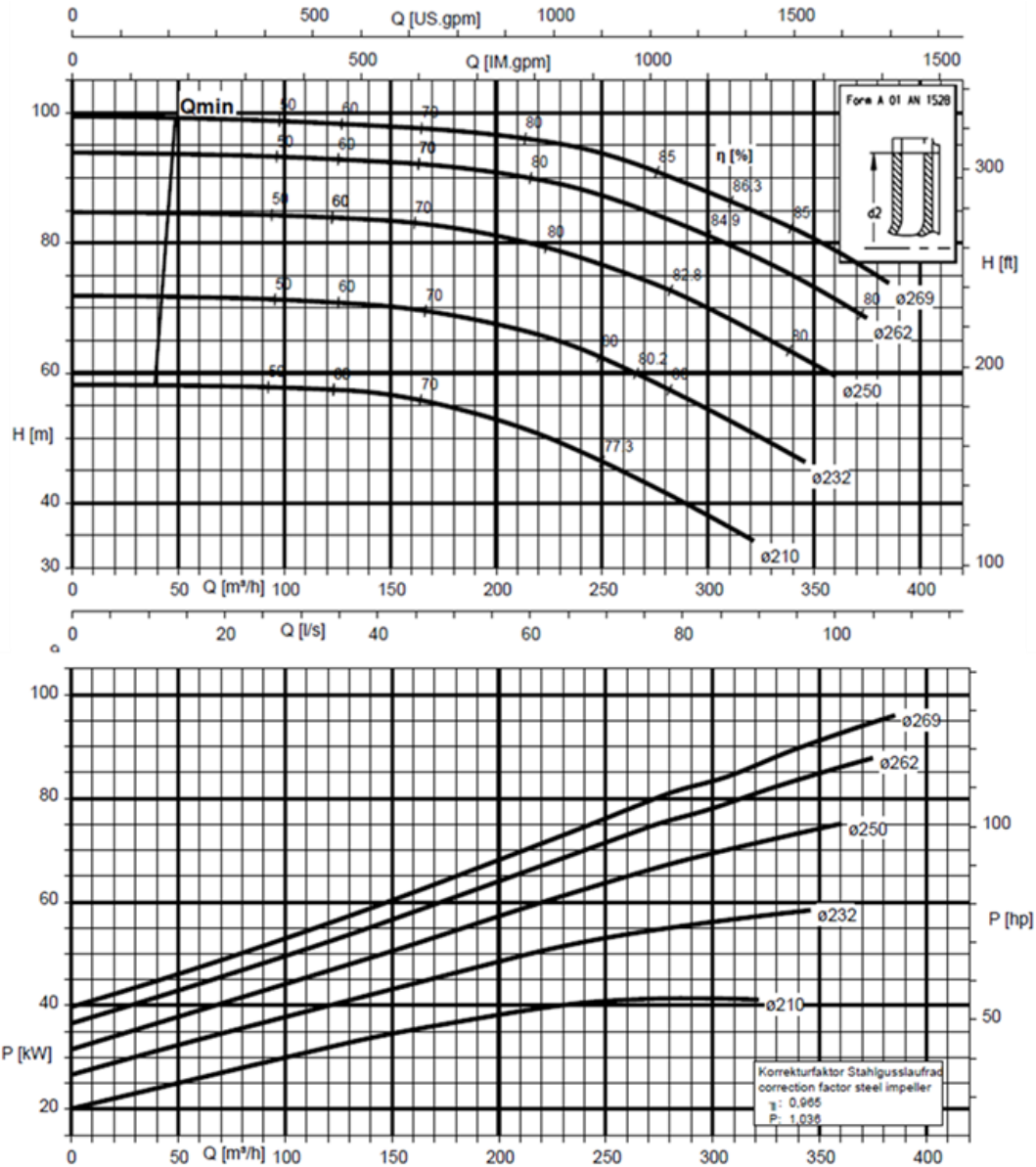


Figura 27: Curva característica de SCANPUMP SERIE BA.

Fuente: Manual de operación SCANPUMP SERIE BA. (2020).

La segunda bomba seleccionada es la bomba química normalizada de KSB CPKN 2ª a 3500 RPM (Ver figuras 28 y 29), utilizada para el bombeo de líquidos agresivos en la industria química y petroquímica. Con la carcasa hecha en acero inoxidable, y un impulsor cerrado de 260mm de diámetro.

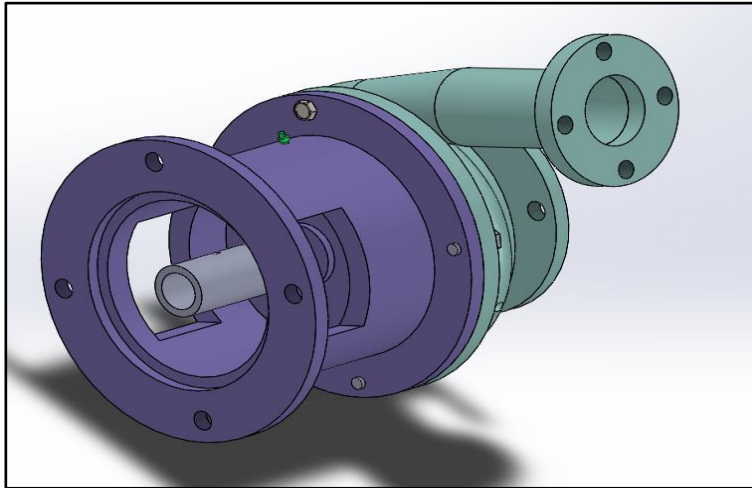


Figura 28. Bomba KSB CPKN 2^a.
Fuente: TESTPUMP VENEZUELA C.A. (2023).

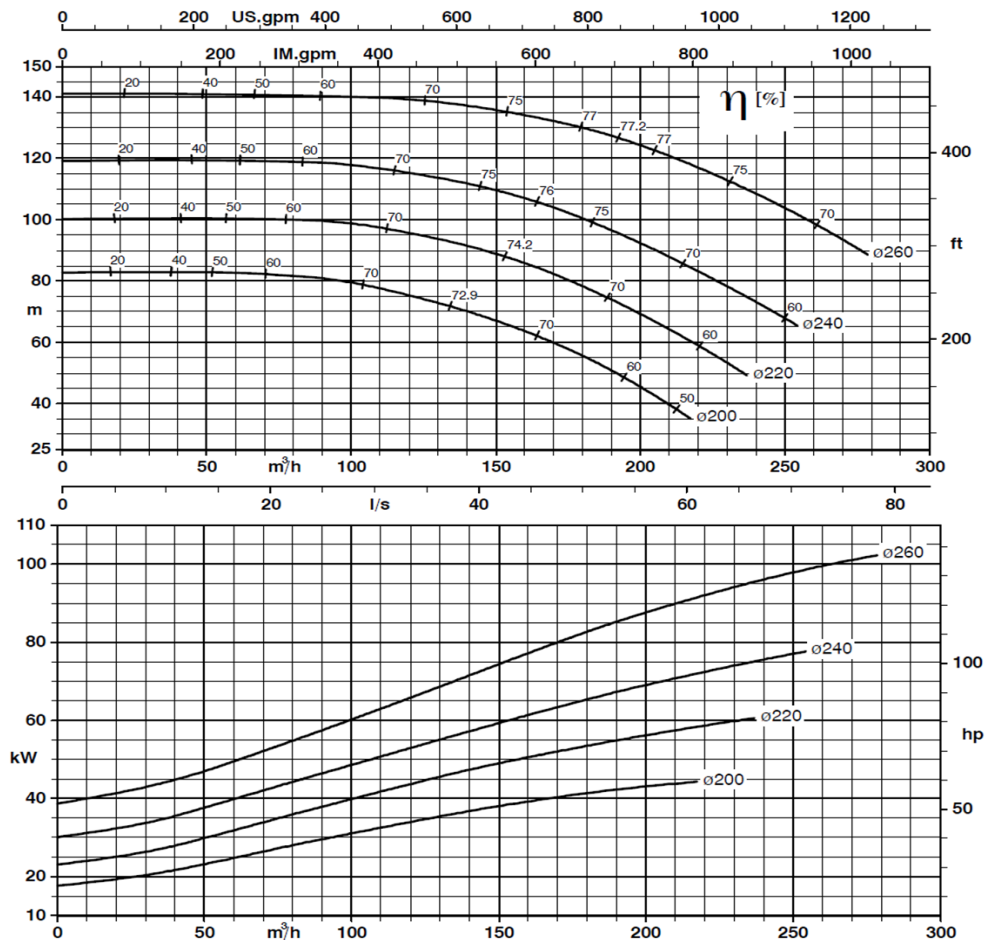


Figura 29. Curva característica de KSB CPKN 2^a.
Fuente: Characteristic Curves Booklet KSB CPKN 2^a (2022).

Por último, se selecciona la bomba KSB Sewatec 3HM a 960 RPM (Ver figuras 30 y 31), utilizada para bombear aguas residuales no depuradas, aguas sucias de cualquier tipo y lodos con hasta un 30% de sólidos en su composición. Cuenta con un impulsor de tipo abierto de 500mm de diámetro.

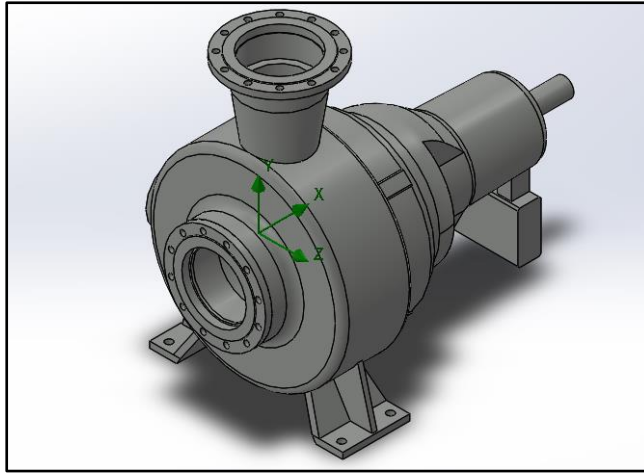


Figura 30. Bomba KSB Sewatec 3HM.
Fuente: TESTPUMP VENEZUELA C.A. (2023).

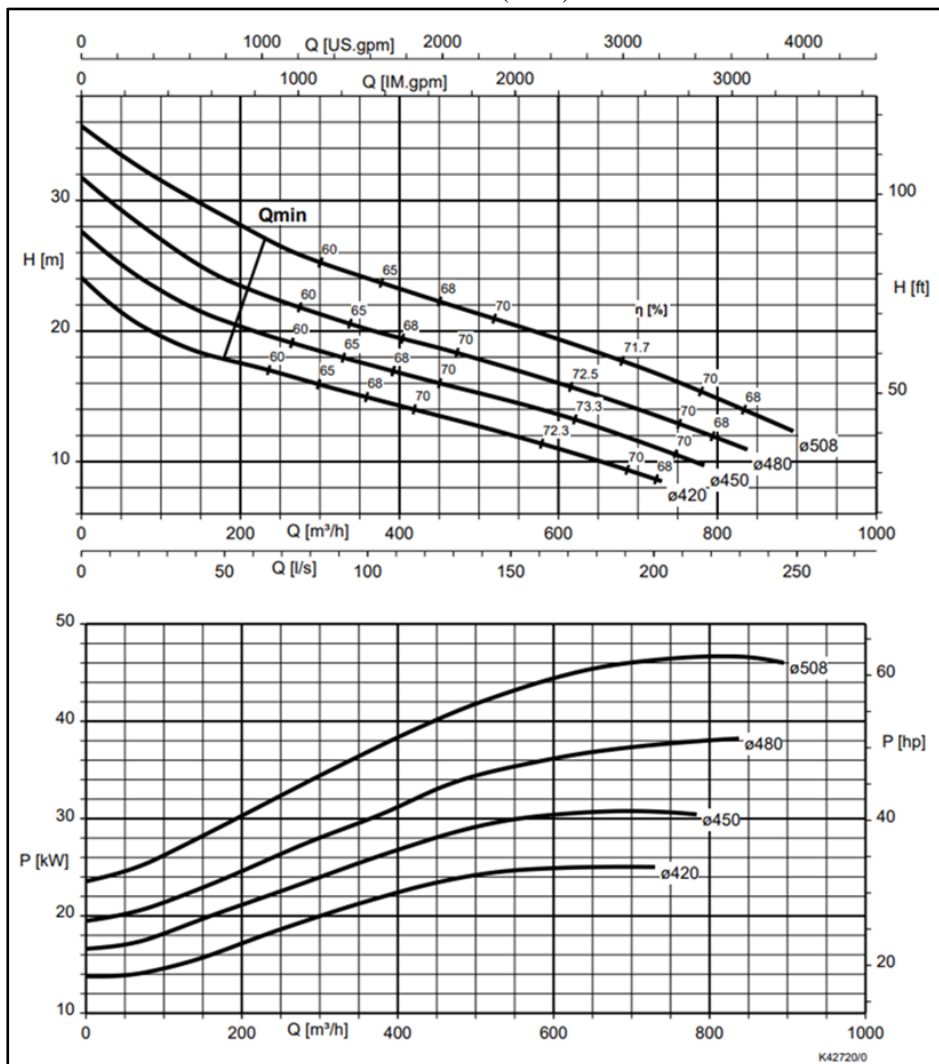


Figura 31. Curva característica de KSB Sewatec 3HM.
Fuente: Characteristic Curves Booklet KSB Sewatec 3HM (2022).

Posterior a la selección de los modelos de las bombas centrífugas a utilizar en el estudio, se recopilieron distintos documentos del fabricante, así como también datos obtenidos de

estudios previos a este modelo de bomba centrífuga, para con esa data generar el modelo en 3D y los estudios pertinentes por medio de un software de diseño asistido por computadora. En este caso, se escoge el programa SolidWorks, ya que permite dimensionar de acuerdo con la geometría deseada (diámetros, ancho de cara, ángulos de entrada y salida, número de álabes, etc.), las condiciones de trabajo del impulsor (velocidad angular, caudal) y las propiedades del fluido.

4.3 Simulación del campo de flujo de la bomba centrífuga seleccionada mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) con la finalidad de obtener el gráfico de las curvas de carga y rendimiento.

Para obtener la curva característica de las bombas centrífugas se utilizó el complemento “Flow Simulation” del Software SolidWorks 2022. En el caso de la primera bomba (SCANPUMP SERIE BA), en la interfaz principal se selecciona la pestaña “Flow Simulation” y luego la opción de “Wizard” (Ver figura 32), luego se identifica el nuevo proyecto con las características que se escojan.

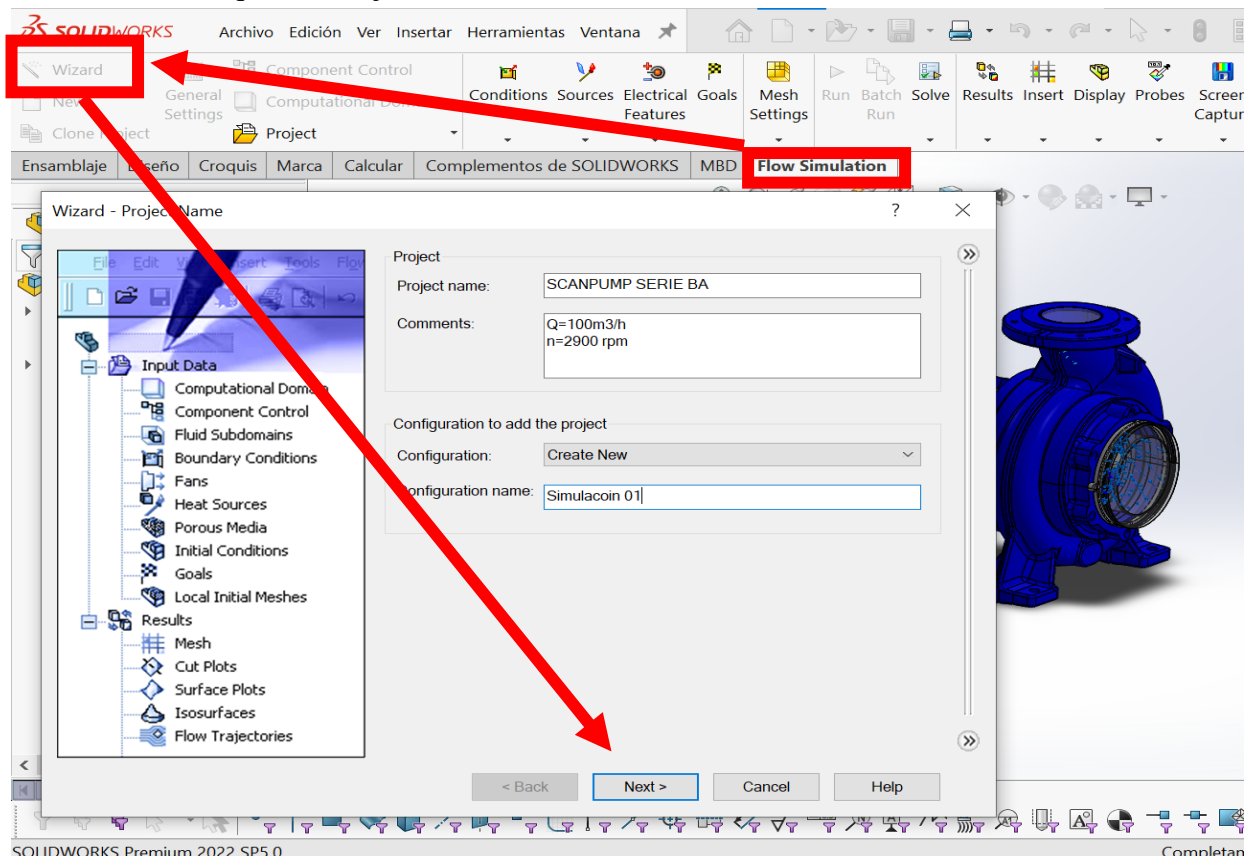


Figura 32. Creación de nuevo proyecto en Flow Simulation.
Fuente: Figueroa (2023).

Se selecciona “Next” para cambiar de pestaña y especificar las unidades en el sistema internacional. Se cambia nuevamente de pestaña para establecer la rotación a nivel global en el eje X en radianes por segundo (303.68), teniendo en cuenta el sentido de giro (Ver figura 33).

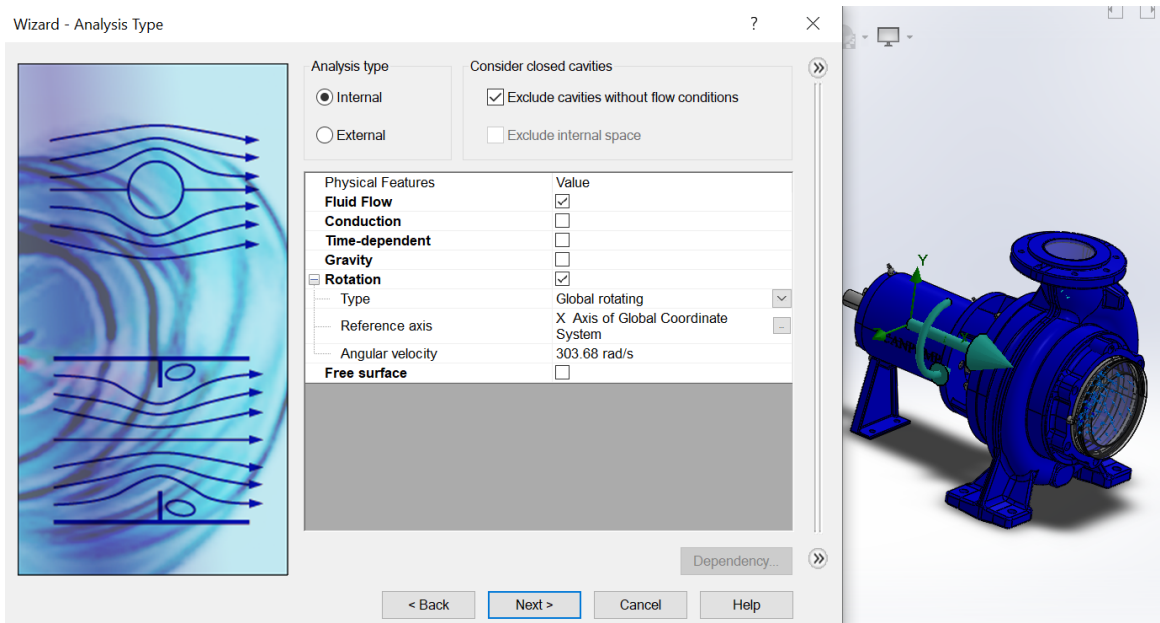


Figura 33. Selección de la velocidad angular.

Fuente: Figueroa (2023).

Se selecciona el fluido de trabajo a 2,2 m/s, que será el agua (Ver figura 34), el cual una densidad de 997 kg/m³, un peso específico de 10000 N/m³ y una viscosidad cinemática de 0,01002 Pa.s a 293.2 K. Se establece un flujo turbulento, de acuerdo al número de Reynolds (Ec. 52). Se consideran las paredes adiabáticas, presión y temperatura ambiental.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(997 \frac{kg}{m^3})(2,2 \frac{m}{s})(0,15m)}{(0,01002 Pa.s)} = 32835 > 3000 \therefore \text{Flujo turbulento}$$

(Ec. 52)

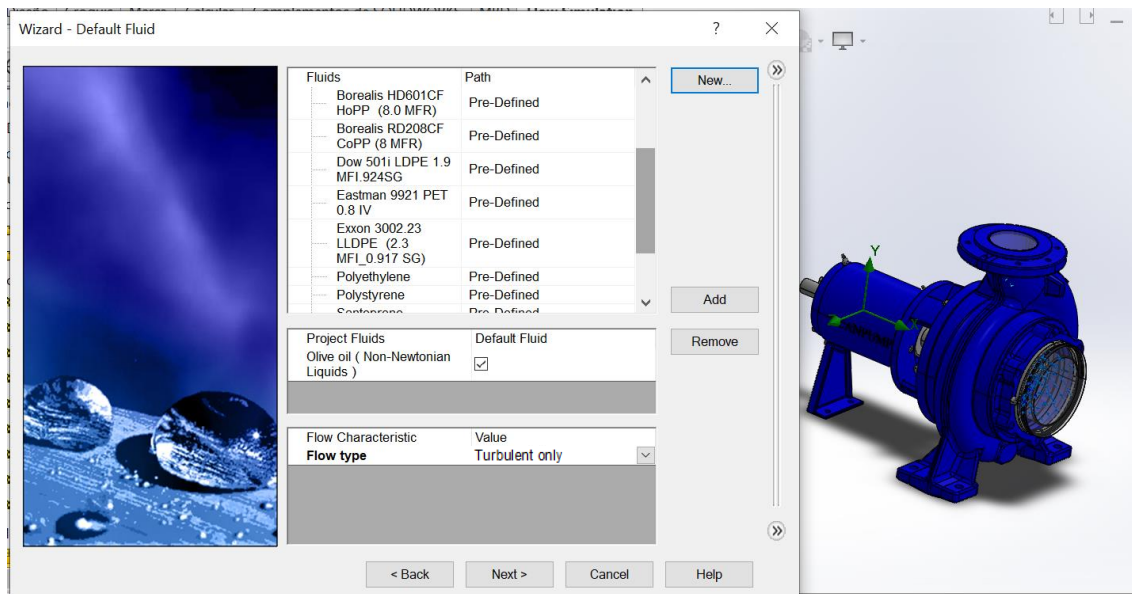


Figura 34. Selección del fluido de trabajo.

Fuente: Figueroa (2023).

Una vez creado el nuevo proyecto, se crea automáticamente el dominio computacional de la bomba (Ver figura 35), comprendido entre los límites de la boca de succión y de descarga de la misma. Este dominio computacional encierra la geometría de estudio al tratarse de un análisis de tipo interno.

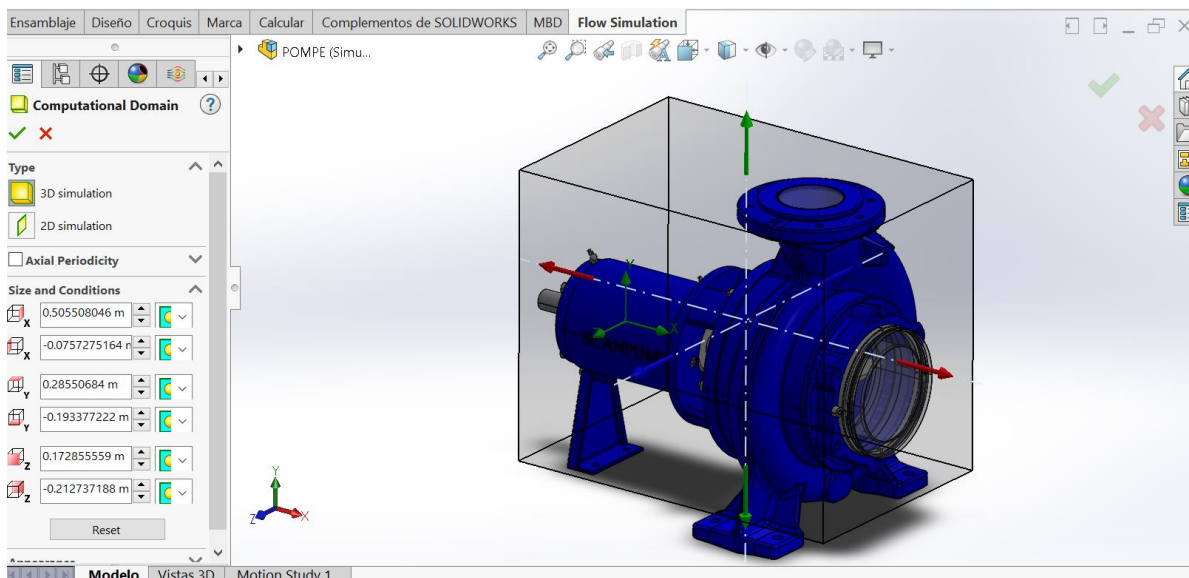


Figura 35. Creación del dominio computacional.

Fuente: Figueroa (2023).

Se crean las condiciones de borde (Ver figuras 36 y 37). El caudal de entrada será de 28 l/s (0,028 m³/s) y se inserta en la cara interna de la tapa creada para cerrar la succión de la bomba y la presión de salida será de 200000 Pa y se insertará en la cara interna de la tapa creada para cerrar la descarga de la bomba.

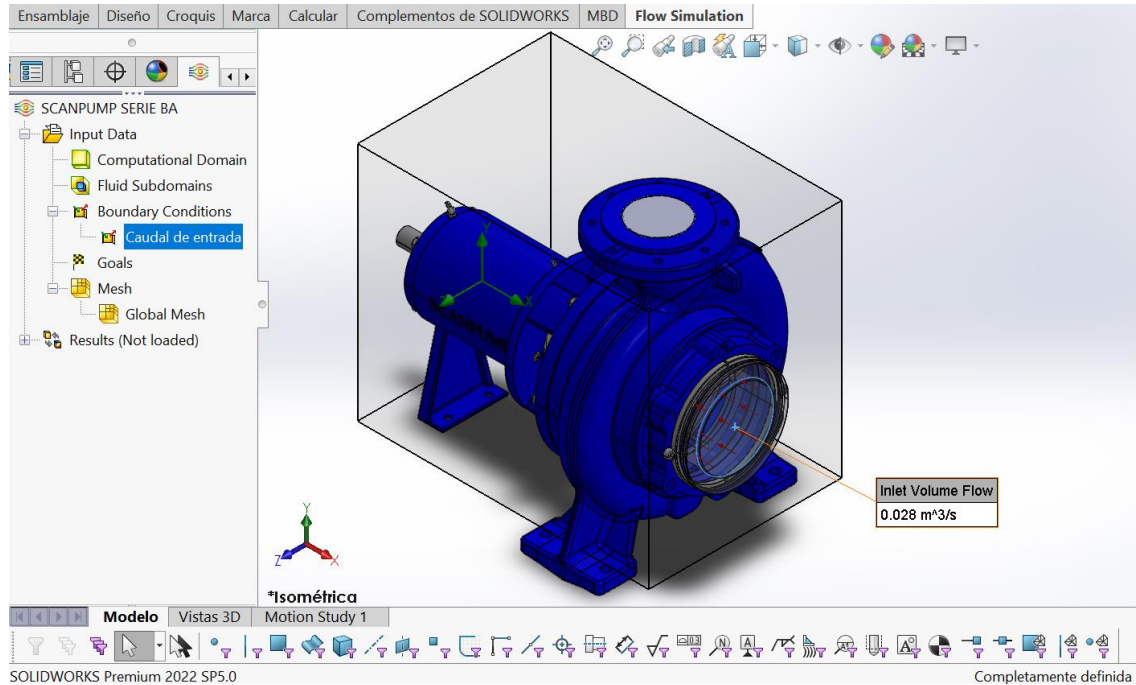


Figura 36. Selección del caudal de entrada.

Fuente: Figueroa (2023).

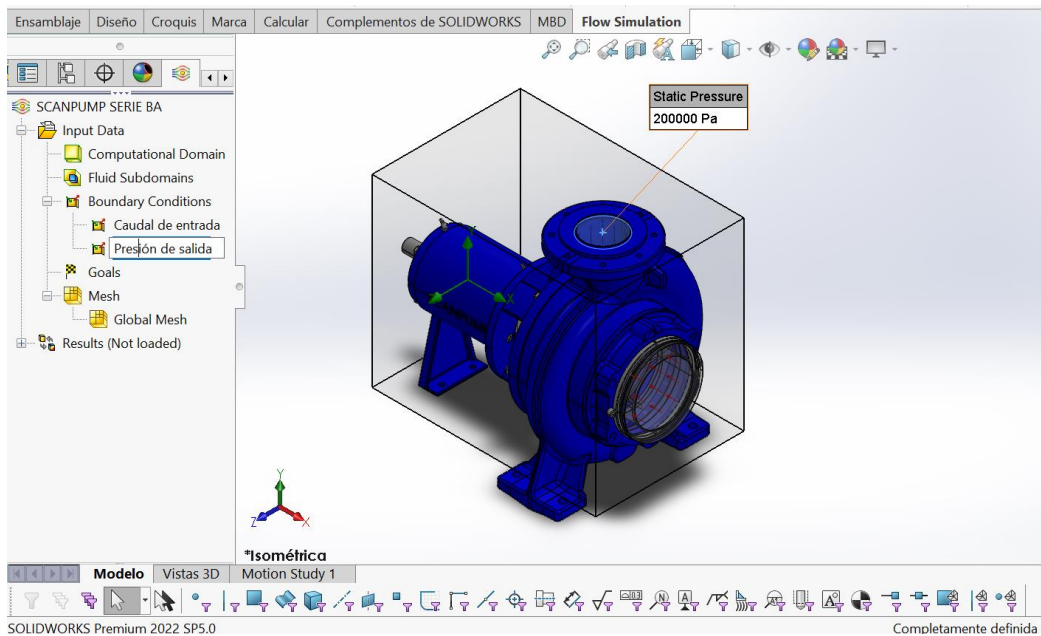


Figura 37. Selección de la presión de salida.

Fuente: Figueroa (2023).

Se seleccionan “goals” o los objetivos en una superficie, que van a ser la presión estática promedio y velocidad de entrada promedio en el eje X, insertando ambos parámetros en la cara del caudal de entrada (Ver figura 38).

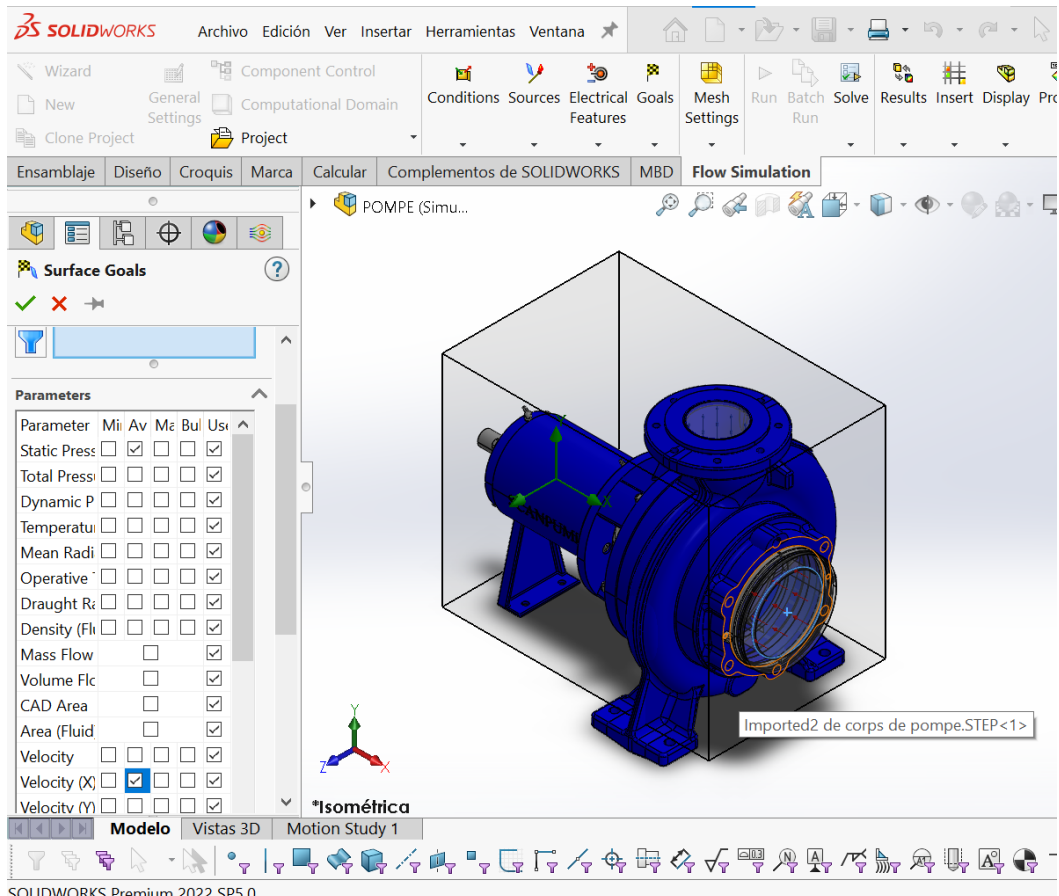


Figura 38. Selección de “Surface Goals”.
Fuente: Figueroa (2023).

Se selecciona otro parámetro de superficie, la velocidad de salida promedio en el eje X, insertándose en la cara de la presión de salida. Luego se introduce en el programa la primera fórmula correspondiente a la altura de la bomba, se inserta como otro “goal” que va a ser la ecuación 43 (Ver figura 39).

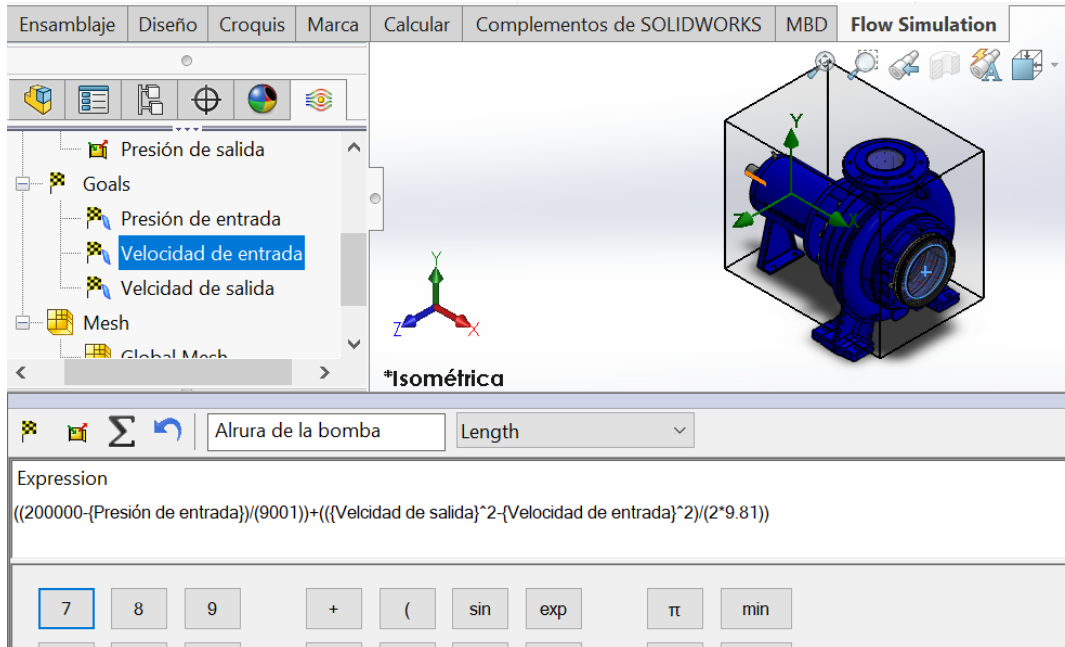


Figura 39. Inserción de la ecuación para obtener la altura.
Fuente: Figueroa (2023).

Luego como “Global Goal” se selecciona el torque global en el eje X y como “Surface Goal” se selecciona el torque y como superficie todas aquellas piezas que se mantienen fijas (Ver figura 40). Estos dos valores de torques se van a restar y a multiplicar por la velocidad angular para obtener la potencia en el eje (Ver figura 41).

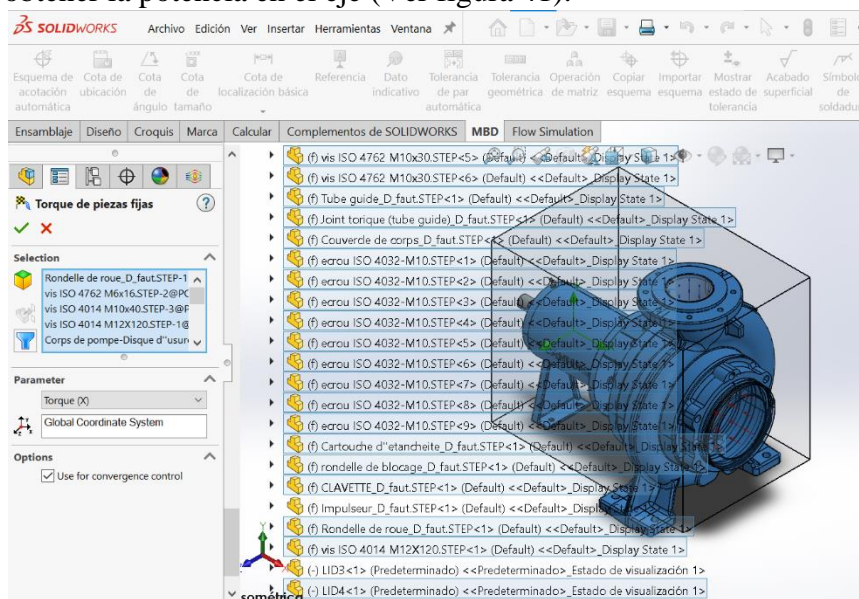


Figura 40. Inserción del torque de las piezas fijas.
Fuente: Figueroa (2023).

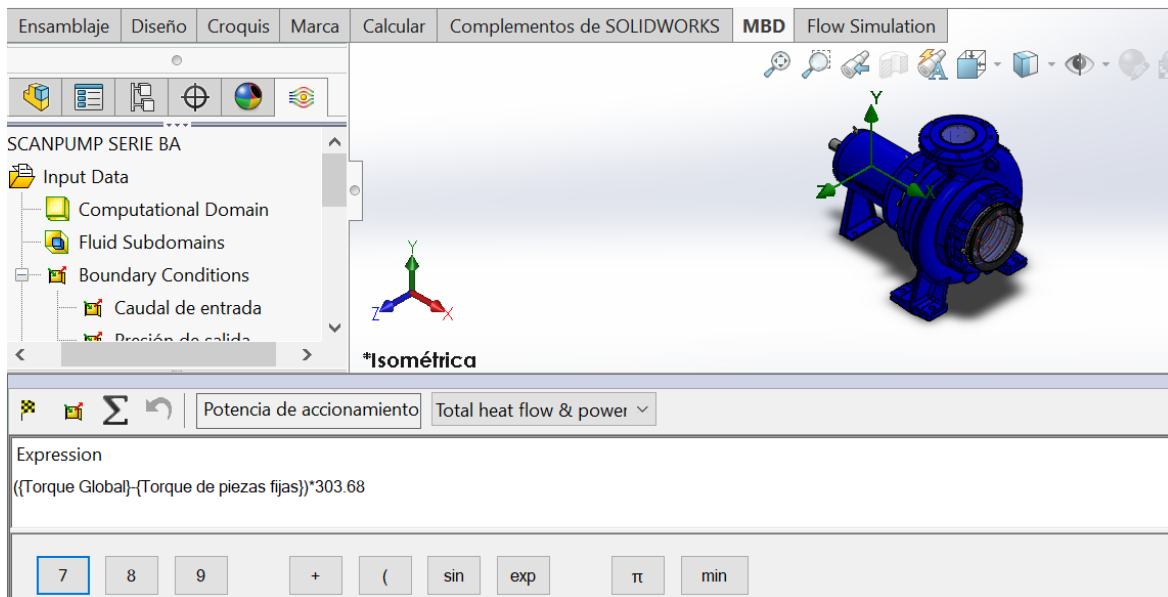


Figura 41. Inserción de “Equation Goal” para determinar la potencia del eje.

Fuente: Figueroa (2023).

Se inserta otra “Equation Goal” para determinar la potencia hidráulica. Se multiplican el peso específico del fluido, el caudal y la altura de la bomba (Ver figura 42).

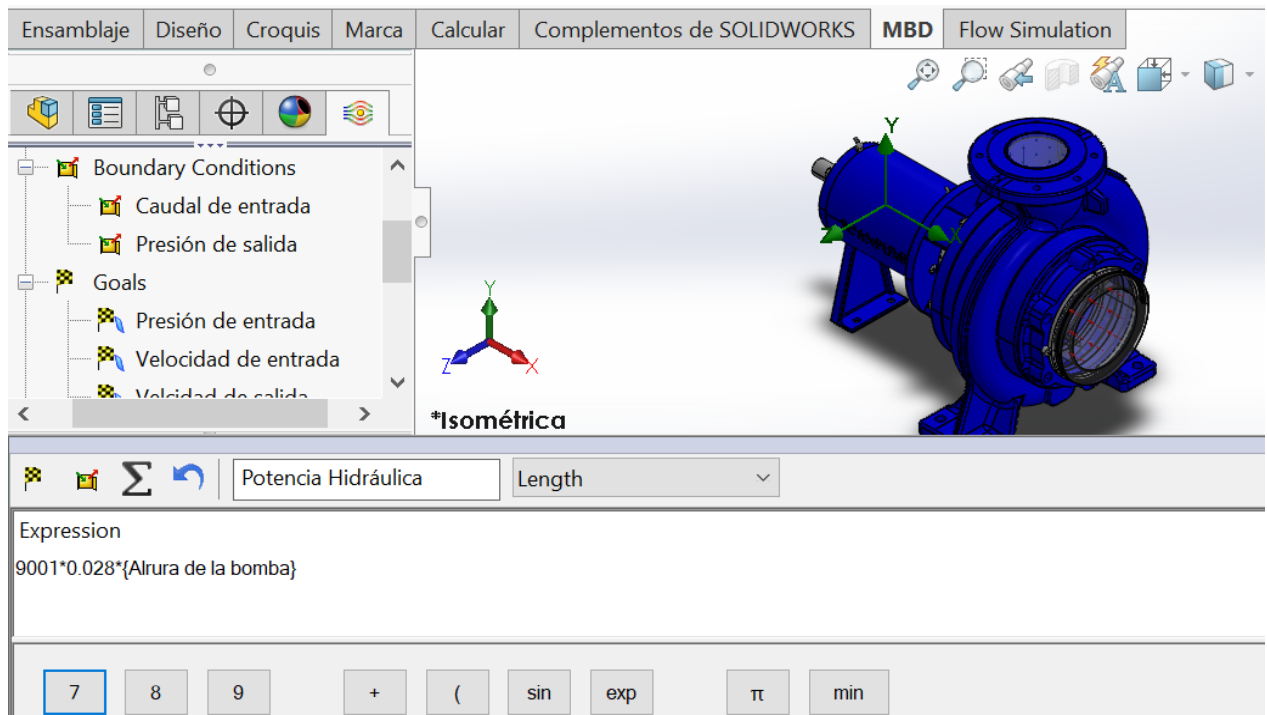


Figura 42. Inserción de “Equation Goal” para determinar la potencia hidráulica.

Fuente: Figueroa (2023).

Se determina la eficiencia de la bomba dividiendo la potencia hidráulica entre la potencia de accionamiento mediante una “Equation Goal” (Ver figura 43).

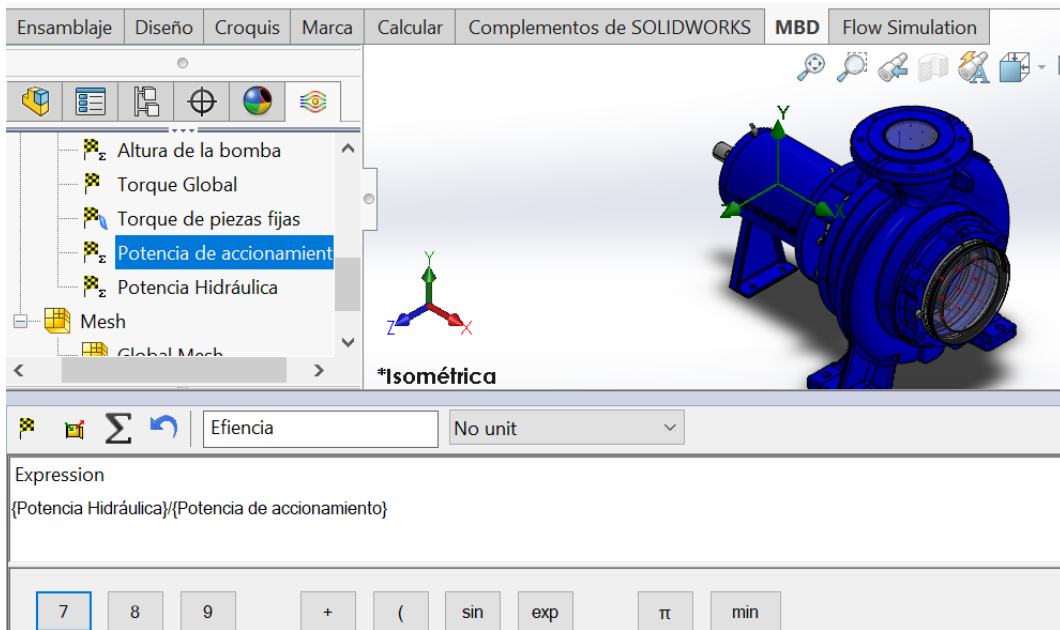


Figura 43. Inserción de “Equation Goal” para determinar la eficiencia de la bomba.
Fuente: Figueroa (2023).

Seguidamente de haber introducido los parámetros necesarios para realizar la curva característica, tenemos que realizar la simulación en “Run” (Ver figura 44). En este apartado se crea la malla automáticamente y se generan las iteraciones necesarias para realizar la simulación (Ver figura 45).

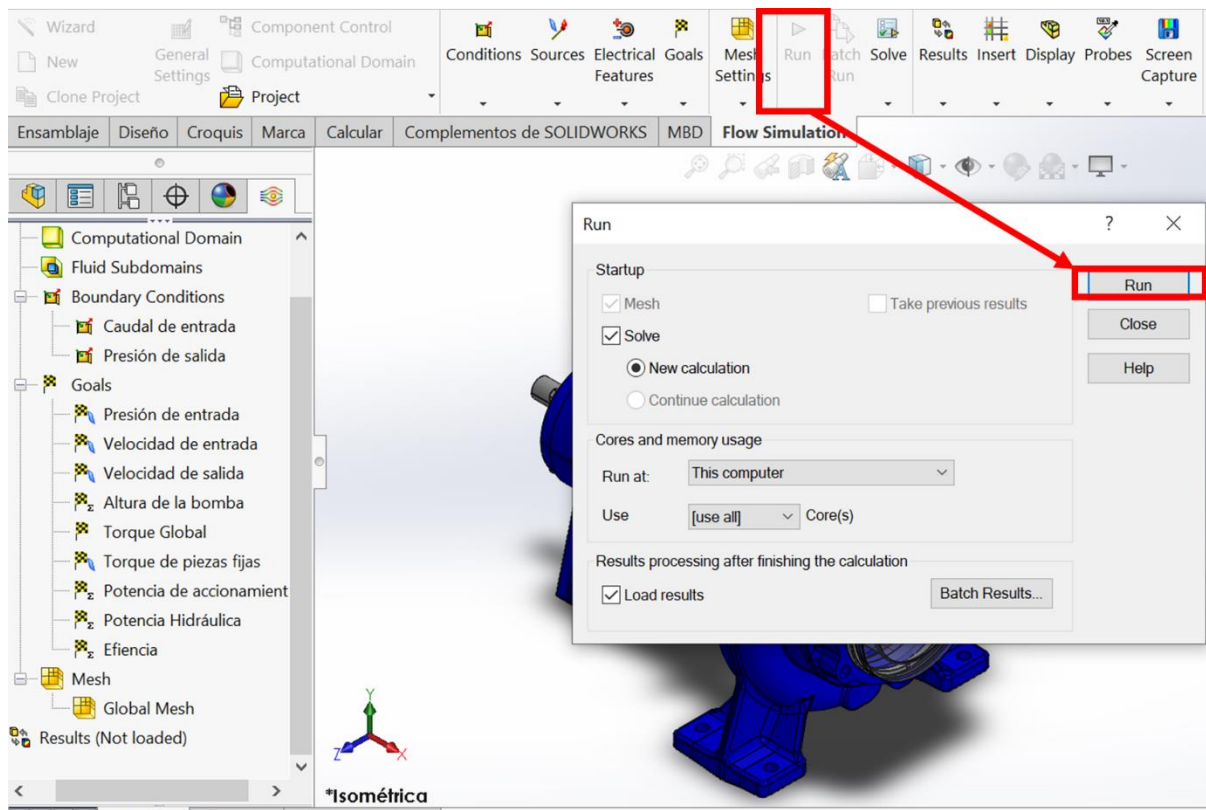


Figura 44. Simulación de flujo.
Fuente: Figueroa (2023).

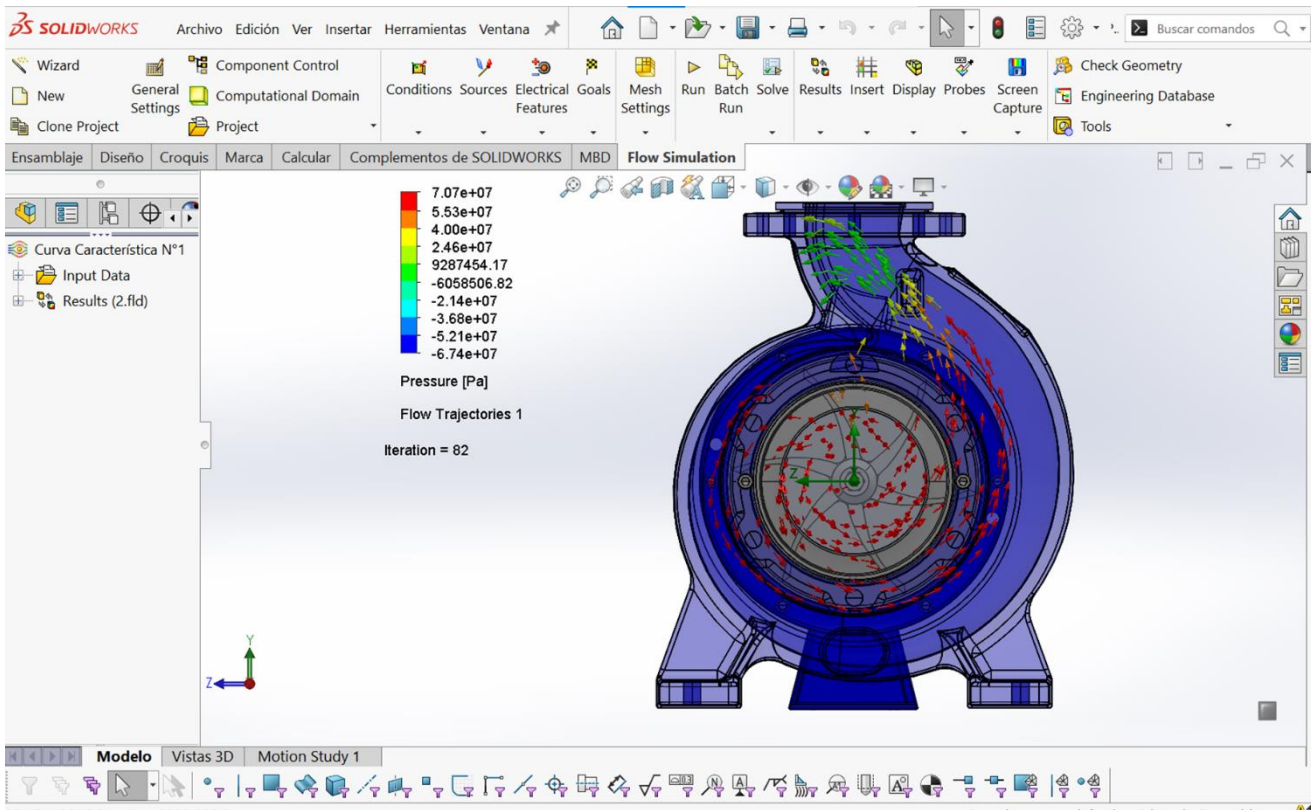


Figura 45. Resultados de la simulación de flujo.

Fuente: Figueroa (2023).

Una vez que se realizó la simulación, se pueden ver los resultados en la pestaña “Results” a la izquierda de la interfaz principal, una vez que se despliega el menú, se selecciona “Goal Plots” y luego “Insert” (Ver figura 46).

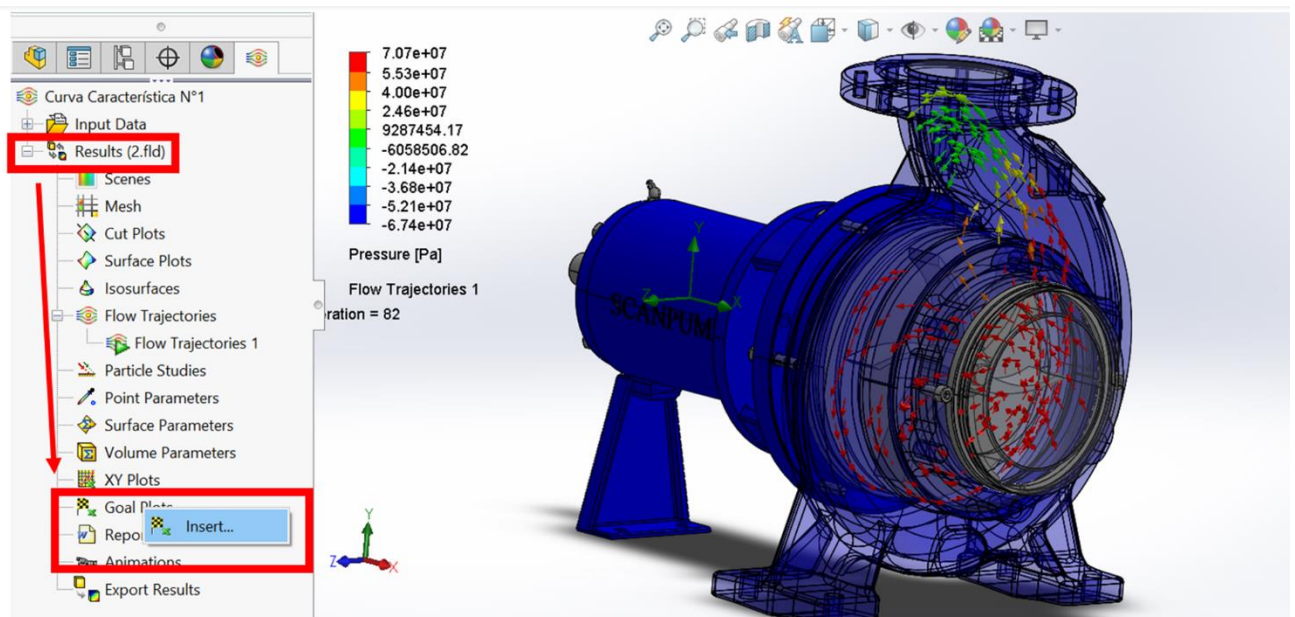


Figura 46. Inserción de los “Goal Plots” para observar los resultados.

Fuente: Figueroa (2023).

Se seleccionan todos los parámetros necesarios: altura de la bomba, potencia hidráulica y eficiencia (Ver figura 47), en “Show” se pueden ver los resultados (Ver figura 48) y en “Export to Excel” se pueden exportar los resultados obtenidos de forma tabulada para realizar las gráficas correspondientes.

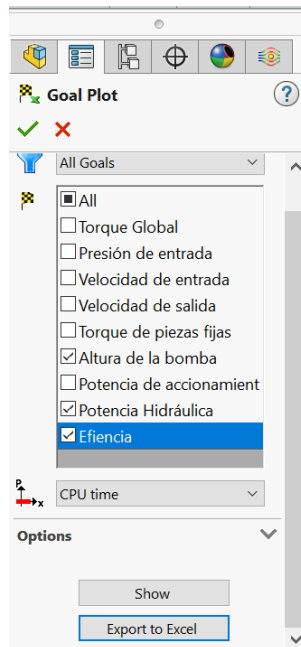


Figura 47. Selección de parámetros y exportación de datos de forma tabulada a Excel.

Fuente: Figueroa (2023).

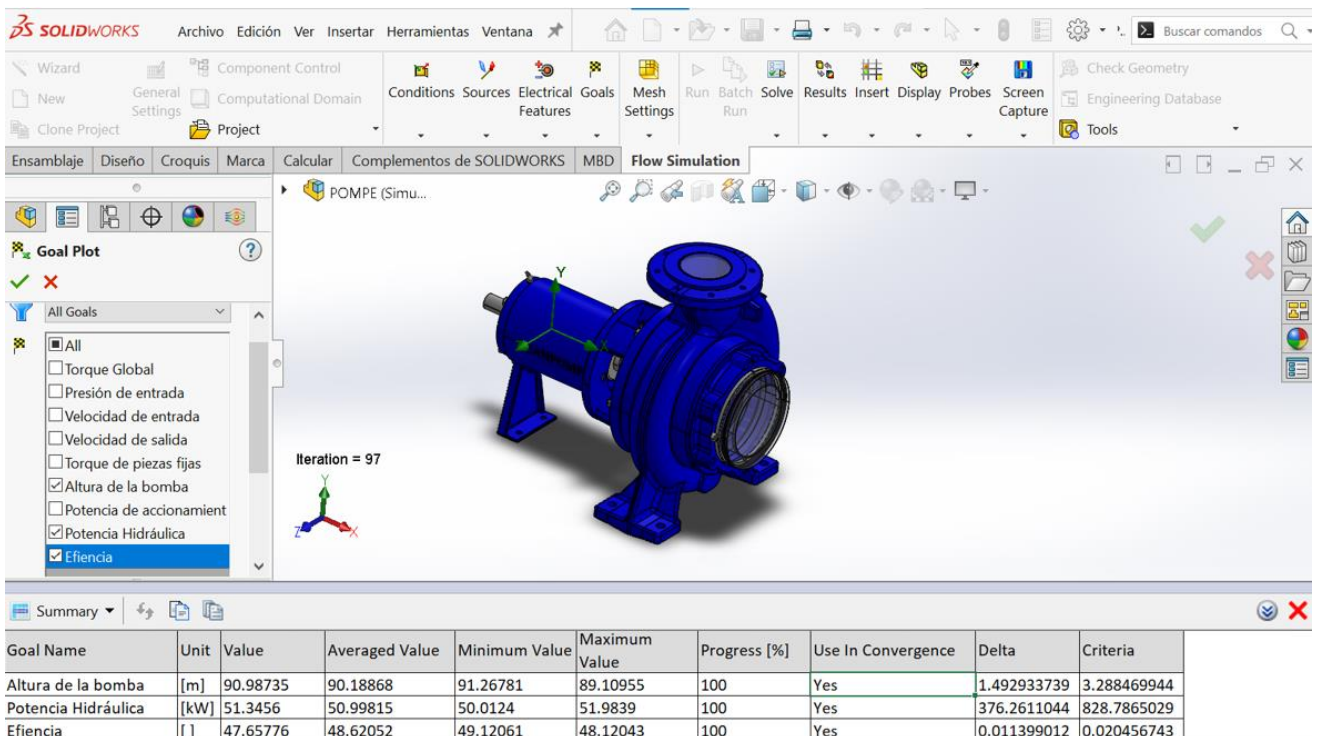


Figura 48. Resultados obtenidos por la simulación.

Fuente: Figueroa (2023).

4.4 Resultados y comparación de las curvas características originales de las bombas centrífugas con las curvas obtenidas mediante herramientas de CFD.

Es importante aclarar que los ensayos en bancos de pruebas se realizan únicamente con agua y por lo tanto las curvas de funcionamiento que el fabricante entrega son ensayadas con este fluido, por lo que para poder comparar directamente las curvas obtenidas a través del presente estudio con las curvas del fabricante es necesario utilizar el agua como fluido de trabajo.

Para obtener la curva característica, una vez se tiene la simulación tabulada, se realizan seis (6) simulaciones a 2900 rpm variando el caudal de entrada desde 100 m³/h hasta 350 m³/h de 50 en 50 m³/h (Ver tabla 1). Se obtienen los diferentes resultados de las simulaciones para luego graficarlos (Ver gráfico 1):

Tabla 1. Resultados tabulados de las simulaciones para la bomba SCANPUMP SERIE BA con flujo de agua.

N°	Caudal(m ³ /h)	Altura (m)	Eficiencia (%)	Potencia Hidráulica (kW)
1	100	92.0791982	51.4703808	49.805232
2	150	89.9401338	71.1113256	56.355933
3	200	87.13212728	85.2341076	60.259795
4	250	84.65852604	89.5414608	68.664651
5	300	77.03780172	89.773542	76.082532
6	350	67.71183716	81.1059372	80.739405

Fuente: Figueroa (2023).

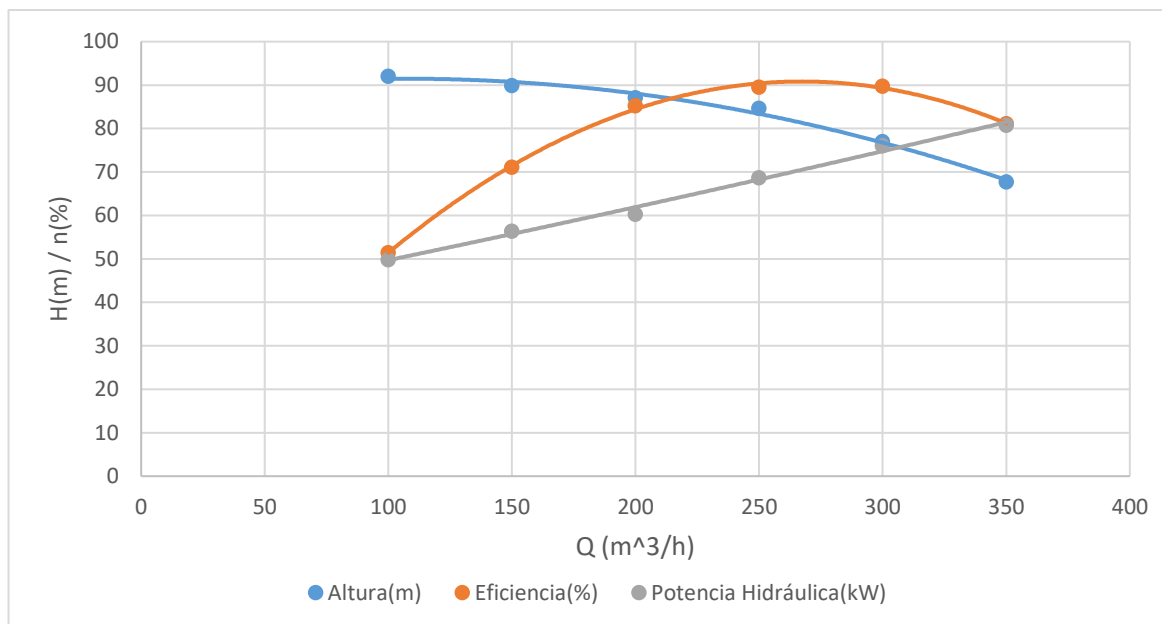


Gráfico 1. Curva característica simulada de la bomba SCANPUMP SERIE BA con flujo de agua.

Fuente: Figueroa (2023).

Una vez graficada las curva características, se procede a comparar la Curva Q-H simulada con flujo de agua con la curva del fabricante para calcular la desviación estándar de las misma (Ver gráfico 2). El primer paso es seleccionar lo más aproximado posible de la curva del fabricante los diferentes valores de las alturas para los mismos valores de caudal de las curvas simuladas. Una vez seleccionados, se tabulan en Excel para determinar la línea de tendencia y poder observarlas gráficamente (Ver tabla 2). Para obtener el porcentaje de desviación entre cada una de las curvas simuladas y las del fabricante, se calcula la diferencia de valores entre las diferentes alturas para cada caudal y mediante la función “DesVest” del programa de Excel se obtiene el porcentaje.

Tabla 2. Cálculo de desviación estándar para la bomba SCANPUMP SERIE BA.

N°	Caudal(m3/h)	Fabricante	Agua	Diferencia
		Altura (m)	Altura(m)	
1	100	93	92.0792	0.9208018
2	150	92	89.94013	2.0598662
3	200	90	87.13213	2.86787272
4	250	87	84.65853	2.34147396
5	300	80	77.0378	2.96219828
6	350	73	67.71184	5.28816284
Desviación estándar entre curva simulada y curva del fabricante				1,45

Fuente: Figueroa (2023).

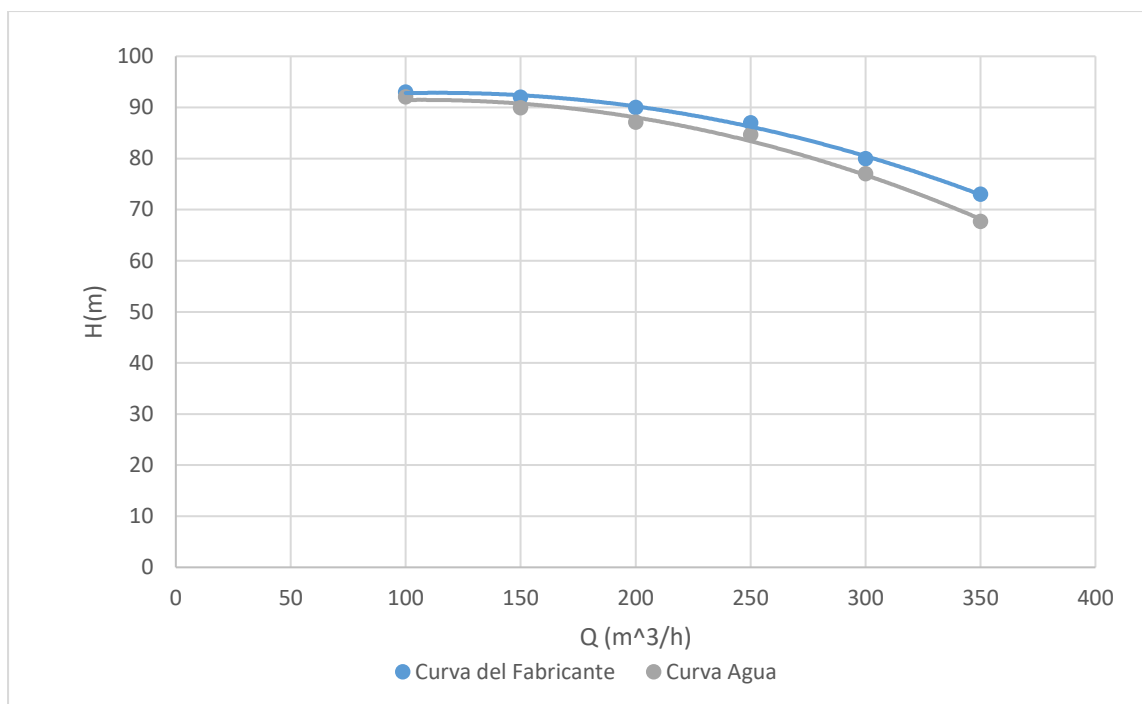


Gráfico 2. Comparación gráfica de curva Q-H del fabricante y simulada para la bomba SCANPUMP SERIE BA.

Fuente: Figueroa (2023).

Este procedimiento se reitera para los otros dos equipos seleccionados con el fin de poder graficar la curva característica de cada uno. La segunda bomba con la que se va a trabajar es la bomba química normalizada de KSB CPKN 2ª a 3500 RPM (366,52 rad/s) y a 1,6 m/s, utilizada para el bombeo de líquidos agresivos en la industria química y petroquímica. Con la carcasa hecha en acero inoxidable, una succión de 150 mm y un impulsor cerrado de 260mm de diámetro. Primeramente, el fluido de trabajo será el agua. Se consideran las paredes adiabáticas y un flujo turbulento de acuerdo al número de Reynolds, una presión de salida de 2 Bares y un caudal de entrada desde 50 hasta 250 m³/h en intervalos de 50 en 50 N/m³. Una vez hechas las cinco (5) simulaciones correspondientes con estas condiciones, se procede a realizar la tabla en una base de datos (Ver tabla 3) para poder realizar la curva característica (Ver gráfico 3), determinando el porcentaje de desviación (Ver tabla 4), y poder graficar estos valores para observar las diferentes curvas (Ver gráfico 4).

Tabla 3. Resultados tabulados de las simulaciones para la bomba KSB CPKN 2ª con flujo de agua.

Nº	Caudal(m3/h)	Altura (m)	Eficiencia (%)	Potencia Hidráulica (kW)
1	50	147.52347	47.0117982	33.552
2	100	142.89082	55.7306611	59.451072
3	150	132.10906	78.2149777	67.30464

4	200	118.63092	82.4955769	80.342688
5	250	99.02091	65.249563	95.195424

Fuente: Figueroa (2023).

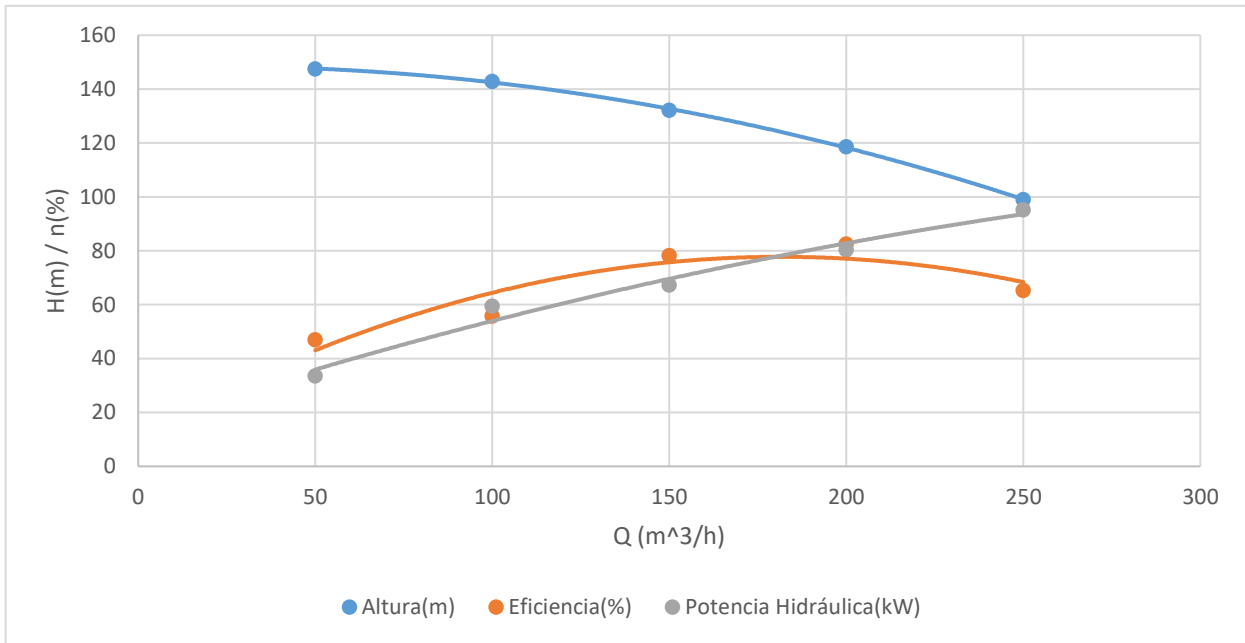


Gráfico 3. Curva característica simulada de la bomba KSB CPKN 2ª con flujo de agua.

Fuente: Figueroa (2023).

Tabla 4. Cálculo de desviación estándar para la bomba KSB CPKN 2ª.

N°	Caudal(m3/h)	Fabricante	Agua	Agua
		Altura (m)	Altura(m)	Diferencia
1	50	140	147.5235	7.52347
2	100	140	142.8908	2.89082
3	150	135	132.1091	2.89094
4	200	125	118.6309	6.36908
5	250	105	99.02091	5.97909
Desviación estándar entre curva original y flujo de agua				2.12

Fuente: Figueroa (2023).

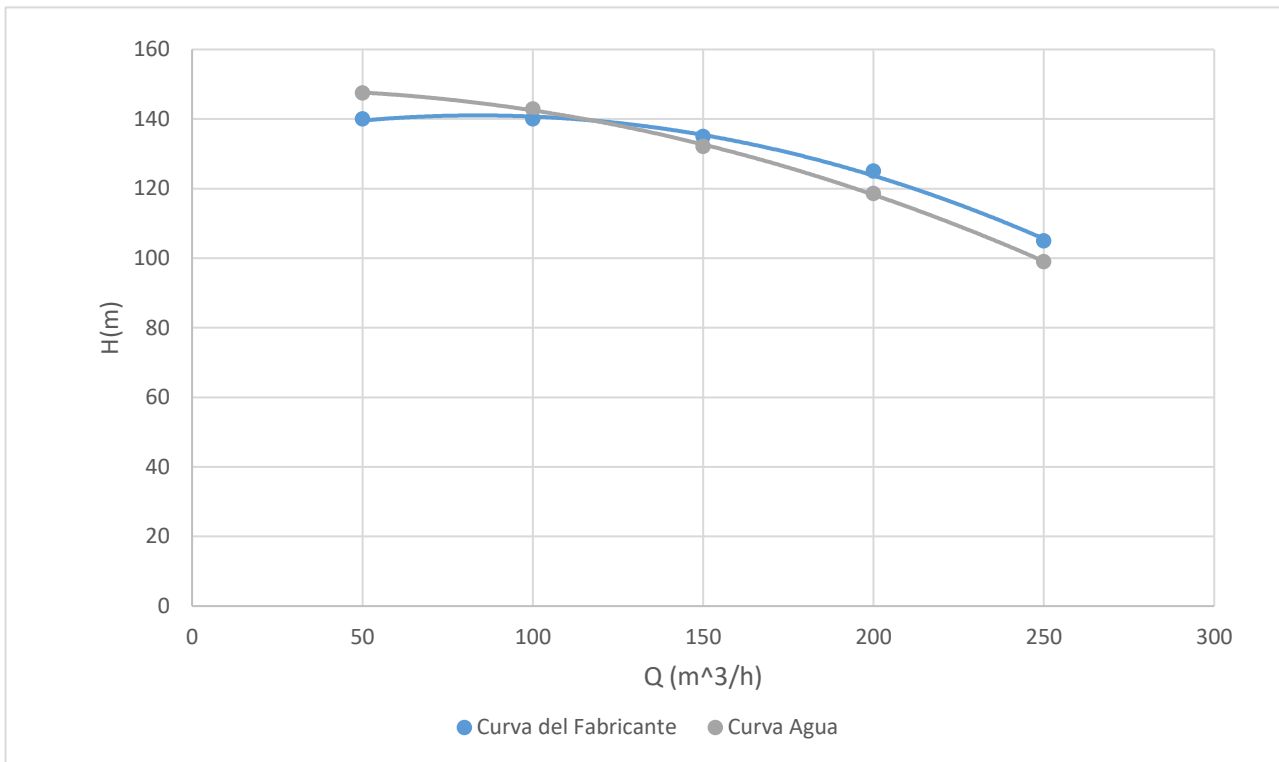


Gráfico 4. Comparación gráfica de curva Q-H del fabricante y simuladas para la bomba SCANPUMP SERIE BA.

Fuente: Figueroa (2023).

Por último, se va a trabajar con la bomba de KSB Sewatec 3HM a 960 RPM (100,5 rad/s), con un rodete de 500mm y una succión de 250mm de diámetro. Esta bomba es empleada para bombear aguas residuales no depuradas, aguas sucias de cualquier tipo y lodos. El fluido igualmente será el agua. Se establece un flujo turbulento de acuerdo al número de Reynolds, se consideran las paredes adiabáticas, presión y temperatura ambiental. El caudal de entrada va a variar desde 150 hasta 900 m³/h en intervalos de 150 en 150 N/m³. Una vez hechas las seis (6) simulaciones correspondientes con estas condiciones, se procede a realizar la tabla en una base de datos (Ver tabla 5) para poder realizar la curva característica (Ver gráfico 5), para luego determinar el porcentaje de desviación (Ver tabla 6), y poder graficar estos valores para observar las diferentes curvas (Ver gráfico 6).

Tabla 5. Resultados tabulados de las simulaciones para la KSB Sewatec 3HM con flujo de agua.

Nº	Caudal(m3/h)	Altura (m)	Eficiencia (%)	Potencia Hidráulica (kW)
1	150	31.5982	45.8651808	27.797969
2	300	26.0924	64.9392552	32.883097
3	450	24.0916	67.4544348	38.236042
4	600	22.9017	76.6739196	41.609799

5	750	15.9278	77.8667688	46.679407
6	900	13.9015	73.9257948	48.404358

Fuente: Figueroa (2023).

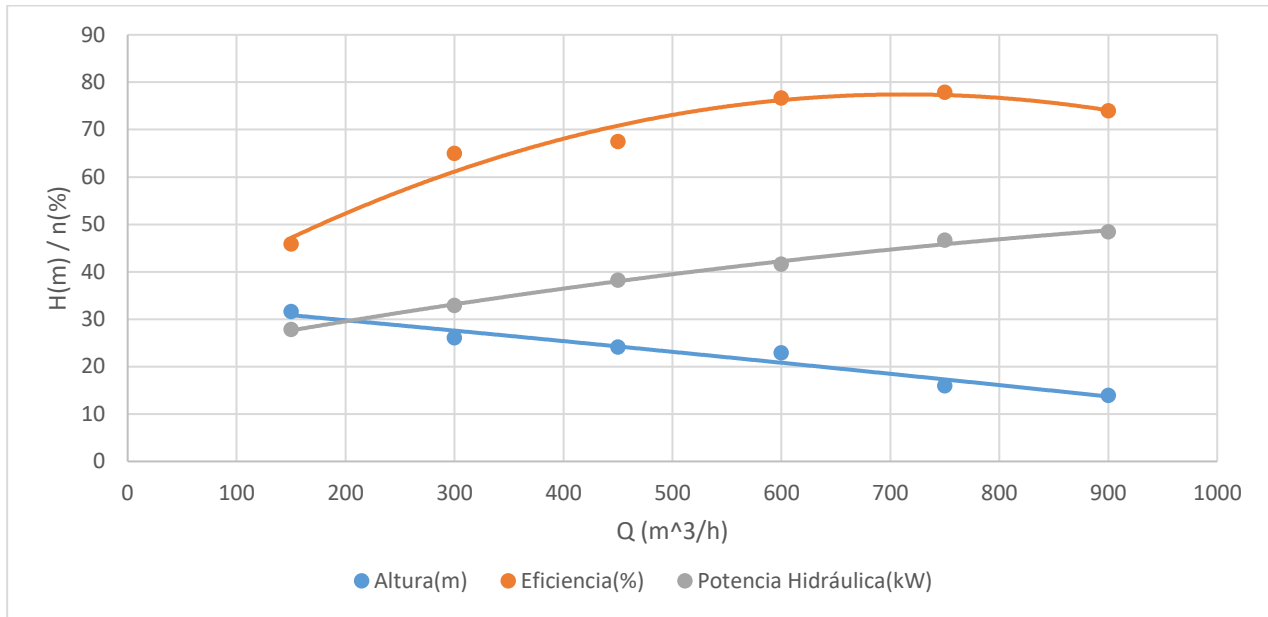


Gráfico 5. Curva característica simulada de la bomba KSB Sewatec 3HM con flujo de agua.

Fuente: Figueroa (2023).

Tabla 6. Cálculo de desviación estándar para la bomba Sewatec 3HM.

N°	Caudal(m3/h)	Fabricante	Agua	Agua
		Altura (m)	Altura(m)	Diferencia
1	150	30	31.5982	1.5982
2	300	25	26.0924	1.0924
3	450	22	24.0916	2.0916
4	600	19.5	22.9017	3.4017
5	750	16	15.9278	0.0722
6	900	12	13.9015	1.9015
Desviación estándar entre curva original y flujo de agua				1.11

Fuente: Figueroa (2023).

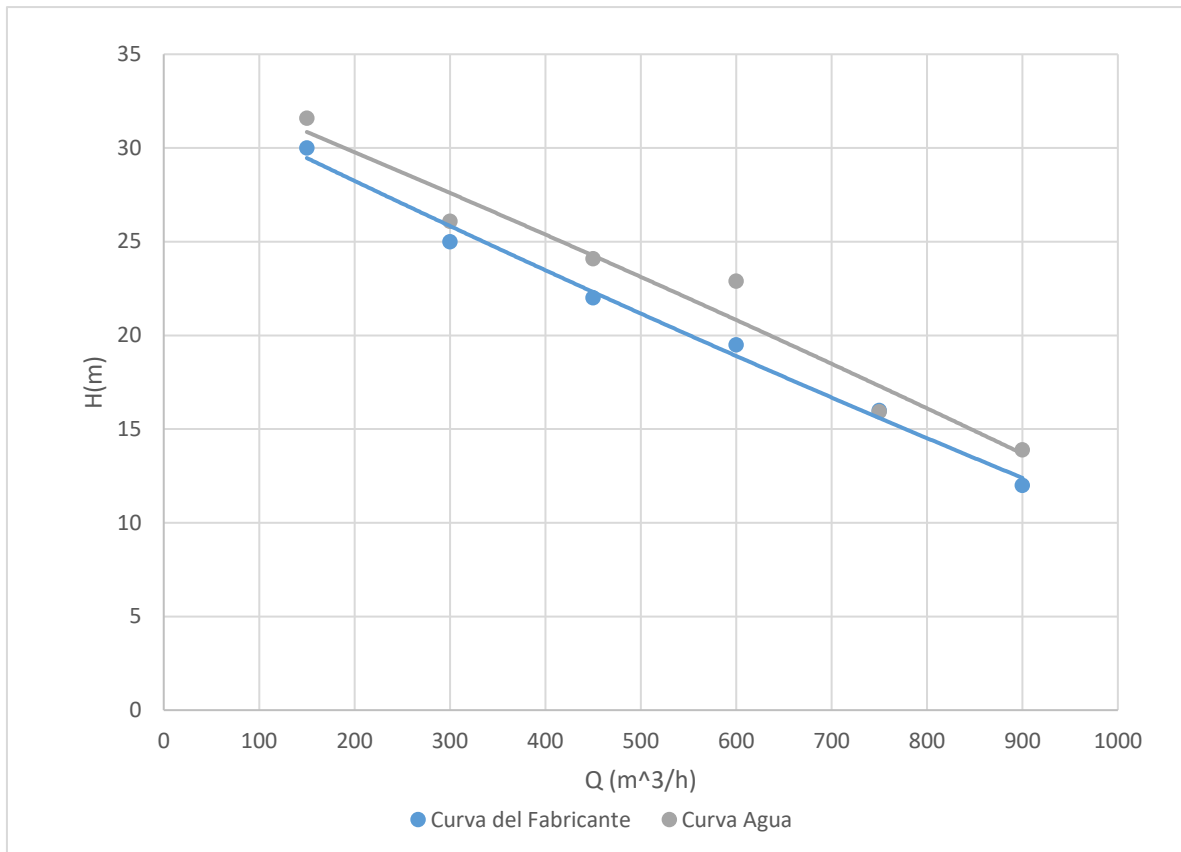


Gráfico 6. Comparación gráfica de curva Q-H del fabricante y simuladas para la bomba Sewatec 3HM.

Fuente: Figueroa (2023).

4.5 Análisis de posibles causas de la diferencia entre los resultados obtenidos.

La discrepancia entre los resultados de la simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) y los resultados otorgados por el fabricante en un banco de pruebas puede deberse a varias razones. En la simulación de CFD, es posible que se han utilizado suposiciones y simplificaciones para reducir la complejidad del modelo. Estas simplificaciones pueden no capturar completamente todos los efectos físicos relevantes presentes en el banco de pruebas, lo que puede conducir a diferencias en los resultados. Las condiciones de frontera utilizadas en la simulación pueden no reflejar con precisión las condiciones reales del banco de pruebas. Estas son las condiciones de entrada y salida de la bomba, la geometría del sistema de tuberías (que se desprecia en la simulación) y las condiciones de presión y temperatura que pueden variar entre la simulación y el banco de pruebas, lo que puede afectar los resultados.

CONCLUSIONES

En este trabajo de fin de grado se ha desarrollado la teoría de turbomáquinas centrándose especialmente en el Teorema de Bernoulli y la Ecuación de Euler, que se han utilizado para comprender el funcionamiento y comportamiento de una bomba centrífuga.

La utilización del software de diseño SolidWorks Flow Simulation facilita la realización del modelado y simulación de flujo de una bomba centrífuga con precisión, algo que disminuye la posibilidad de errores.

Se han obtenido las curvas características de la bomba centrífuga SCANPUMP SERIE BA variando el caudal de entrada desde 100 hasta 350 m³/h a 2900 rpm y se ha obtenido un porcentaje de desviación de 1,45% entre los valores para las alturas obtenidas mediante simulaciones con flujo de agua y los valores de alturas proporcionadas por el fabricante

Se han obtenido las curvas características de la bomba centrífuga KSB CPKN 2^a variando el caudal de entrada desde 50 hasta 250 m³/h a 3500 rpm, obteniendo un porcentaje de desviación de 2,12% entre los valores para las alturas obtenidas mediante simulaciones con flujo de agua y los valores de alturas proporcionadas por el fabricante

Se han obtenido las curvas características de la bomba centrífuga KSB Sewatec 3HM variando el caudal de entrada desde 150 hasta 900 m³/h a 960 rpm, obteniendo un porcentaje de desviación de 1,11% entre los valores para las alturas obtenidas mediante simulaciones con flujo de agua y los valores de alturas proporcionadas por el fabricante

Se han realizado una serie de simulaciones, concretamente 17 simulaciones que han sido necesarias para realizar los distintos estudios. Obteniendo un porcentaje de desviación promedio de 1,56% entre las curvas simuladas con flujo de agua y las curvas características del fabricante.

La principal finalidad de la simulación es demostrar que sigue siendo necesario elaborar un modelo físico real para realizar los distintos estudios para una bomba centrífuga, sin embargo, gracias a las simulaciones realizadas con SolidWorks Flow Simulation se pueden obtener datos aproximados del comportamiento real de la bomba.

RECOMENDACIONES

En el momento de la exportación del modelo 3D se debe tener bien en cuenta qué elementos se desean exportar dependiendo de la aplicación, ya sean los dominios fluidizados, el modelo físico con o sin extensiones, configuraciones CFD, entre otros elementos que pueden ser seleccionados para ser exportados.

La definición de las condiciones de borde es de vital importancia para los resultados de la simulación, ya que influirán en gran medida en los resultados. Debido a esto es recomendable tener unos valores de condición de borde previamente estudiados antes de la realización de las simulaciones.

Se exhorta a realizar un mallado que presente satisfactorias estadísticas métricas; esto ayudará en la precisión de los resultados obtenidos.

Es recomendable calcular y tener en cuenta los errores numéricos que puede generar la simulación, los cuales pueden ser significativo en función de las ecuaciones y el número de iteraciones realizadas. Para ayudar a solucionar estos errores, se recomienda realizar varias simulaciones, para definir condiciones iniciales más cercanas a las reales, esto ayuda a reducir el número de iteraciones para conseguir resultados, pues mientras menor el número de iteraciones, más precisos los resultados y la condición de borde.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (2006). **El proyecto de la Investigación**. Séptima edición.
- Benigno y Laurencio (2016). Artículo “**Caracterización reológica de un lodo que se genera en el lavado de árido**”. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.
- Callo Conto (2020). Tesis de Grado “**Optimización en la instalación y uso de bombas centrífugas mediante la aplicación de criterios de confiabilidad**”. Universidad Nacional De San Agustín De Arequipa. Arequipa, Perú.
- Calderón, G. Contreras, R. (2003). Trabajo de Grado “**Estudio de la cavitación en las bombas centrífugas**”. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena, Colombia.
- Castillo G, José. Universidad de Concepción (2013). **Cavitación en bombas centrífugas: su origen y sus efectos**.
- Fernández, J. y Brizuela, G. (2019). Tesis de grado “**Estudio del fenómeno de Cavitación en el dominio Fluidizado impulsor-voluta De una bomba centrífuga Usando técnicas de CFD**”. Universidad José Antonio Páez. Venezuela, Carabobo.
- Ferranti (2018). Tesis de Grado “**Simulación numérica y tridimensional de flujo bifásico aire-agua patrón estratificado a través de una válvula de compuerta de 2” DN**”. Universidad Nacional Experimental del Táchira. San Cristóbal, Venezuela.
- Ferziger, J. y Peric, M. (2002). **Computational Methods for fluid dynamics**, tercera edición.
- Finol, M. Camacho, H. (2008). **El proceso de investigación científica**.
- Hernández, R. Fernandez, C. y Baptista L. (2010). **Metodología de la investigación**.
- KSB Compañía Sudamericana de Bombas S.A. (2022). **Characteristic Curves Booklet KSB CPKN 2^a**.
- KSB Compañía Sudamericana de Bombas S.A. (2022). **Characteristic Curves Booklet KSB Sewatec 3HM**.
- KSB Compañía Sudamericana de Bombas S.A. (2002). Manual de entrenamiento “**Selección y aplicación de bombas centrífugas**”. Primera edición.
- Muñoz, J. y Santos, R. (2014). **Guía de Turbomáquinas**. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Primera edición.

Navas Moncada (2021). Tesis de grado “**Diseño de sistema para la reutilización del agua en el proceso de enfriamiento para embutidos en hornos VEMAG**”. Universidad Nacional Experimental del Táchira. San Cristóbal, Venezuela.

Palella, S. y Martins, F. (2012). Metodología de la investigación cuantitativa. Tercera edición.

Solano Mendoza, B. (2016). Tesis de grado “**Diseño de un sistema de bombeo en paralelo para la conducción de agua potable del cárcamo 2 al cárcamo 3 de la Planta Agrícola oriental D.F.**”. Instituto politécnico nacional. México, D.F.

SCANMPUMP (2020). **Manual de operación SCANPUMP SERIE BA.**

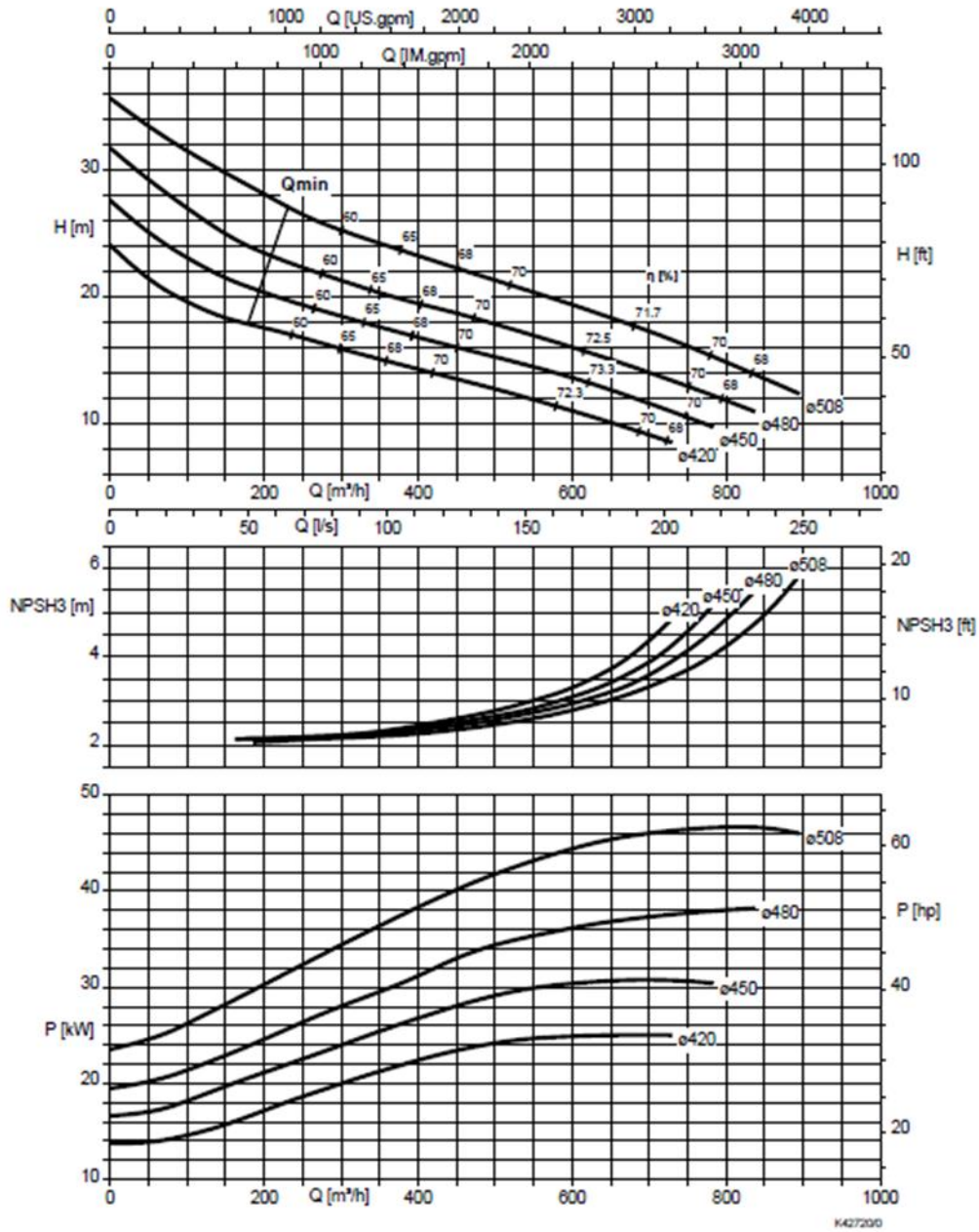
Tamayo y Tamayo, M. (2003). **El Proceso de La Investigación Científica.**

Universidad José Antonio Páez (2020). **Manual para la elaboración y presentación de los anteproyectos, proyectos de trabajos de grado, trabajos de grado, tesis doctoral e informe de pasantía y extramuros de la Universidad José Antonio Páez.** Valencia, Venezuela.


Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2016). **Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales.** Quinta edición. Caracas: Autor.

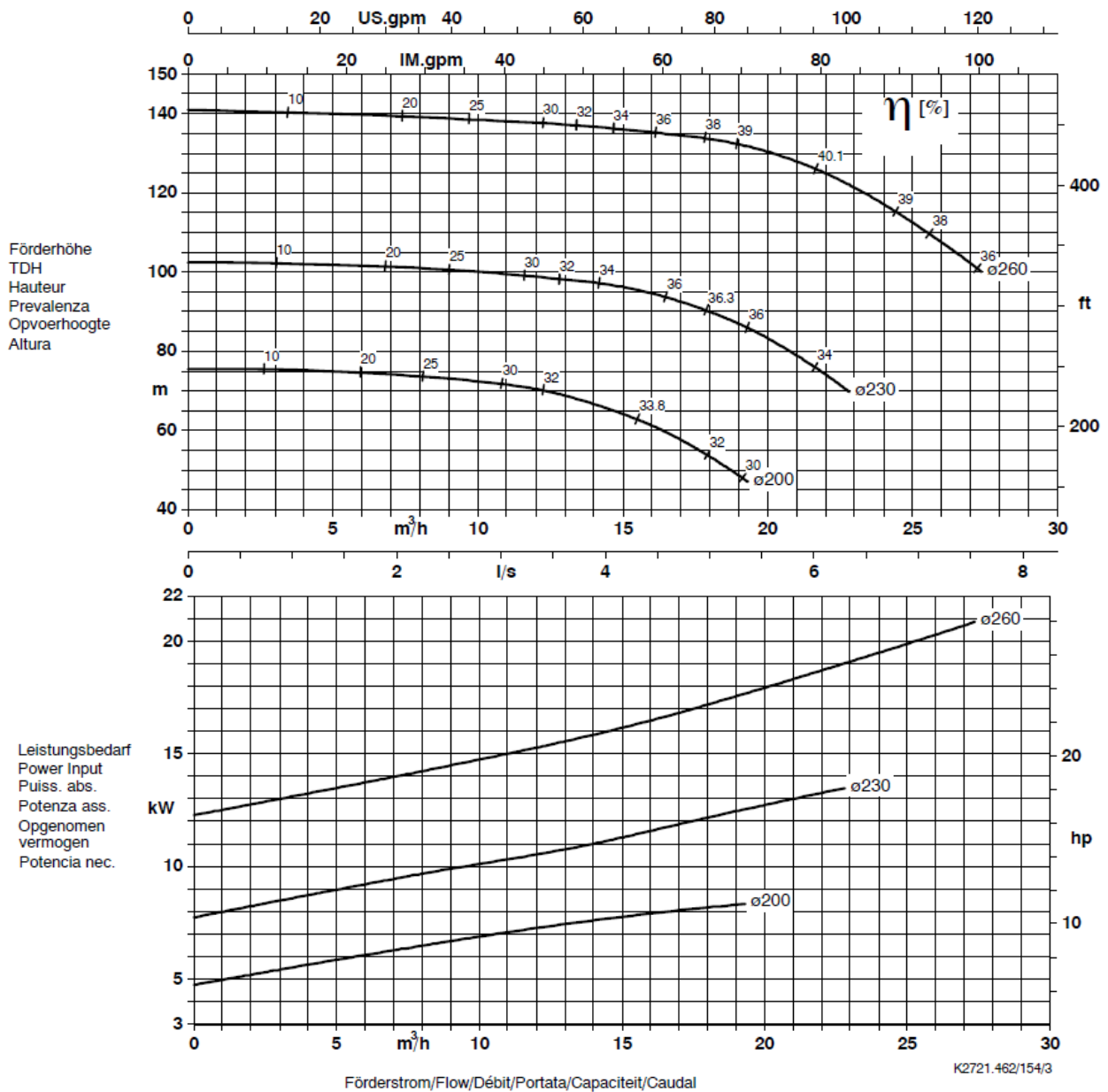
ANEXOS

Sewatec E 200-500, n = 960 rpm



Curva característica de KSB Sewatec 3HM– Manual del fabricante.

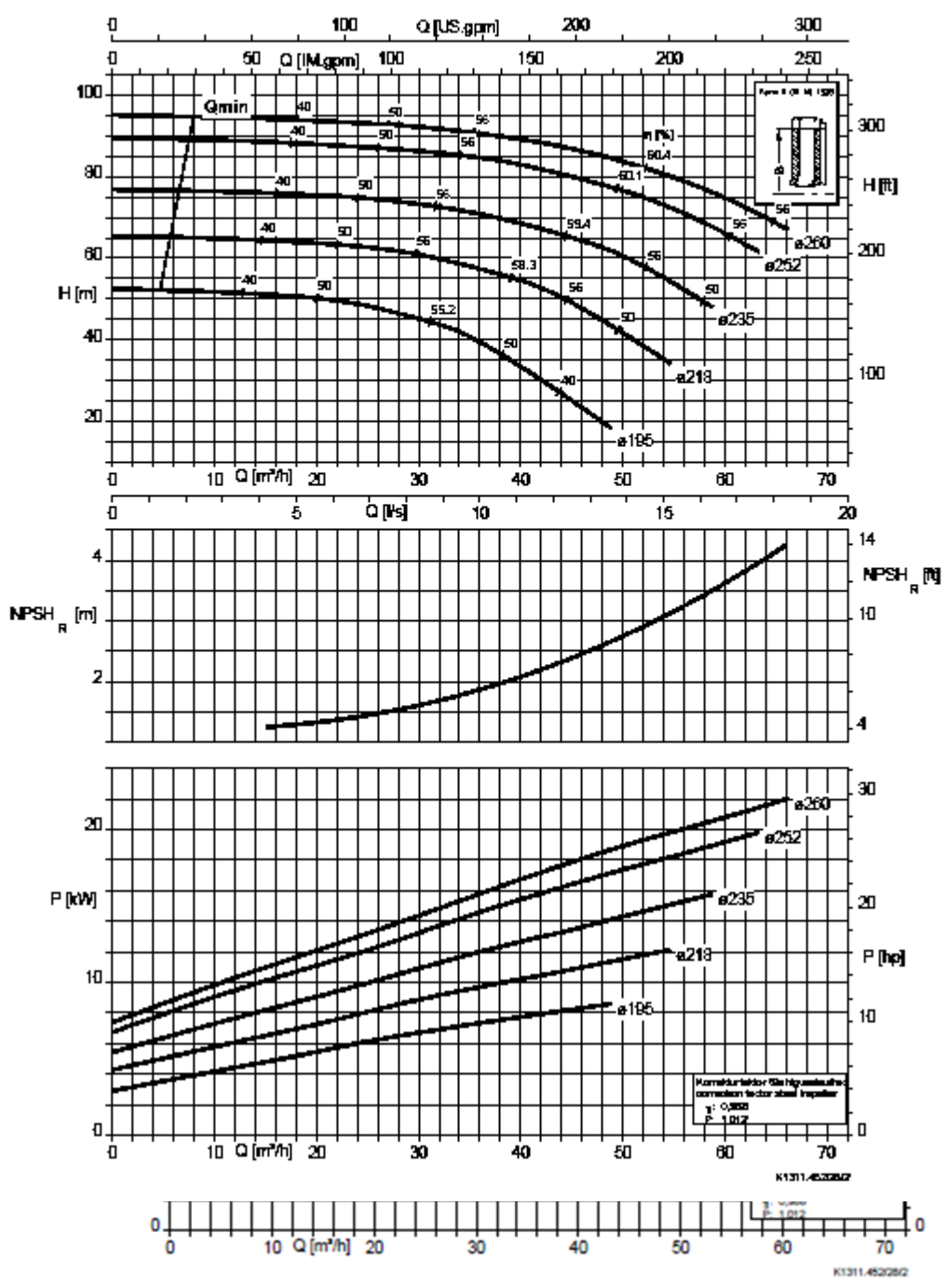
Baureihe-Größe Type-Size Modèle CPK-D / CPKN / -CHs 32-250 - HPK-L	Tipo Serie Tipo 32-250	Nenn Drehzahl Nom. speed Vitesse nom. 3500 1/min	Velocità di rotazione nom. Nominaal toerental Revoluciones nom.	Lauf rad-ø Impeller Dia. Diamètre de roue	ø Girante ø Waaier ø Rodete	 KSB KSB Aktiengesellschaft Postfach 1361 91253 Pegnitz Bahnhofplatz 1 91257 Pegnitz
Projekt Project Projet	Progetto Projekt Proyecto	Angebots-Nr. Project No. No. de l'offre	Offerta-No. Offertenr. Offerta-No.	Pos.-Nr. Item No. No. de pos.	Pos.-Nr. Positiernr. Pos.-Nr.	



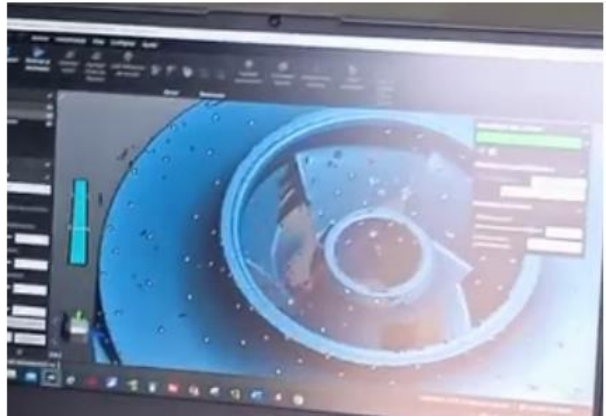
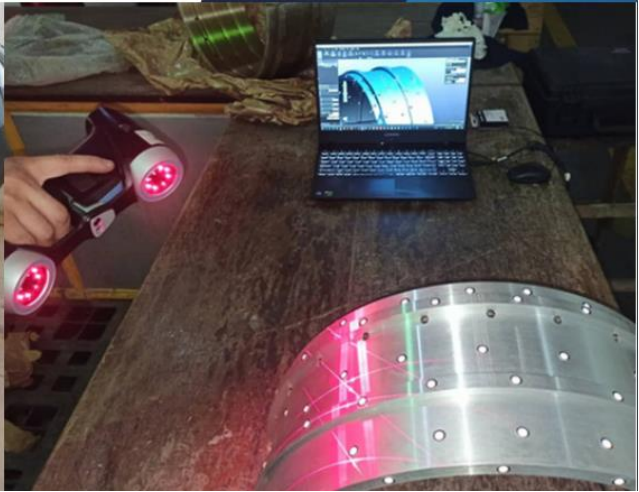
Lauf rad austrittsbreite / Impeller outlet width / Largeur à la sortie de la roue 6 mm
 Luce della girante / Waaier uitbreedte / Anchura de salida rodete 6 mm

Curva característica de KSB CPKN 2ª – Manual del fabricante.

SERIE BA $n = 2.900 \text{ rpm}$



Curva característica de SCANPUMP SERIE BA – Manual del fabricante.



Ejemplos prácticos de la aplicación de la ingeniería inversa mediante escáner 3D.

APÉNDICES

OBJETIVO ESPECÍFICO	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES	ÍTEMS	FUENTE DE INFORMACIÓN
Diagnosticar la situación actual de la aplicación de la ingeniería inversa para talleres de reparación de bombas centrífugas industriales	Aplicación de la Ingeniería Inversa	Tecnologías	Técnicas empleadas	1	Entrevista Estructurada con Guía de Preguntas
			Aprovechamiento de recursos	2	
			Confiabilidad	3	
	Bomba Centrífuga	Fluido	Índice de viscosidad	4	
			Clasificación de Bombas	5	

Cuadro de operalización de variables.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

INSTRUCCIONES PARA LA GUIA DE ENTREVISTA

- Indique su función dentro de la empresa
- Proceda a leer detenidamente cada una de las preguntas
- Responda de manera objetiva
- En caso de dudas, consulte con la persona encargada de aplicar el cuestionario

Nº	Guión de entrevista
1	Desde su óptica, ¿Cómo se aplica la ingeniería inversa al proceso de restauración y/o reparación de bombas centrífugas industriales?
2	De acuerdo a su experiencia en ramo hidráulico ¿Qué herramientas y equipamiento se utilizan para llevar a cabo el proceso de ingeniería inversa en la identificación de fallas y la reconstrucción de las piezas y componentes de la bomba?
3	Desde su experiencia ¿Cómo se verifican las curvas de carga y rendimiento de una bomba centrífuga luego de realizar cualquier servicio de reparación y/o mantenimiento?
4	Desde su punto de vista, ¿Cómo influye la viscosidad de un fluido en el funcionamiento de una bomba centrífuga?
5	Desde su experiencia ¿Cuáles son los principales tipos de bombas centrífugas con los que trabaja la empresa, de acuerdo a su fluido de trabajo?

Guión de entrevista – Técnica de recolección de datos.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Entrevista aplicada al ingeniero mecánico Hendry Figueroa, gerente de servicios de TESTPUMP C.A.

+580244484057
hafigueroa@testpump.ve

Nº	Entrevista
1	Se aplica al momento de la identificación de propiedades geométricas, ya que permite reconocer sus medidas con total exactitud mediante las herramientas correspondientes de escaneo 3D. Ahorrando a la empresa tiempo y trabajo que resulta crucial para satisfacer las necesidades del cliente.
2	En la empresa TESTPUMP C.A. se cuenta principalmente con el escáner 3D HandySCAN de AMETEK, debido a su fácil manejo, confiabilidad, precisión y a la compatibilidad con los programas utilizados.
3	Al realizarle un servicio a cualquier bomba, se realiza de forma impecable y sin alterar sus propiedades mecánicas, geométricas o materiales para seguir teniendo de referencia las curvas características proporcionadas por el fabricante original
4	La viscosidad de un fluido tiene un impacto significativo en el funcionamiento de una bomba centrífuga. Por ejemplo, a medida que la viscosidad aumenta, la eficiencia de la bomba disminuye, se producen mayores pérdidas de carga debido a la fricción interna del fluido, tiene más consecuencias el fenómeno de la cavitación y aumenta la altura neta positiva en la aspiración (NPSH), entre otras cosas.

Respuestas de la entrevista aplicada.



ANEXO C
REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

HOJA DE REGISTRO PARA LA VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO

INSTRUCCIONES: Marque con una X el recuadro que identifique su punto de vista respecto al ítem de acuerdo a las siguientes apreciaciones:

- **CLARO:** Recolección simple y eficiente que ayuda a las personas a entender con facilidad lo escrito.
- **CONFUSO:** Esta redactado de forma deficiente o resulta complicado entenderla idea de la pregunta.
- **INCOHERENTE:** Redacción con una falta total de coherencia entre varias ideas, que contradice y no guarda una relación lógica.

En la columna de observaciones puede complementar con su apreciación

Ítems	Redacción de ítems			Pertinencia de los Objetivos		Observaciones
	Claro	Confuso	Incoherente	Pertinente	No Pertinente	
1	✓			✓		
2	✓			✓		
3	✓			✓		
4	✓			✓		
5	✓			✓		

Fecha: 08/05/2023	Firma:
Especialista: Donato Romanello	Descripción de perfil del especialista: ING. MECÁNICO Msc. Materials Science Engineering

Anexo C – Hoja de registro para la validación del instrumento firmada por el profesor

Donato Romanello



ANEXO C
REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

HOJA DE REGISTRO PARA LA VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO

INSTRUCCIONES: Marque con una X el recuadro que identifique su punto de vista respecto al ítem de acuerdo a las siguientes apreciaciones:

- **CLARO:** Recolección simple y eficiente que ayuda a las personas a entender con facilidad lo escrito.
- **CONFUSO:** Esta redactado de forma deficiente o resulta complicado entenderla idea de la pregunta
- **INCOHERENTE:** Redacción con una falta total de coherencia entre varias ideas, que contradice y no guarda una relación lógica.

En la columna de observaciones puede complementar con su apreciación

Ítems	Redacción de Ítems			Pertinencia de los Objetivos		Observaciones
	Claro	Confuso	Incoherente	Pertinente	No Pertinente	
1	✓			✓		
2	✓			✓		
3	✓			✓		
4	✓			✓		
5	✓					

Fecha: 8/05/2023	Firma:
Especialista: GIOVANNI PIZZELLA	Descripción de perfil del especialista: ING. MECÁNICO HSC INGENIERÍA MECÁNICA UCV

Anexo C – Hoja de registro para la validación del instrumento firmada por el profesor

Giovanni Pizzella



ANEXO C
 REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
 UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

HOJA DE REGISTRO PARA LA VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO

INSTRUCCIONES: Marque con una X el recuadro que identifique su punto de vista respecto al ítem de acuerdo a las siguientes apreciaciones:

- **CLARO:** Recolección simple y eficiente que ayuda a las personas a entender con facilidad lo escrito.
- **CONFUSO:** Esta redactado de forma deficiente o resulta complicado entenderla idea de la pregunta.
- **INCOHERENTE:** Redacción con una falta total de coherencia entre varias ideas, que contradice y no guarda una relación lógica.

En la columna de observaciones puede complementar con su apreciación

Ítems	Redacción de Ítems			Pertinencia de los Objetivos		Observaciones
	Claro	Confuso	Incoherente	Pertinente	No Pertinente	
1	✓			✓		
2	✓			✓		
3	✓			✓		
4	✓			✓		
5	✓			✓		

Fecha: 08/MAYO/2023	Firma:
Especialista: FREDY BARRAGÁN	Descripción de perfil del especialista: ING MECÁNICO EAP AUTOMATIZACIÓN MSC MANUFACTURA y MARKETING Dr. EN EDUCACIÓN

Anexo C – Hoja de registro para la validación del instrumento firmada por el profesor
 Fredy Barragán