



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS
CENTRIFUGAS EN SERIE Y EN PARALELO**

**ÁNGEL MIGUEL ARDILA QUINTERO CÓDIGO: 91078690
CARLOS ALFREDO RODRÍGUEZ DÍAZ CÓDIGO: 91506597
RONAL ANDRÉS GÓMEZ MARÍN CÓDIGO: 1098622423**

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
BARRANCABERMEJA
10-10-2019**



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS
CENTRIFUGAS EN SERIE Y EN PARALELO**

ÁNGEL MIGUEL ARDILA QUINTERO CÓDIGO: 91078690
CARLOS ALFREDO RODRÍGUEZ DÍAZ CÓDIGO: 91506597
RONAL ANDRÉS GÓMEZ MARÍN CÓDIGO: 1098622423

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electromecánico

DIRECTOR
MSC. LEIDYS MARLEYN RODRÍGUEZ CASTRO

CODIRECTOR
ING. ALEXIS LÓPEZ FIGUEROA

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN RN INGENIERÍA Y CIENCIAS SOCIALES -
DIANOIA**

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
BARRANCABERMEJA
14-10-2019

Nota de Aceptación


Firma del jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

Me gustaría dedicar esta Tesis a Dios y toda mi familia.

Para mis padres Ángel y María Ernestina, a mi esposa e hijos por su apoyo y ayuda en momentos difíciles. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia, empeño y todo ello con una gran dosis de amor y sin esperar nunca algo a cambio. A nuestros docentes, en especial a nuestra directora de proyecto profesora Leidys Marleyn Rodríguez Castro, quienes me apoyaron en todo momento impartiendo su conocimiento. A todas aquellas personas que estuvieron presentes durante esta etapa de nuestras vidas apoyándome con motivación constante para culminar con éxito este sueño.

A todos ellos, muchas gracias de todo corazón.

Ángel Miguel Ardila Quintero

El presente trabajo de grado está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano

Ronal Andrés Gómez Marín

En primer lugar, a Dios quien es mi fiel compañero de viaje, a mi madre María Helena Díaz Meneses con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más.

A mis hijos Carlos Santiago Rodríguez Jaimes y Sara Viviana Rodríguez Jaimes con quienes he aprendido que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento han hecho de mí una mejor persona, de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Carlos Alfredo Rodríguez Díaz

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presente. Mi profundo agradecimiento a las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) y a todos sus docentes quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad. A nuestra directora profesora Leidys Marleyn Rodríguez Castro, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

Gracias.

Ángel Miguel Ardila Quintero

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo. De manera especial a los docentes y tutores de tesis, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores. A las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

Ronal Andrés Gómez Marín

Dios eres mi primer lugar, ese amor infinito que me cubre cada día, me permites sonreír ante todos mis logros que no serían posibles sin tu ayuda. Este trabajo de

grado ha sido una gran bendición en todo sentido y te lo agradezco padre, todo es gracias a ti que esta meta está cumplida.

Hoy la vida me brinda la oportunidad de decirle a mis padres Carlos julio Rodríguez Carlier y María Helena Díaz Meneses que estoy muy agradecido con ellos por enseñarme a dar siempre lo mejor, a creer en mí, por ser esa fuente de motivación para salir adelante, por su amor recibido, su dedicación y la paciencia al preocuparse por mi cada día.

A mis hijos, siendo el mayor tesoro de mi vida, gracias a ellos por entender que fue necesario realizar sacrificios como momentos a su lado, tiempo del cual los dueños eran ellos. Gracias por ser el motor que siempre este encendido en mi vida. A mi esposa mi sincero agradecimiento por entenderme en todo, por su apoyo incondicional. Gracias a mi familia por permitirme cumplir con excelencia el desarrollo de esta tesis.

Gracias a mi maestra Leidys Marleyn Rodríguez Castro por haber elegido ser maestra y directora de nuestro proyecto de grado en esta maravillosa Institución Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), por su valioso aporte en mi vida y por haberme permitido el desarrollo de esta tesis.

Carlos Alfredo Rodríguez Díaz

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<u>RESUMEN EJECUTIVO.....</u>	<u>13</u>
<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>14</u>
<u>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....</u>	<u>15</u>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2. JUSTIFICACIÓN	16
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES.....	17
<u>2. MARCOS REFERENCIALES.....</u>	<u>21</u>
2.1. MARCO TEÓRICO	21
2.1.1. GENERALIDADES SOBRE LAS BOMBAS.....	21
2.1.2. BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	21
2.1.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS	22
2.1.4. ELEMENTOS DE LAS BOMBAS CENTRIFUGAS	23
2.1.5. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA BOMBA CENTRIFUGA	25
2.1.6. SELECCIÓN DE BOMBAS CENTRIFUGAS.....	28
2.1.7. INSTALACIÓN Y MONTAJE DE LAS BOMBAS	30
2.1.7.1 Instalación de las bombas	30
2.1.7.2 Montaje de bombas	33
2.1.8. APLICACIONES DE LAS BOMBAS CENTRIFUGAS.....	34
2.1.9. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA.....	34
2.1.10. MODELAMIENTO Y DISEÑO POR ELEMENTOS FINITOS CON SOLIDWORKS SIMULATION	35
2.1.10.1 Concepto Principal de Análisis de Diseño.....	36
2.1.11. ECUACIONES FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DEL BANCO DE BOMBAS	37
2.1.11.1 Principio de Bernoulli	37
2.1.11.2 Caudal.....	38
2.1.11.3 Área interna de una tubería	38
2.1.11.4 Pérdidas de carga total.....	39
2.1.11.5 Pérdidas de carga mayores	39
2.1.11.6 Pérdidas menores.....	42
2.1.11.7 Eficiencia de una bomba.....	43
2.2. MARCO LEGAL	43
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	45
<u>3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS</u>	<u>47</u>

3.1.	ESTUDIO HIDRÁULICO DEL BANCO DE PRUEBAS	47
3.1.1.	DISEÑO HIDRÁULICO DE LAS BOMBAS EN SERIE.....	47
3.1.2.	DISEÑO HIDRÁULICO DE LAS BOMBAS EN PARALELO	47
3.1.3.	CÁLCULO DE PÉRDIDAS DEL SISTEMA.....	48
3.1.3.1	Cálculo de pérdidas configuración en serie.....	48
3.1.3.2	Cálculo de pérdidas configuración en paralelo.....	53
3.2.	SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS	58
3.2.1.	BOMBA CENTRÍFUGA.....	58
3.2.2.	TANQUE DE ALMACENAMIENTO	58
3.2.3.	TUBERÍA	59
3.2.4.	ACCESORIOS	59
3.2.4.1	Válvula de bola	59
3.2.4.2	Válvula de globo	60
3.2.4.3	Codos.....	61
3.2.4.4	Tees	62
3.2.4.5	Válvula cheque	62
3.2.4.6	Universales.....	63
3.2.5.	ESTRUCTURA.....	63
3.2.6.	TABLERO DE CONTROL Y SISTEMA ELÉCTRICO	63
3.2.7.	INSTRUMENTACIÓN.....	65
3.2.7.1	Manómetros.....	65
3.2.7.2	Caudalímetro	66
3.3.	DISEÑO FINAL CON SUS RESPECTIVOS COMPONENTES	67
3.4.	SIMULACIÓN DEL FLUIDO EN LA BOMBA CENTRIFUGA EMPLEANDO EL SOFTWARE SOLIDWORKS.....	69
3.5.	GUÍA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS ..	77
<u>4.</u>	<u>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA PRÁCTICA.....</u>	<u>84</u>
<u>5.</u>	<u>CONCLUSIONES.....</u>	<u>89</u>
<u>6.</u>	<u>RECOMENDACIONES.....</u>	<u>91</u>
<u>7.</u>	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	<u>92</u>

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Principio de funcionamiento de la bomba.....	22
Figura 2. Elementos de una bomba centrifuga.	25
Figura 3. Altura manométrica total.	26
Figura 4. Curva característica de una bomba HQ.....	28
Figura 5. Instalación de bombas en serie.....	30
Figura 6. Instalación de bombas en paralelo.....	32
Figura 7. Elemento tetraédrico definido por nodos.	36
Figura 8. Diseño hidráulico de las bombas en serie.	47
Figura 9. Diseño hidráulico de las bombas en paralelo.	48
Figura 10. Esquema de conexión bombas en serie.....	49
Figura 11. Esquema de conexión bombas en paralelo.....	54
Figura 12. Válvula de bola.....	60
Figura 13. Válvula de globo en hierro.....	61
Figura 14. Codo galvanizado.	61
Figura 15. Tee galvanizada.....	62
Figura 16. Válvula cheque en bronce.....	62
Figura 17. Juntas universales galvanizadas.....	63
Figura 18. Diagrama Unifilar.	65
Figura 19. Manómetro rango de medida 0 a 150 psi.	66
Figura 20. Caudalímetro digital rango de medida 15 a 120 L/min.....	67
Figura 21. Diseño final del banco de pruebas.	68
Figura 22. Modelado de la geometría del rodete de la bomba.....	70
Figura 23. Modelado de la succión de la bomba.	71
Figura 24. Modelado de la descarga de la bomba.....	71
Figura 25. Modelado de la bomba Pedrollo.....	72
Figura 26. Condiciones de frontera de la simulación.....	73
Figura 27. Modelo del mallado.....	74
Figura 28. Resultados de la presión del fluido.....	75
Figura 29. Resultados del perfil de velocidad – vista frontal.....	76
Figura 30. Resultados del perfil de velocidad – vista 3D.....	77
Figura 31. Diagrama hidráulico del banco de bombas.....	80
Figura 32. Curvas experimentales de las bombas centrifugas y del fabricante Pedrollo..	85
Figura 33. Resultados del perfil de velocidad $v = 0,33 \text{ m/s}$	87
Figura 34. Resultados del perfil de velocidad $v = 1,42 \text{ m/s}$	87
Figura 35. Resultados del perfil de velocidad $v = 1,58 \text{ m/s}$	87
Figura 36. Resultados de la presión del fluido a la velocidad $v = 1,42 \text{ m/s}$	88
Figura 37. Circuito eléctrico del minibreaker N°1.....	97
Figura 38. Circuito eléctrico del minibreaker N°2.....	97
Figura 39. Circuito eléctrico del fusible.....	98
Figura 40. Construcción del tanque de almacenamiento	100
Figura 41. Corte del tubo cuadrado de acero galvanizado de 1" x 1" para la construcción del soporte.....	100

Figura 42. Armado de la estructura metálica mediante aplicación de soldadura	100
Figura 43. Ubicación del tanque de almacenamiento en el banco de pruebas	100
Figura 44. Cableado de componentes del tablero de control.....	101
Figura 45. Vista general del tablero de control	101
Figura 46. Ubicación de bombas y líneas de tubería	101
Figura 47. Trabajo en equipo para la construcción del banco de pruebas	101
Figura 48. Pintura y embellecimiento de estructura y líneas de tubería.....	102
Figura 49. Vista preliminar banco de pruebas	102
Figura 50. Montaje final banco de pruebas	102
Figura 51. Diagrama hidráulico del banco de bombas.....	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de las bombas centrífugas	50
Tabla 2. Número de Reynolds (Re), factor de fricción (f) y pérdidas de carga en la tubería (hL) calculados a diferentes caudales para tubería de acero negro de 1"	51
Tabla 3. Número de Reynolds (Re), factor de fricción (f) y pérdidas de carga en la tubería (hL) calculados a diferentes caudales para tubería de acero negro de ¾"	51
Tabla 4. Pérdidas por accesorios para la línea de succión de las bombas – tubería de 1"	52
Tabla 5. Pérdidas por accesorios para la línea de descarga de las bombas - tubería de ¾"	52
Tabla 6. Pérdidas totales en el sistema en serie y potencia requerida de la bomba a diferentes caudales.....	53
Tabla 7. Número de Reynolds (Re), factor de fricción (f) y pérdidas de carga en la tubería (hL) calculados a diferentes caudales para tubería de acero negro de 1"	55
Tabla 8. Número de Reynolds (Re), factor de fricción (f) y pérdidas de carga en la tubería (hL) calculados a diferentes caudales para tubería de acero negro de ¾"	56
Tabla 9. Pérdidas por accesorios para la línea de succión de las bombas – tubería de 1"	57
Tabla 10. Pérdidas por accesorios para la línea de descarga de las bombas - tubería de ¾"	57
Tabla 11. Pérdidas totales en el sistema en paralelo y potencia requerida de la bomba a diferentes caudales.....	57
Tabla 12. Características de las bombas centrífugas	58
Tabla 13. Dimensiones de la tubería	59
Tabla 14. Geometría de la bomba Pedrollo.	69
Tabla 15. Resultados experimentales obtenidos con la Bomba B2 independiente.	84
Tabla 16. Resultados experimentales obtenidos con la Bomba B1 y B2 en serie.	84
Tabla 17. Resultados experimentales obtenidos con la Bomba B1 y B2 en paralelo.	84
Tabla 18. Datos experimentales Bomba B2 independiente.....	108
Tabla 19. Datos experimentales Bomba B1 y B2 en serie.	108
Tabla 20. Datos experimentales Bomba B1 y B2 en paralelo.	108

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ficha técnica de la bomba centrífuga Pedrollo CP620.....	95
Anexo B. Diagramas de los circuitos eléctricos del panel de control	97
Anexo C. Manual de operación y uso del caudalímetro.....	99
Anexo D. Registro fotográfico del montaje y construcción del banco de pruebas en serie y paralelo.....	100
Anexo E. Guía práctica del banco de pruebas	103

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de grado comprende el diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de pruebas de bombas centrífugas operadas en serie y paralelo con el propósito de mejorar el aprendizaje de los estudiantes del programa de Ingeniería Electromecánica de las Unidades Tecnológicas de Santander – UTS sede Barrancabermeja, en la materia de mecánica de fluidos.

Por tanto, el desarrollo del proyecto comprende desde la selección de los componentes del banco para su dimensionamiento y construcción tales como las bombas, los accesorios (válvulas, codos, te) y tramos de tubería; así como la selección de los instrumentos de medición (medidores de caudal y de presión) para la ejecución del mismo.

El banco de pruebas permitirá medir caudales y presiones para así poder hallar las curvas características de las bombas; también permitirá la realización de pruebas para la observación del comportamiento de las bombas centrífugas en diferentes condiciones.

Finalmente, este trabajo incluye guías prácticas de operación y mantenimiento del banco para garantizar su buen funcionamiento, uso y desarrollo en las prácticas de laboratorio con los estudiantes.

PALABRAS CLAVE: Banco de pruebas, bombas centrífugas, serie y paralelo.

INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales existen requerimientos de flujo en los que es necesario utilizar un sistema de bombeo con más de una bomba; lo anterior es debido a que se requiere una demanda alta de cabeza o de altura en el proceso.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de dos bombas centrífugas conectadas en serie y en paralelo, mediante el diseño y construcción del banco de pruebas, a fin de mejorar la curva de aprendizaje de los estudiantes y así mismo complementar el laboratorio de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS).

Para el diseño del banco fue necesario realizar previamente un estudio hidráulico de los sistemas en serie y paralelo con el propósito de seleccionar las bombas adecuadas, igualmente se seleccionaron accesorios e instrumentos de medición para garantizar el correcto funcionamiento del mismo.

Este banco tiene acoplado un manual de operación para el desarrollo de las prácticas de laboratorio con los estudiantes y un manual de mantenimiento para prolongar la vida útil de los componentes del banco.

Finalmente, se realizó la simulación de la bomba centrífuga seleccionada previamente para determinar el comportamiento del fluido y de la presión a la entrada y salida de la bomba; para ello, se empleó el paquete de software CFD SolidWorks Fluid Simulation.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) sede Barrancabermeja carece de un banco de pruebas que permita la simulación de bombas centrífugas operadas en serie y paralelo, que demuestre la teoría impartida en clase con métodos prácticos de desarrollo.

En la actualidad, el programa de Ingeniería Electromecánica de las UTS, imparte sólo conocimientos teóricos de mecánica de fluidos a sus estudiantes, sin que estos puedan complementar sus conocimientos con prácticas experimentales a través de bancos de pruebas.

De ahí nace el interés de los estudiantes de crear un banco de pruebas que favorezca las prácticas experimentales y que posibilite la consolidación de los conceptos teóricos para favorecer su aprendizaje.

Por lo expuesto anteriormente se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo diseñar un banco de pruebas que permita evaluar el funcionamiento del circuito de bombas centrífugas en serie y en paralelo para mejorar el aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Electromecánica de las Unidades Tecnológicas de Santander – UTS sede Barrancabermeja?

1.2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el programa de Ingeniería Electromecánica de las UTS sede Barrancabermeja fundamenta la materia de mecánica de fluidos en conceptos netamente teóricos, perdiendo de vista el mejoramiento del conocimiento de los estudiantes mediante el desarrollo de prácticas experimentales a través de bancos. Es por ello que surge la idea de crear un banco de pruebas que incorpore bombas en serie y paralelo, para mejorar el aprendizaje de los estudiantes de la carrera.

Está visto que la actividad experimental es uno de los aspectos clave en el proceso de enseñanza y aprendizaje de las ciencias tanto por la fundamentación teórica que puede aportar a los estudiantes, como por el desarrollo de ciertas habilidades y destrezas para las cuales el trabajo experimental es fundamental, así mismo, en cuanto al desarrollo de ciertas habilidades del pensamiento (López y Tamayo, 2012).

Por lo anterior, se diseñará y construirá un banco de pruebas de bombas centrífugas en serie y paralelo que brinde a los estudiantes las herramientas suficientes para la comprensión de la teoría impartida en clases; al igual que mejorar las competencias de formación del futuro profesional, para que estos sean más competentes y puedan adaptarse fácilmente en el campo laboral.

El presente trabajo se realizará en busca de mejorar la calidad académica de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica de las UTS sede Barrancabermeja, mediante el aprendizaje a través de la práctica; por lo que se hace necesario la implementación de pruebas experimentales que proporcionen los recursos o herramientas necesarias para el aprendizaje de fundamentos de mecánica de fluidos a la comunidad estudiantil.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. *Objetivo general*

Construir un banco de pruebas de bombas centrífugas, basado en un diseño hidráulico, a fin de evaluar su funcionamiento en serie y paralelo.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Realizar el diseño hidráulico para compensar las pérdidas de energía del fluido a través de las trayectorias del sistema mediante la aplicación de los principios de la conservación de la energía y el teorema de Bernoulli.
- Modelar la succión y descarga de la bomba según las configuraciones en serie y en paralelo, empleando la extensión fluid simulation de SolidWorks para analizar la trayectoria del fluido.
- Comparar las curvas de desempeño del sistema de bombas centrífugas tomando como referente los resultados de las prácticas experimentales vs. los datos teóricos del fabricante con el fin de verificar el correcto funcionamiento de las bombas.
- Elaborar guías de operación y mantenimiento del sistema el cual le permitirá al estudiante realizar las prácticas con el banco de pruebas.

1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

A nivel Internacional se encontró una tesis de grado titulado “*Diseño y construcción de un banco de pruebas para bombas centrífugas conectadas en serie y paralelo*”. Diseñaron y construyeron un banco de pruebas para el laboratorio de fluidos de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, para el análisis de bombas operadas en configuración individual, serie y paralelo, con el propósito de enriquecer el

conocimiento de los estudiantes y mejorar la interpretación y utilización de las herramientas mediante la realización de prácticas (Agila y Calahorrano, 2011).

A nivel internacional se encontró una tesis de grado titulado “*Diseño y construcción de un banco de pruebas para la determinación de la eficiencia de bombas centrífugas domiciliarias*”. Diseñaron y construyeron un banco de pruebas de bombas centrífugas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador, para la enseñanza de procesos de transporte de fluidos a nivel industrial. El equipo construido mide la potencia hidráulica real de las bombas, el caudal, la presión, las pérdidas longitudinales y las pérdidas por fricción durante el transporte, para determinar la eficiencia de las bombas en serie o en paralelo (Cajo y López, 2012).

Los resultados muestran que luego de haber ubicado 4 bombas de diferentes características comerciales, se encontró dos diferencias en cuanto a la capacidad máxima de bombeo de las mismas cuando funcionan de forma individual, las bombas Pedrollo y Meyers pueden bombear líquido hasta un promedio de 25L/min, alcanzando la máxima eficiencia de 30%; mientras que las bombas Barrow y Paolo sólo pueden bombear hasta un promedio de 20L/min con una eficiencia máxima de 25%, fenómeno debido a las características físicas y geométricas de las mismas.

A nivel internacional se encontró una tesis de grado titulado “*Automatización de la adquisición de datos en un banco de pruebas de bombas centrífugas instaladas en serie y paralelo*”. Automatizaron un banco de pruebas de bombas centrífugas instaladas en serie y paralelo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con el propósito de obtener un banco confiable, funcional y manipulable, que permita a las estudiantes desarrollar conocimientos y destrezas sobre las características de los sistemas de bombeo con tablas de resultados y gráficas. Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, permitieron afirmar que los sistemas en serie producen incrementos de la presión de bombeo a caudal constante, mientras que

los sistemas en paralelo aumentan el caudal a presiones de bombeo constantes (Moyano y Naranjo, 2015).

A nivel internacional se encontró una tesis de grado titulado “*Proyecto de banco de pruebas para bombas centrífugas*”. Se diseñó un banco de pruebas para bombas centrífugas en la Escuela Técnica Superior de Náutica y Máquinas de la Universidad de Coruña, con el objetivo de obtener las curvas características y las principales características de funcionamiento de las bombas centrífugas de la empresa Gefico Enterprise S.A. Así mismo, el banco de pruebas tiene como objetivo la empleabilidad con fines educativos en prácticas de materias como “Mecánica de fluidos” e “Hidráulica” (Correa, 2016).

A nivel internacional se encontró una tesis de grado titulado “*Diseño, implementación y control para un banco de pruebas con bombas centrífugas en conexión serie y paralelo*”. Desarrollaron un banco de pruebas con un sistema de adquisición de datos, con el objetivo de mejorar la calidad académica de los estudiantes de Ingeniería Química en el Laboratorio de Operaciones Unitarias ESPOL de la Escuela Superior Politécnica de Ecuador, mediante el aprendizaje a través de la práctica, la forma en que deben ser operadas las bombas, tanto en paralelo como en serie. El desarrollo del proyecto implicó la recopilación de datos, mediante el desarrollo del software SCADA en Labview, con el fin de ilustrar las curvas características del sistema, así como determinar la eficiencia de los métodos prácticos y teóricos (Amores *et al.*, 2018).

A nivel nacional se encontró una tesis de grado titulado “*Diseño de un sistema - banco de pruebas- para la realización de pruebas de rendimiento a bombas centrífugas*”. Se realizó el diseño de una aplicación en LabView para monitorear y controlar mediante un computador, la realización de pruebas de rendimiento dinámico a bombas centrífugas en la empresa HIDROMAC S.A. de Barranquilla. Los resultados evidencian que el programa captura la información proveniente de

los transductores, equipos encargados de monitorear las variables físicas involucradas en el proceso de caracterización de las bombas, las interpreta y realiza los cálculos necesarios con el fin de presentar un informe con los resultados obtenidos.

Por otra parte, se logró que la interfaz gráfica del programa sea simple y sencilla, pero a la vez clara y completa; además, el programa permite guardar un folio con todas las pruebas realizadas con el fin de crear una base de datos de respaldo a los productos probados (Mejía, 2009).

A nivel nacional se encontró una tesis de grado titulado “*Diseño, construcción y puesta a prueba de un banco de bombas centrífugas en serie, paralelo y mixto*”. Construyeron un banco de pruebas de bombas centrífugas para el análisis del funcionamiento de los circuitos en serie, paralelo y mixto, con el propósito de fortalecer el laboratorio de máquinas hidráulicas de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga. El banco permitió la medición del caudal y la presión para hallar las curvas características de cada bomba y favorecer el desarrollo de pruebas (prácticas de laboratorio) para analizar el comportamiento de las bombas en diferentes condiciones de operación (García y Suarez, 2010).

2. MARCOS REFERENCIALES

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. *Generalidades sobre las bombas*

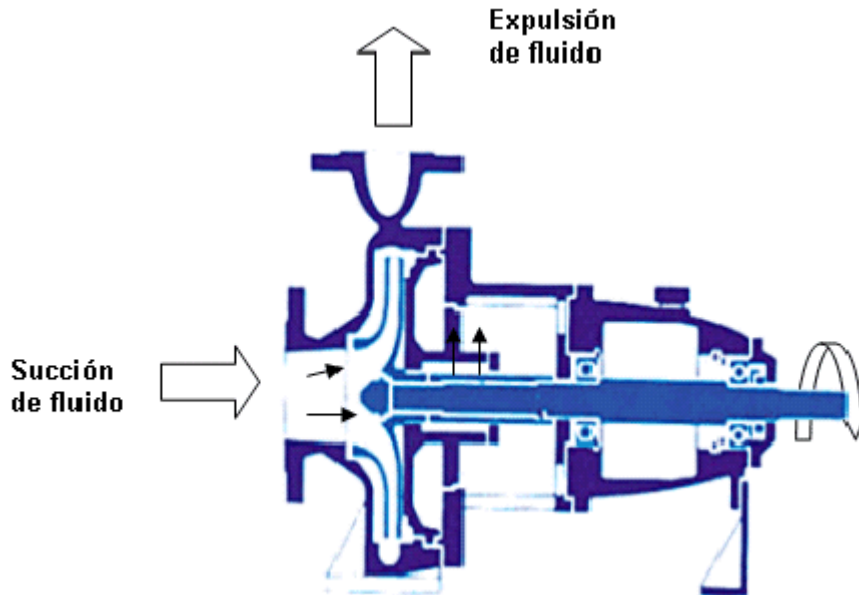
Las bombas son máquinas en las cuales se produce una transformación de la energía mecánica en energía hidráulica -velocidad y presión- comunicada al fluido que circula por ellas. Dicho de otra forma, la corriente del fluido se impulsa desde un estado de baja presión estática a otro de mayor presión. Están compuestas por un elemento rotatorio denominado impulsor, el cual se encuentra dentro de una carcasa llamada voluta.

El fluido entra axialmente a través del ojo del impulsor, pasando por los canales de éste y suministrándosele energía cinética mediante los álabes que se encuentran en el impulsor para posteriormente descargar el fluido en la voluta, el cual se expande gradualmente, disminuyendo la energía cinética adquirida para convertirse en presión estática (Soler, 1992).

2.1.2. *Bombas centrífugas*

Las bombas centrífugas disponen de una boca de entrada o aspiración y una de salida o impulsión, entre las que se sitúan una serie de órganos, de los cuales el más conocido es el rodete, disco grande con diversas palas insertadas (ver Figura 1). Se denominan así porque la cota de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga (Soler, 1992).

Figura 1. Principio de funcionamiento de la bomba.



Fuente: Recuperado de la página web <http://www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-95.htm>

La aplicación a diversos usos, provoca que el número de palas o alabes se reduzca a uno en cierto caso, e inclusive, conlleva a que pierdan la forma curvada y sean rectilíneas y a modo de protuberancia de un disco (principio de vortex).

2.1.3. Características principales de las bombas centrífugas

- Los rendimientos energéticos son buenos, usualmente entre 0,7 y 0,8, pudiendo alcanzar el 0,95 en función del tamaño de la bomba.
- Manejan fácilmente caudales medios y grandes.
- Trabajan a muy bajas y a elevadas presiones.
- No funcionan bien con sustancias muy viscosas.
- Poco voluminosas y poco pesadas.
- Elásticas en su aplicación.
- Tecnológicamente muy desarrolladas y difundidas (Soler, 1992).

2.1.4. Elementos de las bombas centrifugas

Rodete: Elemento determinante de las características de la bomba. Va sujeto al eje, salvo en las transmisiones magnéticas. Es el encargado de transferir al líquido la energía recibida del eje. Se compone de; cubo o elemento asimilable a un disco que enlaza el eje con los alabes, los alabes o elemento de guiado del líquido que configuran el triángulo de velocidades definidor de las características de bombeo y la llanta, otro elemento asimilable a un disco y que configura los canales de flujo con los alabes y el cubo. La llanta puede ser inexistente, caso de rodetes abiertos, realizando las funciones en el cuerpo de bomba.

El número de alabes suele estar entre uno y doce. El número de alabes y la existencia de la llanta condicionan la capacidad de paso de sólidos por máquina - arena, fibras, peces, etc. De este modo se generan bombas análogas a las centrifugas, como las monocanal, de vórtice y periféricas. El rodete está diseñado para girar solo en un sentido que es el del funcionamiento correcto. Un rodete girando al revés también bombea, pero en condiciones no correctas y normalmente desconocidas. Hay ejecuciones reversibles. El rodete, con su giro, centrifuga el líquido, incrementando básicamente el componente de energía cinética (Soler, 1992).

Difusor: Elemento destinado a convertir parte de la energía cinética del líquido, que se habrá incrementado al pasar por el rodete, en energía de presión. Realiza una función complementaria a la del rodete, reconducir la dirección del líquido para llevarlo a un lugar determinado como son la voluta o la boca de salida. En máquinas grandes el difusor lleva directrices fijas u orientables para mejorar su cometido.

Voluta: Básicamente recoge el líquido bombeado y lo conduce a la boca de salida. Como la recogida es perimetral, su sección ha de ir creciendo. Puede ser partida por un tabique para evitar acciones sobre el eje, acciones resultado de una

distribución de presiones circunferencial no uniforme. Las bombas suelen tener un difusor en la boca de salida y requieren otro, externo, a realizar en la tubería.

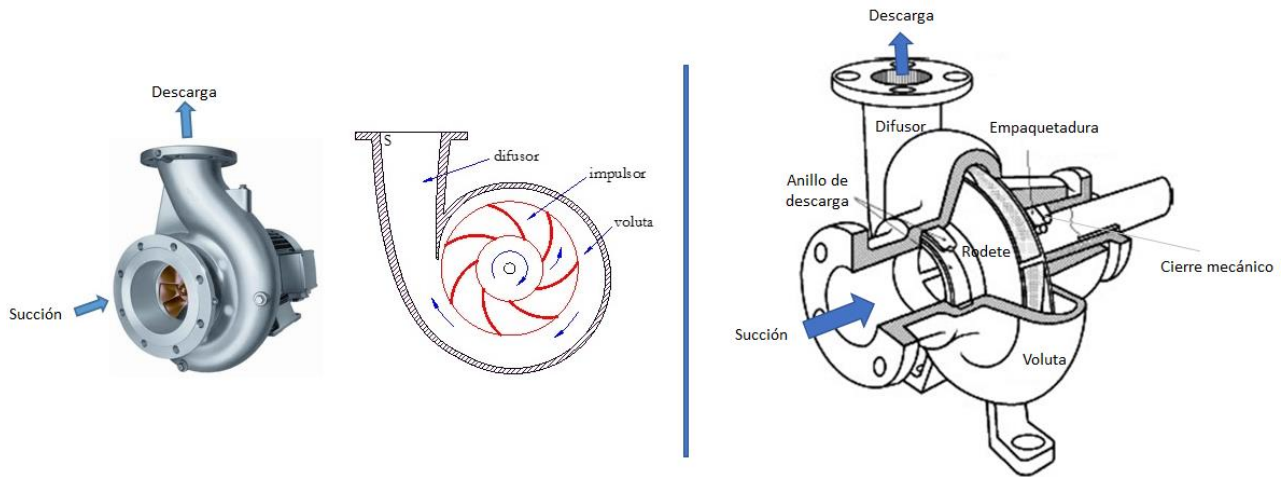
Aros de desgaste o aros de cierre: Los aros de desgaste suelen ser la denominación dada por el usuario, que aprecia que este elemento se desgaste y precisa ser reparado o sustituido. Para el fabricante es un aro de cierre que mejora el rendimiento volumétrico, evitando las fugas internas. Según la modalidad se le puede denominar aro laberinto. Se suelen construir de material diferente al cuerpo de bomba y puede no existir en el rodete, caso de bombas pequeñas y medianas y rodetes abiertos.

Estopada: Elemento textil, impregnado de lubricante y que queda atrapado entre el cuerpo de la bomba, el eje y el prensaestopa para evitar fugas exteriores. Requiere ser refrigerado por lo que se permite cierta fuga a su través.

Cierre mecánico: Al igual que el anterior, está destinado a evitar las fugas externas no debiendo perder en absoluto. Ciertas modalidades de bombas arrastran el rodete sin atravesar el eje del cuerpo de la bomba -arrastre magnético, por ejemplo- por lo que no precisan elementos dinámicos de estanqueidad extrema. La existencia de elementos dinámicos de estanqueidad externa suele requerir el encamisado del eje para evitar desgaste del mismo (Soler, 1992).

En la Figura 2 se presenta una representación gráfica de la bomba centrífuga con las respectivas partes o elementos.

Figura 2. Elementos de una bomba centrífuga.



Fuente: Gallardo, J. (2018). Sistemas de Bombeo, Sistemas Hidroneumáticos. Recuperado de <http://avias-aguassubterraneeas.blogspot.com/2010/07/revista-aguas-para-el-desarrollo-nov.html>

2.1.5. Parámetros característicos del funcionamiento hidráulico de una bomba centrífuga

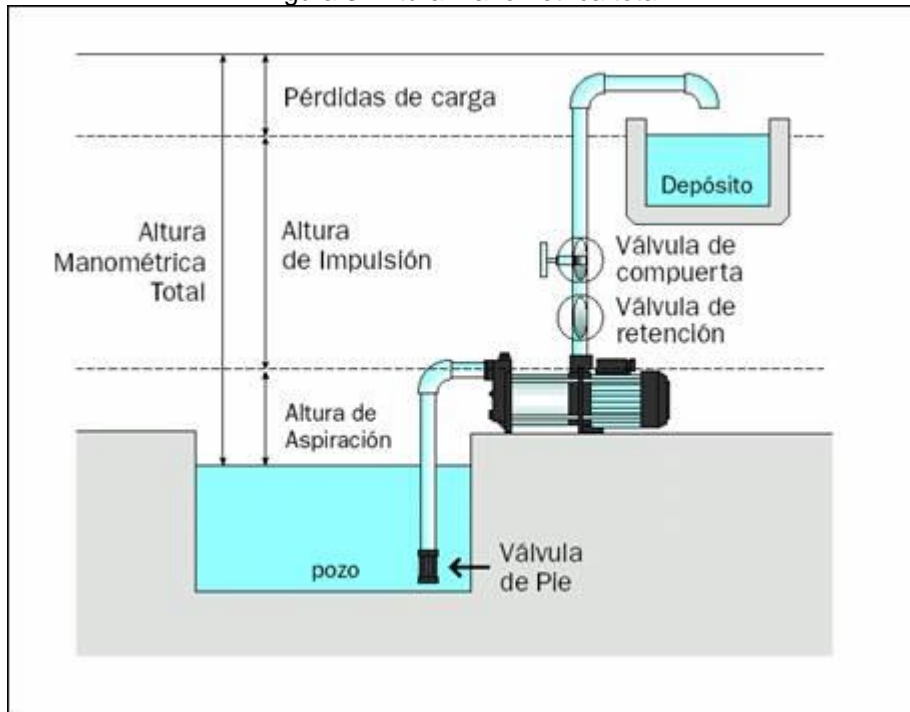
Para el usuario, el funcionamiento de la bomba se caracteriza por una serie reducida de variables que son (Soler, 1992):

- **Velocidad de rotación:** Impuesta por el motor de accionamiento y el reductor, si existe. Se expresa en revoluciones por minuto (r.p.m.).
- **Caudal:** Normalmente es la prestación de servicio que se persigue, se cuantifica como volumen proporcionado por unidad de tiempo. Las unidades más frecuentes son, litros por segundo (l/s), litros por minuto (l/min), litros por hora (l/h), metros cúbicos por hora (m³/h).
- **Altura manométrica:** Asociada al caudal, representa las condiciones energéticas en las que se desea suministrar el caudal. Se define como la diferencia de alturas de carga energética entre la salida de la bomba y su entrada. La altura de carga se obtiene, en cada punto, sumando, la diferencia de presión indicada por los manómetros, de aspiraciones e impulsión expresada en

unidades de altura (ver Figura 3). Si el fluido tiene una densidad distinta de la del agua, se obtiene la cifra equivalente dividiendo 10 metros por esta densidad.

Si en la aspiración se emplea un vacuómetro, su indicación, transformada en metros de columna del fluido correspondiente, debe sumarse a la del manómetro del lado de impulsión en lugar de restárselo. Respetando la corrección de unidades que proceda en función de los instrumentos empleados.

Figura 3. Altura manométrica total.



Fuente: Recuperada de la página web http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%207.%20Bombas/tutorial_02.htm

- **Potencia y rendimiento:** Determina el costo energético que será en buena parte los costos de explotación. Se distinguen:

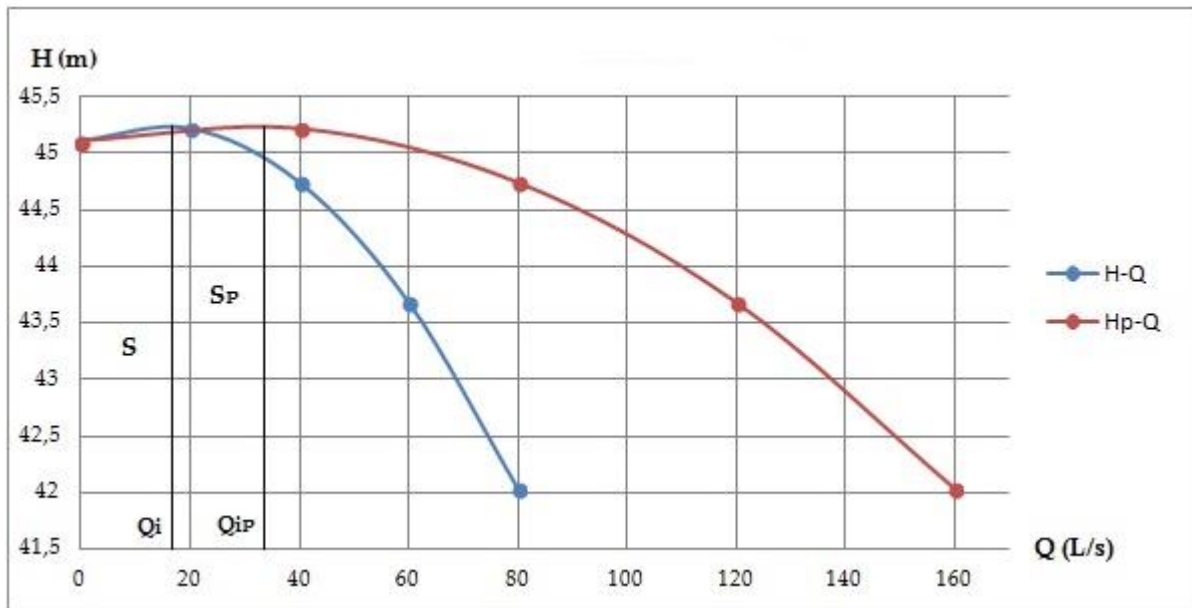
a) La potencia hidráulica o potencia transmitida al líquido. Se obtiene multiplicando el caudal por la altura y por el peso específico del líquido. Se expresa en caballos de vapor (CV) o en kilowatios (KW).

- b) La potencia en el eje, o potencia absorbida por la bomba. Es mayor que la potencia hidráulica, pues, además de producir ésta, debe compensar los distintos tipos de pérdida que se ocasionan en la bomba. Se expresa en las mismas unidades que la potencia hidráulica.
- c) El rendimiento de la bomba. Es el cociente de dividir la potencia hidráulica por la potencia absorbida; es siempre menor que 1 (ósea menor que el 100%).
- d) La potencia absorbida por el motor, definida por la lectura de los aparatos correspondientes. Es mayor que la potencia absorbida por la bomba, pues hay que añadirle las pérdidas internas del motor eléctrico. Definido el rendimiento del motor como el cociente de la potencia recibida por la bomba, en el eje, dividida por la absorbida por el motor.
- e) El rendimiento del grupo que es el cociente de dividir la potencia hidráulica por la absorbida por el motor. Es el resultado del producto del rendimiento del motor por el rendimiento de la bomba. En dado caso de existir un variador o reductor intercalado, se debe contar con su rendimiento.
- **Curvas características de las bombas.** Una bomba no tiene un solo punto de funcionamiento sino una infinidad de ellos. La curva que une todos los puntos de funcionamiento posibles de una bomba, acoplada a un motor determinado, se llama curva característica de la bomba. El aspecto, en las bombas centrífugas, representa una disminución de altura al aumentar el caudal (ver Figura 4). Su inclinación, sin embargo, puede variar según como sea la geometría de la bomba, y particularmente del rodete.

Una bomba centrífuga que opere a velocidad constante puede suministrar cualquier capacidad de cero a un máximo, dependiendo de la columna, diseño y succión. Las curvas características muestran la relación existente entre la

columna de bomba, capacidad, potencia y eficiencia para un diámetro de impulsor específico y para un tamaño determinado de carcasa. Es habitual dibujar la columna, potencia y eficiencia en función de la capacidad a velocidad constante. Pero en casos especiales es posible señalar en las gráficas tres variables cualesquiera contra una cuarta. La curva de capacidad de columna, conocida como HQ, muestra la relación entre la capacidad de columna total, y puede ser creciente, decreciente, con gran inclinación o casi horizontal, dependiendo del tipo de impulsor usado y del diseño (Soler, 1992; Hicks, 1974).

Figura 4. Curva característica de una bomba HQ.



Fuente: Martínez Valdés, Y. y Riaño Valle, F. (2018). Deducción analítica de las curvas características de las bombas rotodinámicas en paralelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXXIX (1), pp. 112-126

2.1.6. Selección de bombas centrífugas

Proceso de selección

Definidas las necesidades, conocido el tipo de fluido, densidad, homogeneidad, agresividad y características viscosas o reológicas; las condiciones de operación, temperatura, presión, caudal, aspiración, limitaciones al bombeo por cambio de

características del fluido; y las limitaciones de ubicación, espacio disponible, energía a emplear, condiciones ambientales, riesgo de inflamación y explosión; todo ello permitirá deducir el tipo de bomba y la morfología deseable para la misma (Soler, 1992).

El siguiente paso es localizar la máquina deseada en el mercado o entre las que están disponibles en el mercado. En el último caso, supuesto que se ajusta a los requerimientos, de seguro habrá que contar con los costos de revisión de la misma. Por tanto, si se selecciona una bomba, es obligatorio conocer siempre, las curvas características, las dimensiones generales u otras peculiaridades tecnológicas. Normalmente, los catálogos suministran toda esta información.

Especificaciones de la bomba

En la ingeniería es muy importante la optimización de recursos especialmente en la industria, en el caso del transporte de fluidos es necesario que el profesional conozca como especificar una bomba, para ello se debe tomar en cuenta algunos aspectos importantes como son los siguientes (Soler, 1992):

- a) Que cumpla las condiciones de servicio que previamente se han definido según los cálculos de instalación y que se han reflejado en una hoja de datos.
- b) Buen rendimiento energético de la máquina. Factor básico en los costos de exploración y que condicionará lo que se entiende por un apropiado precio de compra.
- c) La seguridad del servicio que la máquina proporcione. Es decir, pocas averías; frecuencia de averías baja y averías no importantes de duración corta. También se le puede llamar disponibilidad de la máquina para el servicio. El concepto de seguridad del servicio se hace extensible al fabricante.

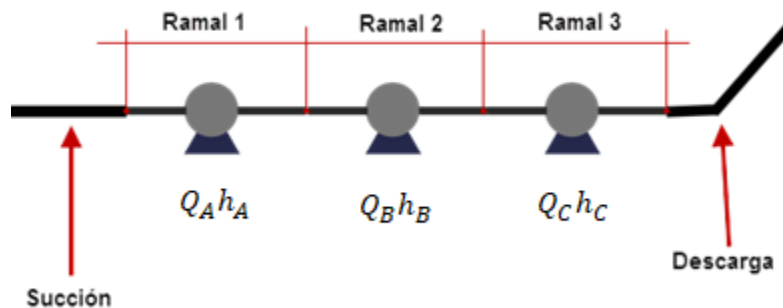
- d) Costos de mantenimiento. Hace referencia a todo tipo de mantenimiento, predictivo, preventivo, correctivo y por averías. Índice también en la seguridad del servicio, paros por mantenimiento. Recoge los costos directos e indirectos, pero no los criterios no mesurables fácilmente en unidades monetarias.
- e) Versatilidad de la bomba para ampliar el servicio, cambiarla por otra unidad, emplearla en otra aplicación.

2.1.7. Instalación y montaje de las bombas

2.1.7.1 Instalación de las bombas

Instalación en serie. Se emplea en casos en los cuales se desea elevar un mismo caudal a distintas alturas, o para impulsar un determinado caudal, venciendo grandes resistencias debidas a grandes longitudes de las conducciones (líquidos industriales: petróleo, ACPM, gasolina, etc.), si bien es relativamente pequeño el desnivel geométrico a vencer (Soler, 1992). Dicho de otra forma, las bombas en serie proporcionan cargas mayores a capacidades constantes, que las de las bombas individuales (ver Figura 5).

Figura 5. Instalación de bombas en serie.



Fuente: Recuperado de la página web <https://www.hidrasoftware.com/el-menu-proyecto-de-bombas-la-aplicacion-web-para-la-seleccion-de-bombas-centrifugas/>

Al conectar dos o más bombas en serie se logra un aumento proporcional de la presión total o final del sistema. De esta forma existe una tubería de succión

insertada en la fuente de agua y la salida de la primera bomba se conecta a la entrada de la siguiente, y así sucesivamente se tiene dos bombas conectadas en serie. Por tanto, las expresiones matemáticas que relacionan este sistema son (Agila y Calahorrano, 2011):

$$\text{Caudal de entrada } Q_A = \text{Caudal de salida } Q_B$$

$$Q_{Total} = Q_A = Q_B$$

$$h_{Total} = h_A + h_B$$

Donde

Q_{Total} = caudal total entregado por la bomba

h_{Total} = altura total entregada por la bomba

La manera de optar las bombas es poco frecuente y no debe confundirse con el caso de tener dos o más estaciones de bombeo escalonadas, como por ejemplo, en un sistema de abastecimiento de agua, o en largas conducciones de combustible, en los cuales la descarga de una bomba se recibe en un depósito elevado con respecto al anterior, desde donde aspira la siguiente unidad, para impulsar al fluido hasta el próximo depósito, y, así, sucesivamente. En el último caso los caudales impulsados individualmente no necesariamente tienen que ser iguales, así mismo, tampoco se requiere que las bombas estén funcionando a la vez.

Instalación en paralelo. La operación en paralelo de dos o más bombas es un método común para satisfacer los requisitos, cuando se necesita incrementar la capacidad manteniendo la carga constante (ver Figura 6).

Si dos o más bombas se acoplan en paralelo se logra como resultado un aumento del caudal elevado, sin un aumento de la presión. En este caso cada bomba tiene la succión insertada en la fuente de agua y se conectan todas las salidas a una común. De la misma forma, si se tienen dos bombas acopladas en paralelo, las expresiones matemáticas que se relacionan son (Agila y Calahorrano, 2011):

$$Q_{Total} = Q_{salida} = Q_A + Q_B$$

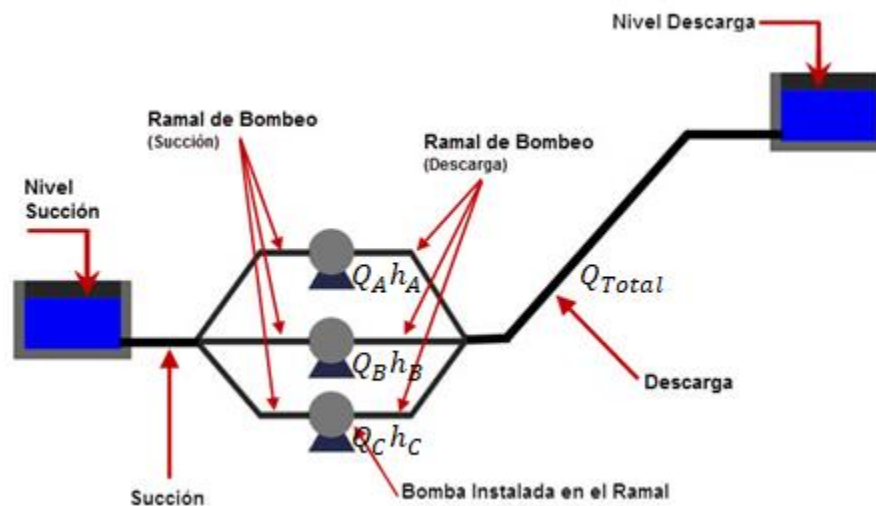
$$h_{Total} = h_A = h_B$$

Donde

Q_{Total} = caudal total entregado por la bomba

h_{Total} = altura total entregada por la bomba

Figura 6. Instalación de bombas en paralelo.



Fuente: Recuperado de la página web <https://www.hidrasoftware.com/el-menu-proyecto-de-bombas-la-aplicacion-web-para-la-seleccion-de-bombas-centrifugas/>

Cuando se trata de satisfacer las necesidades o demandas de agua, variables en el tiempo, como en sistemas de riego, o en redes de distribución de agua potable, se justifica el acoplamiento de dos o más bombas en paralelo. En efecto, el empleo de una sola bomba, para satisfacer los consumos altamente variables con el tiempo, sería factible también, pero antieconómico, puesto que aquella tendría que trabajar con eficiencias muy bajas, correspondientes a los distintos puntos de funcionamiento (Soler, 1992).

2.1.7.2 Montaje de bombas

Las bombas centrifugas son máquinas sencillas, no requieren normalmente condiciones especiales para la puesta en funcionamiento, siempre que la instalación este bien realizada. Las exigencias mínimas para obtener un largo periodo de funcionamiento son:

- No hacerla funcionar en seco.
- La presión en la entrada de la bomba y el caudal no deben ser inferiores a los indicados por el fabricante.
- Las tuberías deben estar bien realizadas, sobre todo, la de aspiración, pues garantiza la alimentación a la bomba.
- Nunca debe faltar lubricación, ni tampoco ser excesiva.
- Las operaciones de mantenimiento, han de ser las indicadas por el manual y realizadas con frecuencia prescrita.

Es importante un funcionamiento de la bomba a caudales no muy bajos. Salvo otra indicación, se puede tomar como referencia de caudal mínimo el 50% del previsto para el funcionamiento normal. Caudales inferiores, pueden producir deflexión en el eje de la bomba, así como posible gripaje de los aros rozantes. También podrá producir un calentamiento excesivo del líquido y de la bomba, ya que la potencia consumida por la bomba se transmite al líquido, que, de no renovarse, se irá calentando. El aumento de temperatura del líquido puede ocasionar cavitación en los aros rozantes o de desgaste, a causa del caudal que por allí circulan como consecuencia de la fuga interna. El calentamiento general puede deformar la bomba de manera incompatible con un correcto funcionamiento mecánico (Soler, 1992).

Con los caudales mínimos también aparecerán ruidos y vibraciones, ya que el flujo en el interior de la máquina es totalmente anómalo, como causa de estar el rodete batiendo más que impulsando.

2.1.8. Aplicaciones de las bombas centrífugas

Las bombas centrífugas se usan donde quiera que cualquier cantidad de líquido debe moverse de un lugar a otro. Las bombas centrífugas se encuentran en servicios tales como plantas termoeléctricas; plantas de abastecimiento de agua; aguas de albañal, drenaje o irrigación; refinerías de petróleo; plantas de productos químicos y talleres siderúrgicos; fabricas procesadoras de alimentos y minas; operaciones de dragado o de consolidación con chorro de agua; servicio hidroeléctrico; y caso todos los barcos ya sean de vapor o máquinas diesel (Karassik, 1971).

2.1.9. Diseño Asistido por Computadora

El diseño mecánico utilizando software computacional es una realidad hoy en día, la mayoría de las empresas y universidades poseen programas especializados de diseño asistido por computadora. Mejor conocido por las siglas en ingles C.A.D (Computer Aided Design), dichos programas se utilizan para representar las piezas o componentes mecánicos ya sea en planos 2D o en sólidos 3D, permitiendo ver y evaluar las características geométricas del diseño y el posible desempeño sin la necesidad de hacer un prototipo físico.

Otra rama del diseño mecánico asistido por computadora es la simulación, conocida por las siglas como CAE (Computer Aided Engineering), la cual difiere de la anterior en que el CAD se trabaja con representaciones geométricas de piezas o fenómenos físicos, en cambio en el CAE se hace una representación de la pieza que no necesariamente es idéntica a la realidad, es decir, una simplificación, y se le aplica propiedades mecánicas o de materiales, fuerzas, restricciones, temperaturas, entre otras.

La tendencia actual es la de trabajar en conjunto las técnicas de CAD con las de CAE, de esa forma se busca complementar las ventajas de ambas aplicaciones y

así lograr un ahorro en el tiempo de diseño, evitar errores innecesarios al construir modelos físicos simular el comportamiento de procesos o estructuras muy complejas que serían imposibles de entender o simular sin la ayuda de estos programas. La simulación intenta reproducir la realidad a partir de resolución numérica, mediante computadoras, de las ecuaciones matemáticas que describen dicha realidad. Por lo tanto, hay que asumir que la simulación es tan exacta como sean las ecuaciones de partida y la capacidad de las computadoras para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización (Spampinato, 2005).

2.1.10. Modelamiento y Diseño por elementos finitos con Solidworks Simulation

Solidworks Simulation es un software de análisis de diseño totalmente integrado en Solidworks, simula las pruebas del prototipo de un modelo en el entorno operativo. Puede ayudar a responder preguntas como ¿Qué tan eficaz, seguro y económico puede ser el diseño? Solidworks Simulation sirve para producir diseños seguros, eficaces y económicos (Corporation, 2010). El Método de Elemento Finitos (MEF) también conocido como análisis de elementos finitos, es una técnica computacional utilizada para obtener soluciones aproximadas en problemas de ingeniería.

Usualmente los problemas contienen una o más variables dependientes que deben satisfacer cualquier ecuación diferencial dentro de un dominio conocido o campo. Las variables en ese dominio se les denomina variables de campo y son las variables dependientes que son gobernados por la ecuación diferencial. Las condiciones de borde son valores específicos de las variables de campo en el borde del dominio. Dependiendo del tipo de problema se pueden tener variables de desplazamiento, físico, temperatura, transferencia de calor, velocidad de fluidos entre otras.

Un uso correcto del MEF facilita la visualización del flujo de esfuerzos en las estructuras, que es dato fundamental para el diseño, permite ver la pieza deformada

que en ocasiones restringe el diseño. Considera también, una estructura como un encaje de partículas de tamaño finito llamadas elementos finitos. El proceso de conversión de la estructura de elementos finitos se denomina discretización o modelaje (David, 2004).

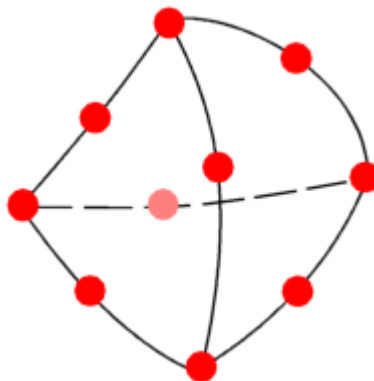
El comportamiento de las partículas y de toda la estructura, se obtiene de resolver un sistema de ecuaciones algebraicas, el cual puede ser resuelto rápidamente en un computador, gracias al uso del Software adecuado (David, 2004).

Las soluciones analíticas solo están disponibles para problemas simples. Hacen muchas suposiciones y no resuelven la mayoría de problemas prácticos. El software usa el método de Elementos Finitos (FEM) o Análisis de diseño el cual permite resolver problemas simples y complejos.

2.1.10.1 Concepto Principal de Análisis de Diseño

Los elementos comparten puntos comunes denominados nodos. El compartimiento de estos elementos se conoce ampliamente en todos los escenarios posibles de soporte y carga. En la Figura 7 se muestra el movimiento de cada nodo que describe las traslaciones y direcciones X, Y y Z que se denominan grados de libertad (DOF).

Figura 7. Elemento tetraédrico definido por nodos.



Fuente: Recuperado de la página web

<http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cosmosxpresshelp/AllArt/art/SolidWorks/NonCore/SimulationXpress/tet10-new-nonnodes.gif>

Solidworks Simulation escribe las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada elemento teniendo en cuenta su creatividad con otros elementos. Estas ecuaciones relacionan las propiedades, restricciones y cargas del material desconocidas (Por ejemplo, desplazamientos en el análisis de tensión) con las conocidas. En el análisis estático, el solucionador encuentra los desplazamientos en las direcciones X, Y y Z en cada nodo. Ahora que se conocen los desplazamientos en cada nodo, el programa calcula las deformaciones en varias direcciones. La deformación es el cambio en la longitud dividida por la longitud original (Corporation, 2010).

2.1.11. Ecuaciones fundamentales para el diseño del banco de bombas

2.1.11.1 Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también denominado ecuación de Bernoulli o trinomio de Bernoulli, describe el comportamiento de un líquido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.

La ecuación de Bernoulli se define de la siguiente manera (Çengel y Cimbala, 2012):

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

P_1 = presión de succión (Pa)

V_1 = velocidad en la succión (m/s)

Z_1 = altura estática de succión (m)

h_{bomba} = carga de bomba útil entregada al fluido (m)

P_2 = presión de descarga (Pa)

V_2 = velocidad en la descarga (m/s)

Z_2 = altura estática de descarga (m)

h_L = pérdida de carga total en las tuberías (carga mayores y menores (m))

g = gravedad (m/s^2)

ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

2.1.11.2 Caudal

El caudal (Q) es la cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto por unidad de tiempo. Normalmente se identifica como el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

El caudal se expresa por medio de la Ecuación 2

$$Q = VA \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Q = caudal del fluido (m^3/s)

V = velocidad media (m/s)

A = área de una sección transversal del tubo (m^2)

2.1.11.3 Área interna de una tubería

El área (A) de una sección transversal de una tubería interna se calcula mediante la siguiente expresión.

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

D = diámetro interno de la tubería (m)

2.1.11.4 Pérdidas de carga total

Las pérdidas de carga total ($h_{L-Total}$) en un sistema de tuberías es la suma de las pérdidas de carga mayores y las pérdidas menores (ver Ecuación 4).

$$h_{L-Total} = h_{L,mayores} + h_{L,menores} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$h_{L,mayores}$ = pérdidas de carga mayores (m)

$h_{L,menores}$ = pérdidas menores (m)

2.1.11.5 Pérdidas de carga mayores

En contacto del fluido con la tubería, el rozamiento entre las capas del fluido en el régimen laminar y el rozamiento de las partículas de fluido entre sí en el régimen turbulento, origina pérdidas de energía hidráulica denominadas pérdidas de carga mayores ($h_{L,mayores}$).

Las pérdidas de carga representan la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería (Çengel y Cimbala, 2012). Las pérdidas de carga en una tubería son función del factor de fricción, la longitud y el diámetro de la misma, así como de la velocidad del fluido (ver Ecuación 5).

$$h_{L,mayores} = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{LV^2}{D2g} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

f = factor de fricción

L = longitud de la tubería (m)

V = velocidad promedio del fluido (m/s)

D = diámetro de la tubería (m)

g = gravedad (m/s²)

Esta ecuación es válida para flujo laminar y para flujo turbulento en tuberías circulares y no circulares.

2.1.11.5.1 Factor de fricción

El factor de fricción (f) es un parámetro adimensional que se utiliza para calcular la pérdida de carga en una tubería debido a la fricción. Se define como la fuerza de arrastre por unidad de área mojada dividida entre el producto de la densidad por la carga de velocidad o altura dinámica (Geankopolis, 1998).

Para régimen laminar $Re \leq 2300$, el factor de fricción se calcula como

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64\mu}{\rho DV} \quad \text{Ec. 6}$$

En régimen laminar, el factor de fricción es independiente de la rugosidad de la superficie de la tubería y depende únicamente del número de Reynolds.

El factor de fricción para régimen turbulento depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa, ε/D , definida ésta como la razón de la altura media de rugosidad de la tubería al diámetro de la tubería (Çengel y Cimbala, 2012).

Para régimen turbulento $Re \geq 4000$, el factor de fricción se calcula mediante la ecuación de Colebrook, la cual relaciona el flujo turbulento en tuberías lisas y rugosas.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

f = factor de fricción

ε = rugosidad absoluta de la tubería (m)

D = diámetro de la tubería (m)

Re = número de Reynolds

La ecuación de Swamme y Jain es una de las fórmulas más referenciadas para calcular un valor aproximado del factor de fricción:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 * \frac{D}{\varepsilon}} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right]^2} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

f = factor de fricción

D = diámetro de la tubería (m)

ε = rugosidad absoluta de la tubería (m)

Re = número de Reynolds

El diagrama de Moody es una expresión gráfica que representa el factor de fricción (f) como una función del número de Reynolds (Re) y la rugosidad absoluta ε/D sobre un amplio rango de valores, para flujo laminar y turbulento.

2.1.11.5.2 **Número de Reynolds**

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento.

Se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta, el número de Reynolds se expresa como:

$$Re = \frac{VD}{\vartheta} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

V = velocidad promedio del fluido (m/s)

D = diámetro de la tubería (m)

ϑ = viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

μ = viscosidad dinámica del fluido (kg/m.s)

En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería circular es laminar para $Re \leq 2300$, turbulento para $Re \geq 4000$ y transicional entre ellos $2300 \leq Re \leq 4000$.

2.1.11.6 Pérdidas menores

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, conexiones en T, entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tramos rectos de tubos. Dichos accesorios interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen, a esto se le denomina pérdidas menores ($h_{L,menores}$) (Çengel y Cimbala, 2012).

Las pérdidas menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida k_L , también llamado coeficiente de resistencia. Por tanto, las pérdidas menores por la adición de accesorios en el sistema de tuberías se definen como:

$$h_{L,menores} = k_L \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

k_L = coeficiente de pérdida o de resistencia

V = velocidad promedio del fluido (m/s)

g = gravedad (m/s²)

En general, el coeficiente de pérdida (k_L) depende de la geometría del accesorio y del número de Reynolds, igual que del factor de fricción. Los valores de k_L para cada tipo de accesorio se calculan experimentalmente y se pueden consultar en tablas.

2.1.11.7 Eficiencia de una bomba

La eficiencia de la bomba (n) se calcula mediante la siguiente expresión.

$$n = \frac{\dot{W}_{h,bomba}}{\dot{W}_{e,bomba}} = \frac{Q\rho gh_{bomba}}{\dot{W}_{e,bomba}} * 100 \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$\dot{W}_{h,bomba}$ = potencia hidráulica (potencia de bombeo necesaria para superar la pérdida de carga (W))

$\dot{W}_{e,bomba}$ = potencia eléctrica

Q = caudal del fluido (m³/s)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

g = gravedad (m/s²)

h_{bomba} = carga de bomba útil entregada al fluido (m)

2.2. MARCO LEGAL

Muchas son las normas que regulan las pruebas e instalaciones que testean bombas centrífugas, de las cuales se pueden nombrar:

- DIN 1944:1968 “Acceptance tests on centrifugal pumps”. Antigua norma alemana, que establece las pruebas a realizar en bombas centrifugas. Fue reemplazada por la norma ISO 9906.
- ASME PTC 8.2:1990 “Centrifugal Pumps”. Esta norma de la asociación americana de ingenieros mecánicos da las directrices para la realización y presentación de ensayos en bombas de agua de flujo axial. Describe los mecanismos para determinar: (a) presión máxima de descarga; (b) caudal; (c) potencia; (d) eficiencia y (e) los requisitos de altura de succión positiva neta de la bomba.
- ANSI/HI 14.6 “Rotodynamic Pumps for Hydraulic Performance Acceptance Tests”. Esta normativa es solo para aplicar en laboratorios y no en terreno y no contempla ningún accesorio incorporado en la bomba.
- ISO 9906:2012 “Rotodynamic pumps -- Hydraulic performance acceptance tests -- Grades 1, 2 and 3”. Esta norma especifica las pruebas de rendimiento que deben realizar los fabricantes para garantizar sus bombas rotodinamicas. Debe ser aplicada en instalaciones o laboratorios donde se prueben bombas de agua de cualquier tamaño, que transporten agua limpia y fría. El Instituto Nacional de Normalización homologó la norma, creando la NCh686-2011. Por lo mismo, dicha norma será la norma directriz del trabajo de grado.
- Estándar ANSI/API 610. El Instituto Americano de Petróleo (API por las siglas en inglés) es la única asociación comercial nacional que representa todos los aspectos de la industria de petróleo y de gas natural de Estados Unidos. Desde 1924, la API ha sido el líder en el desarrollo de equipos y normas de funcionamiento para la industria de petróleo y gas natural. Cada año API trabaja con líderes en la industria, expertos en la materia, para mantener un inventario

de más de 600 estándares y prácticas recomendadas (American Petroleum Institute).

Entre los estándares publicados por el instituto se encuentra el API 610 titulado “Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries”, la norma internacional especifica los requerimientos de las bombas centrífugas, incluyendo bombas funcionando en sentido inverso, como turbinas hidráulicas de generación de potencia, para el uso en los procesos de las industrias petroleras, petroquímicas y de gas (American Petroleum Institute, 2011). El estándar es aplicable a las bombas en voladizo, bombas entre cojinetes y bombas verticalmente suspendidas.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

Altura de aspiración. Comprende la distancia desde el nivel del líquido hasta el eje de la bomba.

Altura de impulsión. Se mide desde el eje de la bomba hasta el punto de máxima elevación.

Altura manométrica. Es la suma de la geométrica más las pérdidas de carga.

Caudal o capacidad. Es el volumen o masa de líquido elevado por unidad de tiempo.

Curva característica. Una bomba no tiene un único punto de funcionamiento, sino una infinidad de ellos. La curva que une todos los puntos de funcionamiento posibles de una bomba, acoplada a un motor concreto, recibe el nombre de curva característica o curvas de la bomba, siendo los fabricantes los que suministran tal información.

Cavitación. Aunque es un fenómeno complejo, se puede resumir en aquel que produce un ruido en el interior de la bomba causado por la explosión de las burbujas de vapor cuando la bomba opera con una aspiración excesiva. En general la cavitación indica un NPSH disponible insuficiente.

Potencia hidráulica. Es la potencia precisada por la bomba exclusivamente para bombear el líquido.

Potencia absorbida o potencia de freno. Es la potencia en el eje de la bomba y equivale a la potencia hidráulica más la potencia consumida en compensar los distintos tipos de pérdidas que se ocasionan en la bomba. Por consiguiente, es mayor que la hidráulica.

Potencia absorbida por el motor. Es mayor que la potencia absorbida por la bomba, pues hay que añadirle las pérdidas internas del motor eléctrico.

Rendimiento mecánico o rendimiento de la bomba. Es un concepto que equivale al cociente de dividir la potencia hidráulica y la potencia absorbida. Se expresa en porcentaje y siempre es menor a la unidad.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

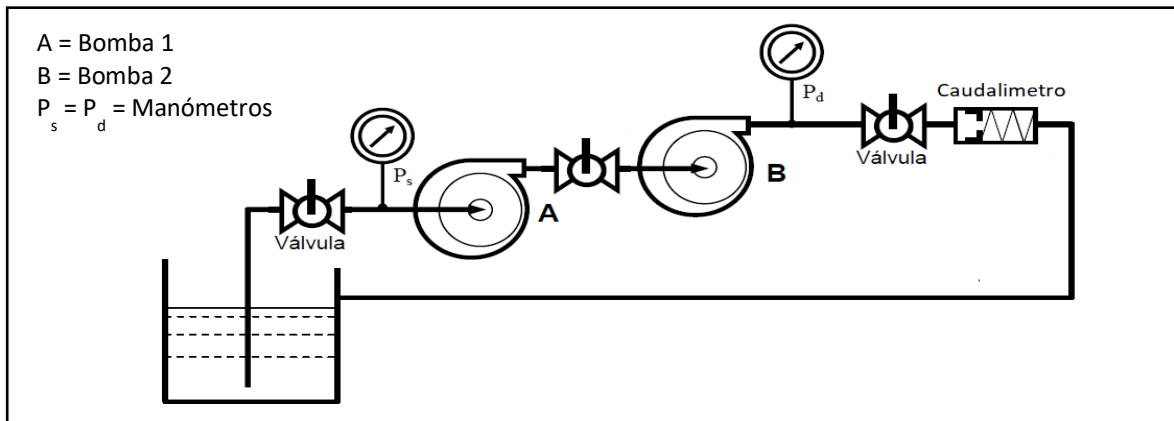
3.1. ESTUDIO HIDRÁULICO DEL BANCO DE PRUEBAS

El banco de pruebas está diseñado para que las dos bombas centrifugas funcionen en serie y en paralelo. Sin embargo, el diseño del sistema permite el funcionamiento de cada bomba de manera independiente.

3.1.1. Diseño hidráulico de las bombas en serie

En la Figura 8 se presenta la trayectoria del fluido en el banco de pruebas mediante la conexión en serie de las dos bombas centrifugas. Cabe anotar que el fluido de trabajo es el agua.

Figura 8. Diseño hidráulico de las bombas en serie.

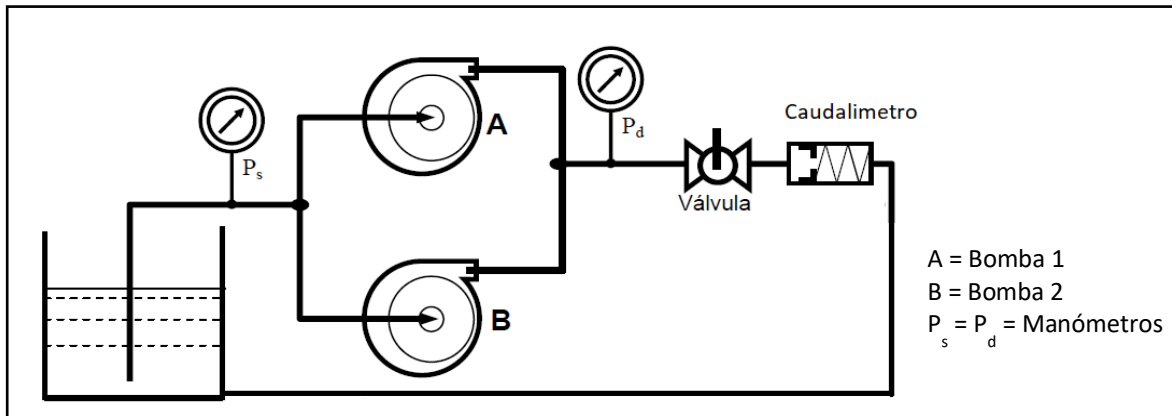


Fuente: Autores

3.1.2. Diseño hidráulico de las bombas en paralelo

En la Figura 9 se presenta la trayectoria del fluido en el banco de pruebas mediante la conexión en paralelo de las dos bombas centrifugas.

Figura 9. Diseño hidráulico de las bombas en paralelo.



Fuente: Autores

3.1.3. Cálculo de pérdidas del sistema

Para seleccionar la bomba centrífuga adecuada en el banco de pruebas se realizaron los cálculos de pérdidas según configuración en serie y paralelo.

3.1.3.1 Cálculo de pérdidas configuración en serie

Para determinar las pérdidas de energía del fluido a través del circuito en serie del banco de pruebas se realizó un balance de energía. Para ello, se empleó la ecuación de Bernoulli, previamente descrita en el numeral 2.1.11 de este documento.

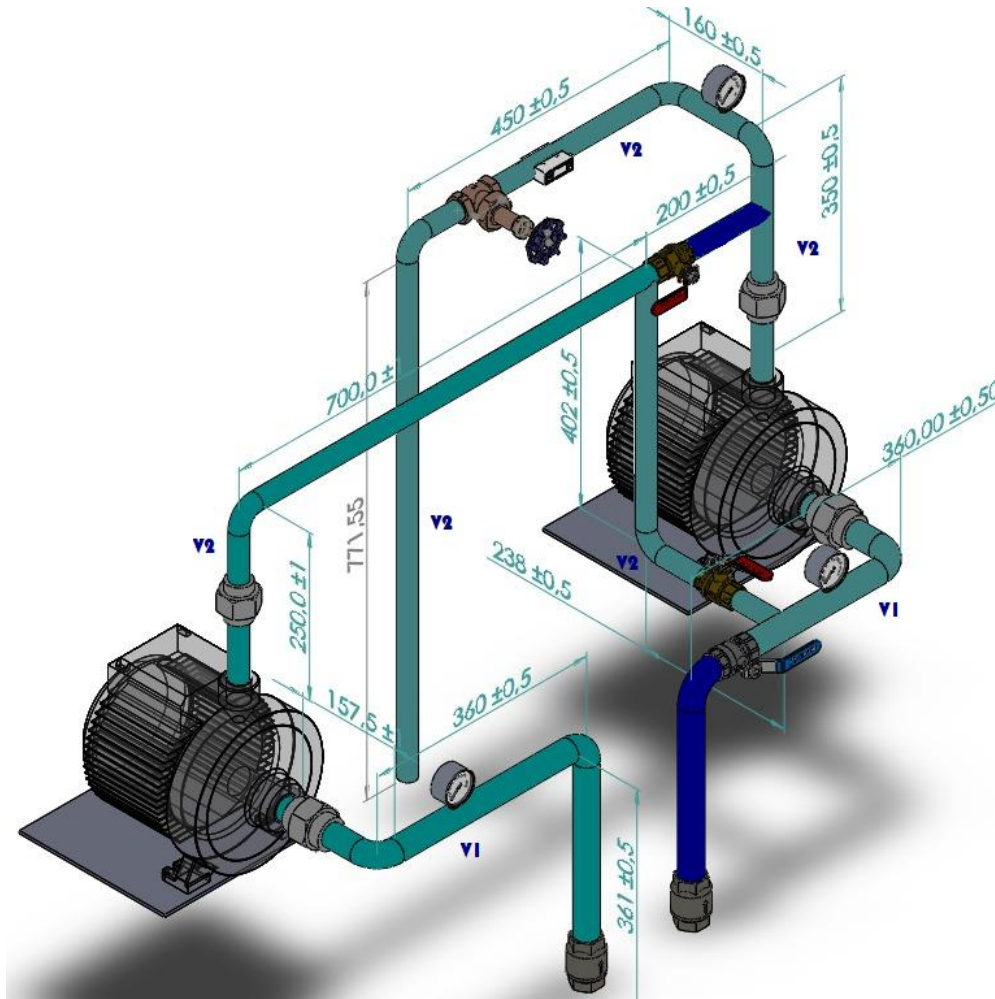
$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad \text{Ec. 1}$$

Consideraciones de evaluación del circuito en serie (ver Figura 10):

- Circuito hidráulico cerrado en el que no hay variaciones de altura, por tanto la expresión Z_1 y Z_2 es igual a 0.
- La presión en la superficie del recipiente es la atmosférica, por tanto la expresión P_1 y P_2 es igual a 0.

- Existencia de variaciones en el diámetro de la tubería (línea de succión y descarga), por tanto, la expresión de velocidad es variable a lo largo de la tubería.

Figura 10. Esquema de conexión bombas en serie.



Fuente: Autores. Para efectos de cálculo, las dimensiones dadas en la figura se trabajaron en mm

De manera que la bomba debe vencer la resistencia por fricción en tubería y accesorios. Por tanto, la expresión se reduce a:

$$h_{bomba} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + h_L$$

Donde h_L representa las pérdidas de carga total en las tuberías (carga mayores y menores).

A continuación se presenta el procedimiento empleado para calcular las pérdidas totales del sistema a diferentes condiciones de caudal.

Pérdidas de cargas mayores

Las pérdidas de carga en una tubería son función del factor de fricción, la longitud y el diámetro de la misma, así como de la velocidad del fluido (ver Ecuación 5).

$$h_{L,mayores} = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{LV^2}{D2g} \quad \text{Ec. 5}$$

En la Tabla 1 se presenta los parámetros de la tubería en acero negro empleada en la línea de succión y descarga de las bombas.

Tabla 1. Características de las bombas centrífugas

Línea de succión Schedule 40		
Diámetro nominal	1"	
Diámetro interior	26,64 mm	2,66E-2 m
Área	26,64 mm	5,57E-4 m
Rugosidad del acero negro*	0,06 mm	6,00E-5 m
Línea de descarga Schedule 40		
Diámetro nominal	¾"	
Diámetro interior	20,96 mm	2,096E-2 m
Área	26,64 mm	3,450E-4 m
Rugosidad del acero negro*	0,06 mm	6,00E-5 m

*Información recuperada de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5091/fichero/12+--+ANEXOS.pdf>

Debido a que el sistema de operación se definió entre los rangos de caudal entre 10 L/min y 100 L/min, se calculó el número de Reynolds, así como el factor de fricción y las pérdidas de carga de la tubería a diferentes condiciones, según el tipo de tubería empleada (Ver Tabla 2 y Tabla 3). Cabe aclarar que para la tubería de 1" la velocidad se expresó con la nomenclatura V1; mientras que para la tubería de ¾" la velocidad se expresó como V2.

Para el desarrollo de los cálculos matemáticos se requiere describir las propiedades del fluido de trabajo, que para este trabajo es agua. El agua a condiciones normales (25°C) tiene una densidad de ($\rho = 997 \text{ kg/m}^3$) y una viscosidad dinámica de ($\mu = 8,91E - 4 \text{ kg/m.s}$). Igualmente, se requiere conocer el valor de la longitud utilizada en el sistema en serie; longitud de tubería de 1" $L = 1396 \text{ mm}$ o $1,396 \text{ m}$ y longitud de tubería de 3/4" $L = 3321,55 \text{ mm}$ o $3,3215 \text{ m}$.

Tabla 2. Número de Reynolds (Re), factor de fricción (f) y pérdidas de carga en la tubería (h_L) calculados a diferentes caudales para tubería de acero negro de 1"

Tubería en la succión Schedule 40 de 1"						
Caudal (l/min)	Caudal (m³/s)	Área (m²)	Velocidad (V1) (m/s)	Re	f	h_L mayores (m)
10	0,000167	0,000557	0,29901	8913	0,0242021	0,0058
20	0,000333	0,000557	0,59803	17827	0,0241909	0,0231
30	0,000500	0,000557	0,89704	26740	0,0241869	0,0520
40	0,000667	0,000557	1,19605	35653	0,0241849	0,0925
50	0,000833	0,000557	1,49506	44567	0,0241836	0,1445
60	0,001000	0,000557	1,79408	53480	0,0241828	0,2081
70	0,001167	0,000557	2,09309	62393	0,0241822	0,2832
80	0,001333	0,000557	2,39210	71307	0,0241817	0,3699
90	0,001500	0,000557	2,69111	80220	0,0241813	0,4682
100	0,001667	0,000557	2,99013	89134	0,0241810	0,5780

Fuente: Autores

Tabla 3. Número de Reynolds (Re), factor de fricción (f) y pérdidas de carga en la tubería (h_L) calculados a diferentes caudales para tubería de acero negro de 3/4"

Tubería en la descarga Schedule 40 de 3/4"						
Caudal (l/min)	Caudal (m³/s)	Área (m²)	Velocidad (V2) (m/s)	Re	f	h_L mayores (m)
10	0,000167	0,000345	0,48303	11329	0,0258450	0,0488
20	0,000333	0,000345	0,96606	22658	0,0258351	0,1949
30	0,000500	0,000345	1,44909	33986	0,0258316	0,4386
40	0,000667	0,000345	1,93213	45315	0,0258297	0,7796
50	0,000833	0,000345	2,41516	56644	0,0258286	1,2181
60	0,001000	0,000345	2,89819	67973	0,0258279	1,7540
70	0,001167	0,000345	3,38122	79302	0,0258273	2,3873
80	0,001333	0,000345	3,86425	90630	0,0258269	3,1181
90	0,001500	0,000345	4,34728	101959	0,0258266	3,9463
100	0,001667	0,000345	4,83031	113288	0,0258263	4,8719

Fuente: Autores

Pérdidas de cargas menores

Las pérdidas menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida de cada uno de los accesorios tales como uniones, válvulas, flexiones, codos, conexiones en T, entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones (ver Ecuación 10).

$$h_{L,menores} = k_L \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ec. 10}$$

Los valores de k_L de los accesorios utilizados en el banco de pruebas para la línea de succión y descarga de las bombas en el sistema en serie se presentan en la Tabla 4 y Fuente: Çengel, Y.A. y Cimbala, y.M. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill, pp. 367.

Tabla 5.

Tabla 4. Pérdidas por accesorios para la línea de succión de las bombas – tubería de 1”
Tubería en la succión Schedule 40 de 1”

Accesorio	Cantidad	k_L	$\sum k_L$
Válvula de cheque	1	2	2,0
Codo enroscado	3	0,9	2,7
Te enroscada	1	2,0	2,0
Reducción gradual	3	0,02	0,06
Unión enroscada	8	0,08	0,64

Fuente: Çengel, Y.A. y Cimbala, y.M. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill, pp. 367.

Tabla 5. Pérdidas por accesorios para la línea de descarga de las bombas - tubería de ¾”
Tubería en la descarga Schedule 40 de ¾”

Accesorio	Cantidad	k_L	$\sum k_L$
Válvula de bola	1	0,05	0,05
Válvula de globo	1	10	10,0
Codo enroscado	5	0,9	4,5
Te enroscada	2	2,0	4,0
Expansión gradual	2	0,10	0,2
Unión enroscada	8	0,08	0,64

Fuente: Çengel, Y.A. y Cimbala, y.M. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill, pp. 367.

En la Tabla 6 se presenta el valor obtenido de las pérdidas en la línea de succión y descarga a diferentes caudales por el uso de accesorios. Finalmente, se presenta las pérdidas totales en el circuito en serie y la potencia requerida por la bomba para el funcionamiento del mismo. Cabe anotar que la potencia de la bomba se calculó empleando la ecuación 11, asumiendo una eficiencia de la bomba del 80%.

Tabla 6. Pérdidas totales en el sistema en serie y potencia requerida de la bomba a diferentes caudales

Caudal (l/min)	Caudal (m ³ /s)	h _L menores succión (m)	h _L menores descarga (m)	h _L menores total (m)	Hbomba (m)	Potencia (hp)
10	0,000167	0,03375627	0,230819412	0,264576	0,27191806	0,00074195
20	0,000333	0,13502509	0,923277647	1,058303	1,08767227	0,00593566
30	0,000500	0,30380644	2,077374706	2,381181	2,44726262	0,02003286
40	0,000667	0,54010034	3,693110588	4,233211	4,35068910	0,04748530
50	0,000833	0,84390679	5,770485293	6,614392	6,79795172	0,09274473
60	0,001000	1,21522578	8,309498822	9,524725	9,78905048	0,16026289
70	0,001167	1,65405731	11,31015117	12,96421	13,32398537	0,25449154
80	0,001333	2,16040138	14,77244235	16,93284	17,40275640	0,37988242
90	0,001500	2,73425799	18,69637235	21,43063	22,02536357	0,54088727
100	0,001667	3,37562715	23,08194117	26,45757	27,19180688	0,74195785

Fuente: Autores

De la Tabla 6 se puede inferir que la máxima potencia requerida por las bombas en el circuito en serie es 0,7419 hp al emplear un caudal de 100L/min.

3.1.3.2 Cálculo de pérdidas configuración en paralelo

Para determinar las pérdidas de energía del fluido a través del circuito en paralelo del banco de pruebas se realizó igualmente un balance de energía, mediante el uso de la ecuación de Bernoulli (ver ecuación 1).

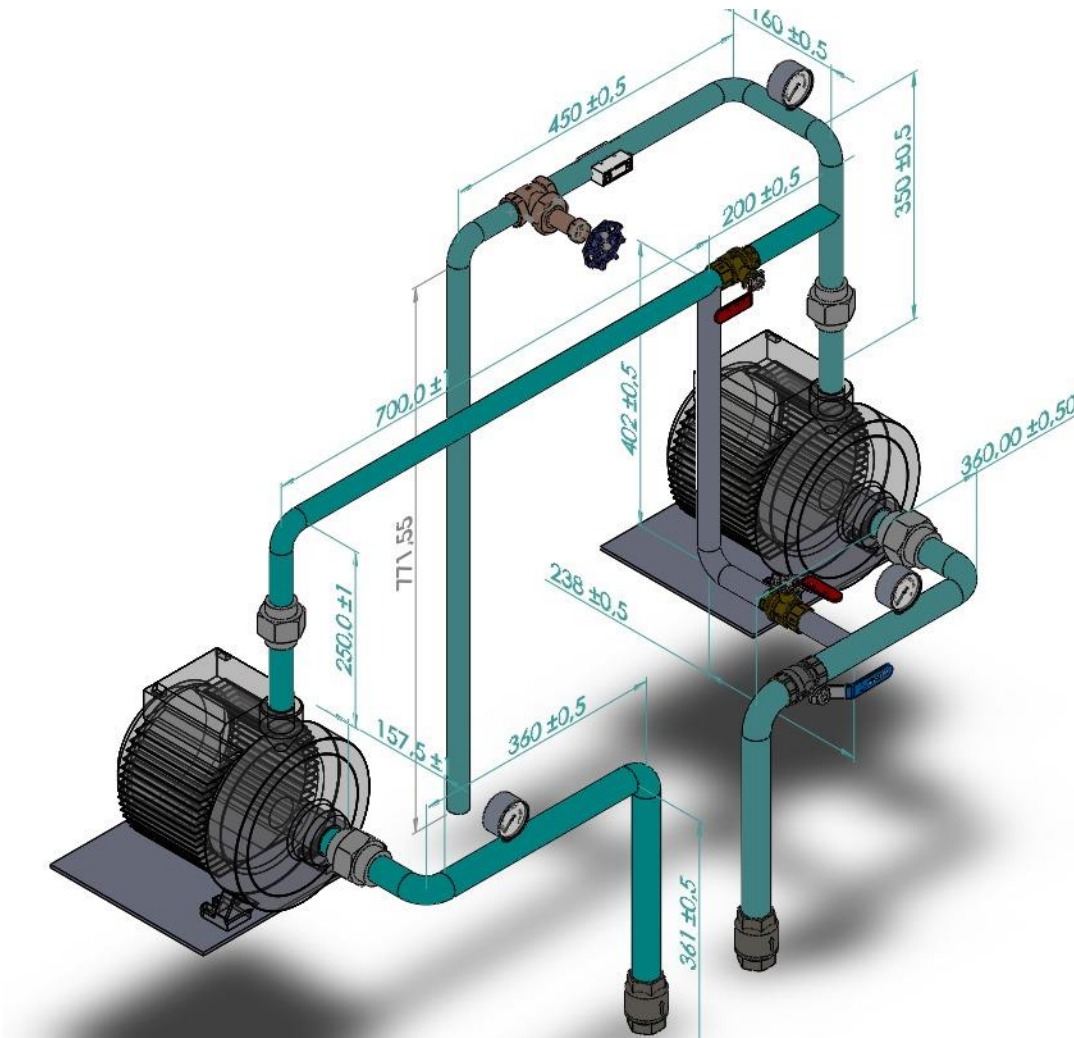
$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad \text{Ec. 1}$$

Consideraciones de evaluación del circuito en paralelo (ver Figura 11):

- Circuito hidráulico cerrado en el que no hay variaciones de altura, por tanto la expresión Z_1 y Z_2 es igual a 0.

- La presión en la superficie del recipiente es la atmosférica, por tanto la expresión P_1 y P_2 es igual a 0.
- Existencia de variaciones en el diámetro de la tubería (línea de succión y descarga), por tanto, la expresión de velocidad es variable a lo largo de la tubería.

Figura 11. Esquema de conexión bombas en paralelo.



Fuente: Autores. Para efectos de cálculo, las dimensiones dadas en la figura se trabajaron en mm

De manera que la bomba debe vencer la resistencia por fricción en tubería y accesorios. Por tanto, la expresión se reduce a:

$$h_{bomba} = \frac{2V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + h_L$$

Donde h_L representa las pérdidas de carga total en las tuberías (carga mayores y menores).

A continuación se presenta el procedimiento empleado para calcular las pérdidas totales del sistema a diferentes condiciones de caudal.

Pérdidas de cargas mayores

Las pérdidas en una tubería se calcularon mediante el uso de la ecuación 5.

$$h_{L,mayores} = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{LV^2}{D2g} \quad \text{Ec. 5}$$

En la Tabla 1 se presenta los parámetros de la tubería empleada en la línea de succión y descarga de las bombas.

Igualmente, el sistema de operación se definió entre los rangos de caudal entre 10 L/min y 100 L/min a fin de calcular el número de Reynolds, así como el factor de fricción y las pérdidas de carga de la tubería a diferentes condiciones, según el tipo de tubería empleada (Ver Tabla 7 y Tabla 8).

Para el desarrollo de los cálculos matemáticos se requiere conocer el valor de la longitud utilizada en el sistema en paralelo; longitud de tubería de 1" $L = 1756$ mm o 1,756 m y longitud de tubería de ¾" $L = 2881,55$ mm o 2,8815 m.

Tabla 7. Número de Reynolds (Re), factor de fricción (f) y pérdidas de carga en la tubería (h_L) calculados a diferentes caudales para tubería de acero negro de 1"

Tubería en la succión Schedule 40 de 1"						
Caudal (l/min)	Caudal (m³/s)	Área (m²)	Velocidad (V1) (m/s)	Re	F	h _L mayores (m)
10	0,000167	0,000557	0,29901	8913	0,0242021	0,0073
20	0,000333	0,000557	0,59803	17827	0,0241909	0,0291

Tubería en la succión Schedule 40 de 1"						
Caudal (l/min)	Caudal (m³/s)	Área (m²)	Velocidad (V1) (m/s)	Re	F	h _L mayores (m)
30	0,000500	0,000557	0,89704	26740	0,0241869	0,0655
40	0,000667	0,000557	1,19605	35653	0,0241849	0,1164
50	0,000833	0,000557	1,49506	44567	0,0241836	0,1818
60	0,001000	0,000557	1,79408	53480	0,0241828	0,2618
70	0,001167	0,000557	2,09309	62393	0,0241822	0,3563
80	0,001333	0,000557	2,39210	71307	0,0241817	0,4653
90	0,001500	0,000557	2,69111	80220	0,0241813	0,5889
100	0,001667	0,000557	2,99013	89134	0,0241810	0,7271

Fuente: Autores

Tabla 8. Número de Reynolds (*Re*), factor de fricción (*f*) y pérdidas de carga en la tubería (*h_L*) calculados a diferentes caudales para tubería de acero negro de ¾"

Tubería en la descarga Schedule 40 de 3/4"						
Caudal (l/min)	Caudal (m³/s)	Área (m²)	Velocidad (V2) (m/s)	Re	F	h _L mayores (m)
10	0,000167	0,000345	0,48303	11329	0,0258450	0,0423
20	0,000333	0,000345	0,96606	22658	0,0258351	0,1691
30	0,000500	0,000345	1,44909	33986	0,0258316	0,3805
40	0,000667	0,000345	1,93213	45315	0,0258297	0,6763
50	0,000833	0,000345	2,41516	56644	0,0258286	1,0567
60	0,001000	0,000345	2,89819	67973	0,0258279	1,5216
70	0,001167	0,000345	3,38122	79302	0,0258273	2,0711
80	0,001333	0,000345	3,86425	90630	0,0258269	2,7050
90	0,001500	0,000345	4,34728	101959	0,0258266	3,4235
100	0,001667	0,000345	4,83031	113288	0,0258263	4,2265

Fuente: Autores

Pérdidas de cargas menores

Las pérdidas menores se expresan en términos de la ecuación 10.

$$h_{L,menores} = k_L \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ec. 10}$$

Los valores de *k_L* de los accesorios utilizados en el banco de pruebas para la línea de succión y descarga de las bombas en el sistema en paralelo se presentan en la Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9. Pérdidas por accesorios para la línea de succión de las bombas – tubería de 1”

Tubería en la succión Schedule 40 de 1”			
Accesorio	Cantidad	k_L	$\sum k_L$
Válvula de cheque	2	2	4,0
Codo enroscado	4	0,9	3,6
Te enroscada	1	2,0	2,0
Reducción gradual	3	0,02	0,06
Unión enroscada	10	0,08	0,8
Válvula de bola	1	0,05	0,05

Fuente: Çengel, Y.A. y Cimbala, y.M. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill, pp. 367.

Tabla 10. Pérdidas por accesorios para la línea de descarga de las bombas - tubería de 3/4”

Tubería en la descarga Schedule 40 de 3/4”			
Accesorio	Cantidad	k_L	$\sum k_L$
Válvula de bola	1	0,05	0,05
Válvula de globo	1	10	10,0
Codo enroscado	4	0,9	3,6
Te enroscada	2	2,0	4,0
Expansión gradual	1	0,10	0,1
Unión enroscada	8	0,08	0,64

Fuente: Çengel, Y.A. y Cimbala, y.M. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill, pp. 367.

En la Tabla 11 se presenta el valor obtenido de las pérdidas en la línea de succión y descarga a diferentes caudales por el uso de accesorios. Finalmente, se presenta las pérdidas totales en el circuito en paralelo y la potencia requerida por la bomba para el funcionamiento del mismo. Se asumió una eficiencia de la bomba del 80%.

Tabla 11. Pérdidas totales en el sistema en paralelo y potencia requerida de la bomba a diferentes caudales

Caudal (l/min)	Caudal (m ³ /s)	h_L menores succión (m)	h_L menores descarga (m)	h_L menores total (m)	Hbomba (m)	Potencia (hp)
10	0,000167	0,04794303	0,21891537	0,266858	0,28610482	0,00078066
20	0,000333	0,19177212	0,87566147	1,067434	1,14441930	0,00624534
30	0,000500	0,43148726	1,97023831	2,401726	2,57494343	0,02107803
40	0,000667	0,76708846	3,50264588	4,269734	4,57767722	0,04996274
50	0,000833	1,19857572	5,47288420	6,671460	7,15262065	0,09758349
60	0,001000	1,72594904	7,88095324	9,606902	10,29977374	0,16862427
70	0,001167	2,34920842	10,72685302	13,07606	14,01913648	0,26776910
80	0,001333	3,06835385	14,01058354	17,07894	18,31070887	0,39970199
90	0,001500	3,88338534	17,73214479	21,61553	23,17449092	0,56910694
100	0,001667	4,79430289	21,89153678	26,68584	28,61048262	0,78066795

Fuente: Autores

De la Tabla 11 se puede inferir que la máxima potencia requerida por las bombas en el circuito en serie es 0,7806 hp al emplear un caudal de 100L/min.

Con base en los resultados obtenidos se decidió seleccionar una bomba centrífuga de 1 hp de potencia para cumplir con los requerimientos del sistema.

3.2. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS

3.2.1. Bomba centrífuga

Se escogieron dos (2) bombas centrífugas con motor trifásico de 220 V, marca Pedrollo de 1 hp, con un caudal máximo de 100 L/min, a fin de circular el fluido a través de la tubería de acero negro hasta retornar nuevamente al tanque de almacenamiento. Las bombas se seleccionaron teniendo en cuenta los cálculos matemáticos previamente descritos en el numeral 3.2., así como su disponibilidad en el mercado y bajo costo. En la Tabla 12 se presenta las características de las bombas instaladas en el banco de pruebas; así mismo, en el Anexo A se presenta la ficha técnica de la bomba centrífuga.

Tabla 12. Características de las bombas centrífugas

BOMBA DE AGUA		
Modelo: CP620	Caudal: 10 - 100 L/min	Caudal máximo: 100 L/min
Altura mínima: 21 m	Altura máxima: 34 m	Temperatura máxima: 90 °C
DATOS DEL MOTOR		
Voltaje: 220 V	Frecuencia: 60 Hz	Velocidad: 3.450 rpm
Potencia: 1 Hp	Potencia: 0,75 kW	Grado de protección: IP X 4

Fuente: Autores

3.2.2. Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento tiene como objetivo principal almacenar la cantidad suficiente de agua para posteriormente permitir el flujo del mismo por los diferentes circuitos, en serie y paralelo, a través de la tubería de acero negro. Se fabricó un tanque en acero cold rolled de dimensiones 50 cm de alto y 58 cm de ancho, dando como resultado un volumen de almacenamiento de 132 L. El tanque cuenta con dos succiones y una descarga de agua.

3.2.3. Tubería

Para la succión de las bombas se empleó tubería de acero negro sin costura Schedule 40 de 1"; mientras que para la descarga tubería de ¾". En total, para la construcción del banco de pruebas se empleó 5,277 m de tubería sin incluir accesorios.

Los criterios fijados para la selección de la tubería se fundamentaron en que el sistema estará sometido a presiones moderadas, el fluido trabajará a temperatura ambiente y su bajo costo. En la Tabla 13 se presenta las dimensiones de la tubería empleada en el banco de pruebas.

Tabla 13. Dimensiones de la tubería

Descripción de la tubería de acero negro	Tubería en la succión Schedule 40	Tubería en la descarga Schedule 40
Diámetro nominal	1"	¾"
Diámetro exterior	33,40 mm	26,70 mm
Diámetro interior	26,64 mm	20,96 mm
Espesor de la pared	3,38 mm	2,87 mm
Rugosidad del acero negro*	0,06 mm	0,06 mm

*Información recuperada de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5091/fichero/12+--+ANEXOS.pdf>

3.2.4. Accesorios

Para cumplir con el diseño del banco de pruebas se instalaron diferentes accesorios, los cuales se describen a continuación:

3.2.4.1 Válvula de bola

Se seleccionaron válvulas de bola en hierro de ¾" para la descarga y de 1" para la succión (ver Figura 12), las cuales se adaptaron en la sección de tubería con el propósito de habilitar los circuitos en serie y paralelo para el desarrollo de las pruebas.

Estas válvulas ofrecen muy buena capacidad de cierre y son de fácil uso. Para abrir y cerrar la válvula sólo se debe girar la manivela 90°. Cabe señalar, que esta válvula

es para uso exclusivo en la posición de apertura o cierre total; no es adecuada para uso en una posición de apertura parcial ya que puede causar que el asiento de la válvula se deforme, ocasionando que cambie las propiedades de sellado del mismo.

Figura 12. Válvula de bola.



a) Válvula de bola en hierro

Fuente: Autores

3.2.4.2 Válvula de globo

Se seleccionó una válvula reguladora de caudal tipo “globo” en bronce de $\frac{3}{4}$ ” (ver Figura 13), que se adaptó al final de la sección de la tubería a la descarga, con el propósito de restringir el caudal o disminuir el porcentaje del caudal a la salida para el desarrollo de las pruebas.

Estas válvulas permiten la regulación del fluido y realizan un cierre hermético cuando se cuenta con un asiento flexible. Las válvulas de globo tienen la ventaja de regular, pero tienen la desventaja de detener cierta parte del fluido para regularlo, generando una caída de presión dentro de la línea, lo que debe ser considerado en los cálculos matemáticos para que esta clase de válvulas y otras circunstancias que hay dentro de la línea, no impidan que el fluido llegue hasta donde se requiere.

Figura 13. Válvula de globo en hierro.



Fuente: Autores

3.2.4.3 Codos

Se seleccionaron codos galvanizados de 1" y de ¾" con un grado de dirección de 90° (ver Figura 14), los cuales se instalaron entre la sección de tubería a la succión y descarga, a fin de permitir el cambio de dirección del fluido a lo largo del circuito en serie y paralelo.

Figura 14. Codo galvanizado.



Fuente: Autores

3.2.4.4 Tees

Se seleccionaron tees galvanizadas de 1" y de ¾", los cuales se instalaron a la succión y descarga de la línea de tubería (ver Figura 15), a fin de permitir la combinación o división del flujo en un tramo de tubería independiente.

Figura 15. Tee galvanizada.



Fuente: Autores

3.2.4.5 Válvula cheque

Se seleccionaron válvulas cheques en bronce de 1" (ver Figura 16), las cuales se instalaron en la sección de tubería a la succión, para prevenir que la carga ocasione el giro de la bomba en sentido contrario. Este tipo de accesorio es un tipo de válvula de seguridad que permite el paso del fluido en una sola dirección y cierra automáticamente el paso del fluido en dirección opuesta, evitando que el fluido se regrese.

Figura 16. Válvula cheque en bronce.



Fuente: Autores

3.2.4.6 Universales

Se seleccionaron juntas universales galvanizadas de 1" y de ¾" (ver Figura 17). Este tipo de accesorio es muy utilizado en sistemas de distribución de agua, ya que permiten la unión de tramos de tubería en los que se han realizado cortes de segmento de tubería.

Figura 17. Juntas universales galvanizadas.



Fuente: Autores

3.2.5. Estructura

La estructura fue diseñada para ensamblar todos los elementos previamente descritos, fijando en la parte inferior el tanque de almacenamiento y a una altura de 60 cm las dos bombas centrifugas. Fabricada en tubo cuadrado de acero galvanizado de 1" x 1" con dimensiones de 160 cm de alto, 120 cm de ancho y 60 cm de profundidad (ver Figura 21). Adicionalmente, la estructura tiene incorporado ruedas móviles para su fácil desplazamiento en el laboratorio, en dado caso que se requiera.

3.2.6. Tablero de control y sistema eléctrico

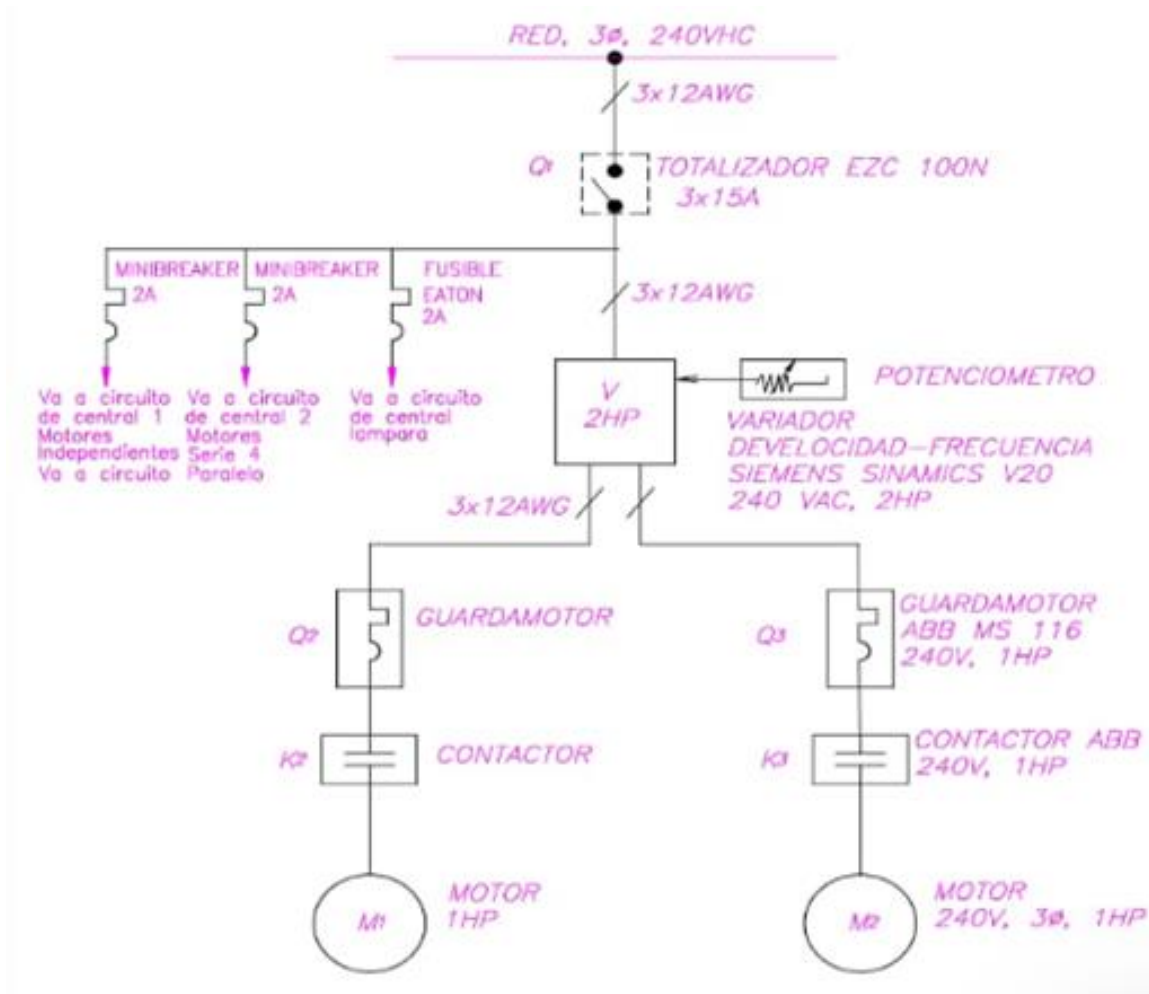
El tablero de control está conformado por una caja metálica, el cual permite su ubicación a la intemperie y protección con el medio ambiente; adaptado en la parte lateral izquierda de la estructura metálica del banco de pruebas. Compuesta por una

puerta con manija de apertura rápida con argolla para bloqueo y etiquetado eléctrico. Internamente está constituido por los siguientes dispositivos eléctricos:

- a) Breaker: Dispositivo que permite el flujo de voltaje logrando alimentar el circuito con la tensión deseada para la cual fue instalado. Al mismo tiempo, este equipo protege los elementos cuando se presente una variación de voltaje en la línea, generando la interrupción o apertura de la bobina interna que posee.
- b) Variador de frecuencia: Sistema electrónico que permite ajustar la velocidad de los motores regulando su frecuencia.
- c) Contactor: Dispositivo con capacidad de cortar la corriente eléctrica de una instalación con la posibilidad de ser accionado a distancia, que tiene dos posiciones de funcionamiento: una estable o de reposo, cuando no recibe acción alguna por parte del circuito de mando, y otra inestable, cuando actúa dicha acción. Este tipo de funcionamiento se llama de "todo o nada".
- d) Potenciómetro: Es un resistor eléctrico con un valor de resistencia variable y generalmente ajustable manualmente. Los potenciómetros utilizan tres terminales y se suelen utilizar en circuitos de poca corriente, para circuitos de mayor corriente se utilizan los reóstatos.
- e) Fusibles: Elemento hecho de un material conductor, generalmente estaño el cual está hecho de un punto de fusión bajo; se instala en un punto eléctrico con el fin de interrumpir la corriente cuando esta excede la capacidad de los elementos para lo cual se quiere proteger.
- f) Regletas: Es una lámina metal normalizada, la cual es muy utilizada en las instalaciones de tableros eléctricos en la que se ajustan y ubican los elementos que lo componen.

En la Figura 18 se presenta los planos de las conexiones eléctricas del tablero de control y el Anexo B se presenta el diagrama del minibreaker 1 y 2 y del fusible.

Figura 18. Diagrama Unifilar.



Fuente: Autores

3.2.7. Instrumentación

A continuación se describen los instrumentos utilizados en el banco de pruebas.

3.2.7.1 Manómetros

Instrumento empleado para medir la presión de un fluido en el interior de un circuito. La presión es la magnitud física que refleja la fuerza que ejerce un cuerpo sobre una unidad de superficie.

En general, los manómetros utilizan la presión atmosférica como valor de referencia, es decir, que su valor cero corresponde al valor absoluto 1 de la presión atmosférica. El valor que se lee en el manómetro corresponde a la diferencia que existe entre la presión real y la atmosférica. A este valor se le denomina presión manométrica.

Para el banco de pruebas, se seleccionó manómetros análogos de tubo de Bourdon conexión vertical, marca Astro, con rango de apreciación de 0 a 150 psi (ver Figura 19).

Figura 19. Manómetro rango de medida 0 a 150 psi.



Fuente: Autores

3.2.7.2 Caudalímetro

Instrumento de medida para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido. Estos aparatos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido. El caudalímetro seleccionado se conectó en la sección de tubería de $\frac{3}{4}$ " , las mediciones de flujo oscilan entre el rango de 15 a 120 L/min; adicionalmente el caudalímetro tiene las siguientes características (ver Figura 20):

- Temperatura de funcionamiento: -10°C a $+60^{\circ}\text{C}$.
- Presión de funcionamiento máximo: 20 bar.
- Precisión de medida: $\pm 1\%$.

En el Anexo C se presenta la ficha técnica del caudalímetro.

Figura 20. Caudalímetro digital rango de medida 15 a 120 L/min.



Fuente: Autores

3.3. DISEÑO FINAL CON SUS RESPECTIVOS COMPONENTES

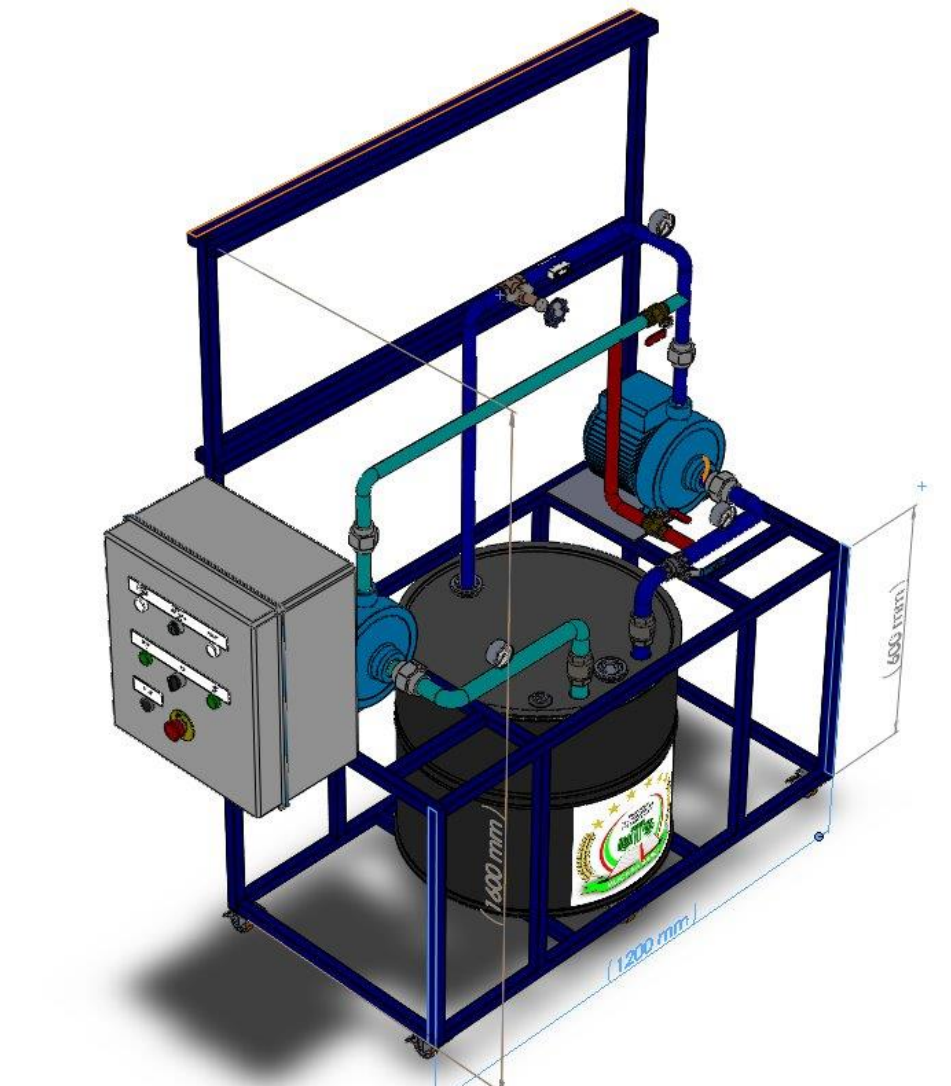
El banco de pruebas es una instalación hidráulica en circuito cerrado el cual está conformado por los siguientes elementos que se listan a continuación:

- 2 Bombas centrifugas de 1 hp
- Tubería en acero negro de 1"
- Tubería en acero negro de ¾"
- 1 tanque de almacenamiento de agua
- 4 codos galvanizados de 1"
- 5 codos galvanizados de ¾"
- 1 Tee galvanizada de 1"
- 2 Tees galvanizadas de ¾"
- 1 válvulas de bola en hierro de 1"
- 2 válvulas de bola en hierro de ¾"
- 1 válvula de globo en bronce de ¾"
- 2 válvulas de cheque en bronce de 1"
- 5 reducciones galvanizadas de 1" a ¾"
- 2 juntas universales galvanizadas de 1"
- 2 juntas universales galvanizadas de ¾"
- 4 manómetros rango de 0 a 150 psi

- 1 Caudalímetro rango de 15 a 120 L/min

En la Figura 21 se presenta el diseño final del banco de pruebas con cada uno de los elementos y la respectiva ubicación de los mismos. En el Anexo D se presenta el registro fotográfico del montaje del banco de pruebas.

Figura 21. Diseño final del banco de pruebas.



Fuente: Autores

3.4. SIMULACIÓN DEL FLUIDO EN LA BOMBA CENTRIFUGA EMPLEANDO EL SOFTWARE SOLIDWORKS

Se realizó la simulación de la bomba centrífuga Pedrollo de 1 hp de potencia para determinar el comportamiento del fluido a la entrada y salida de este; para ello, se empleó el paquete de software CFD SolidWorks Fluid Simulation.

Inicialmente, se desarrolló el modelo geométrico de la bomba con valores reales de los diámetros de succión, descarga y rodete; lo anterior, con el propósito de garantizar que la simulación en CFD no genere errores en el momento de realizar el mallado por elementos finitos del espacio ocupado por el fluido dentro de la bomba. En la Tabla 14 se describe las medidas principales utilizadas para el modelado de la geometría de la bomba.

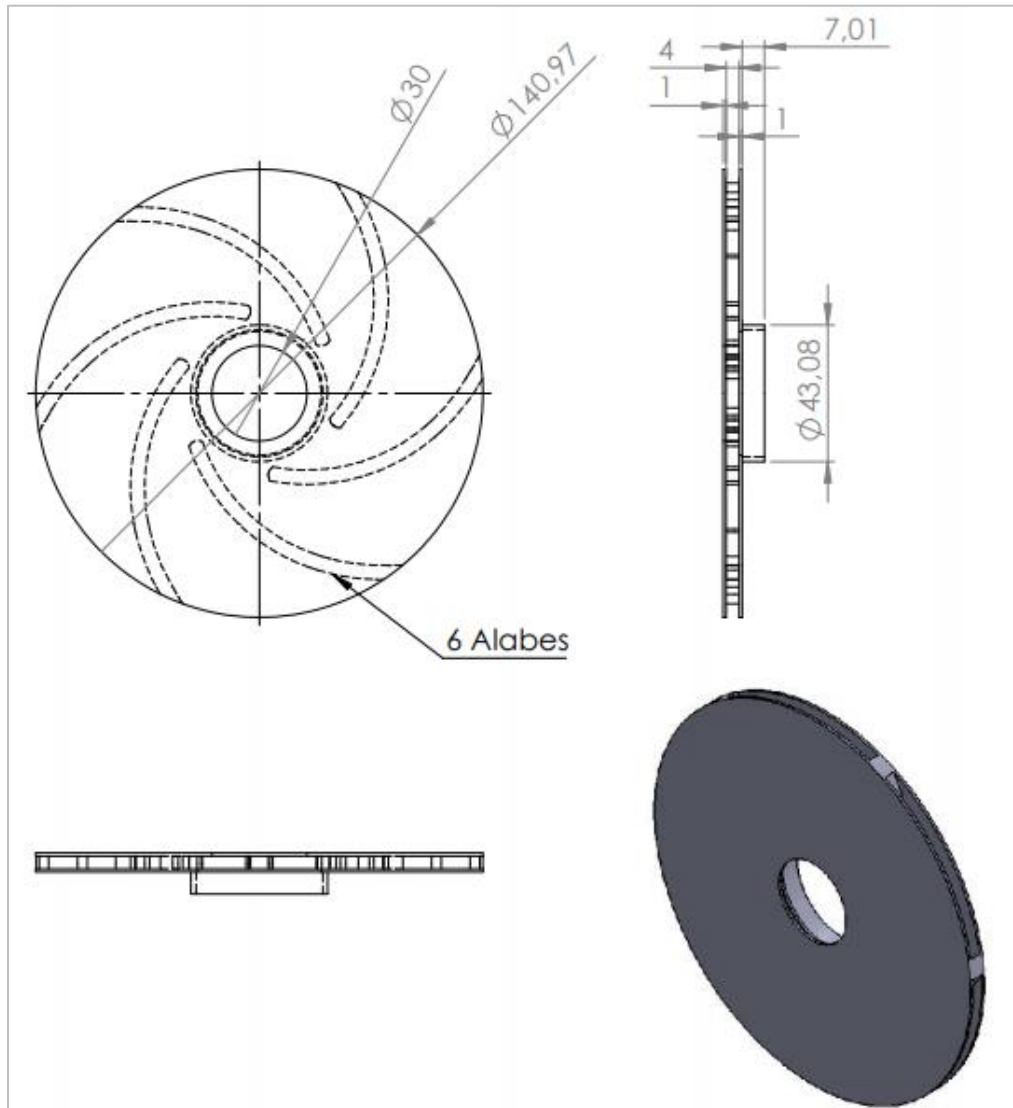
Tabla 14. Geometría de la bomba Pedrollo.

Parámetros	Valores
Diámetro de succión	34,40 mm
Diámetro de descarga	33,64 mm
Diámetro de rodete	140,97 mm
Número de alabes de impulsión	6

Fuente: Autores

En la Figura 22 se presenta el rodete de la bomba modelado en SolidWorks con diámetro de 140,97 mm, en el que se observa los seis (6) alabes de impulsión en sentido horario de rotación.

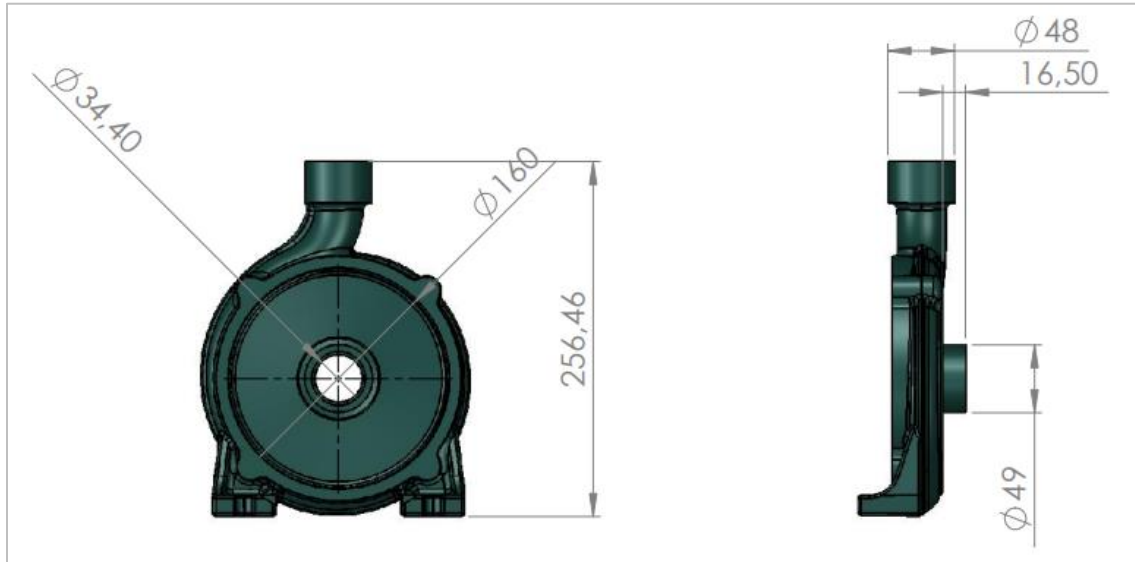
Figura 22. Modelado de la geometría del rodete de la bomba.



Fuente: Autores

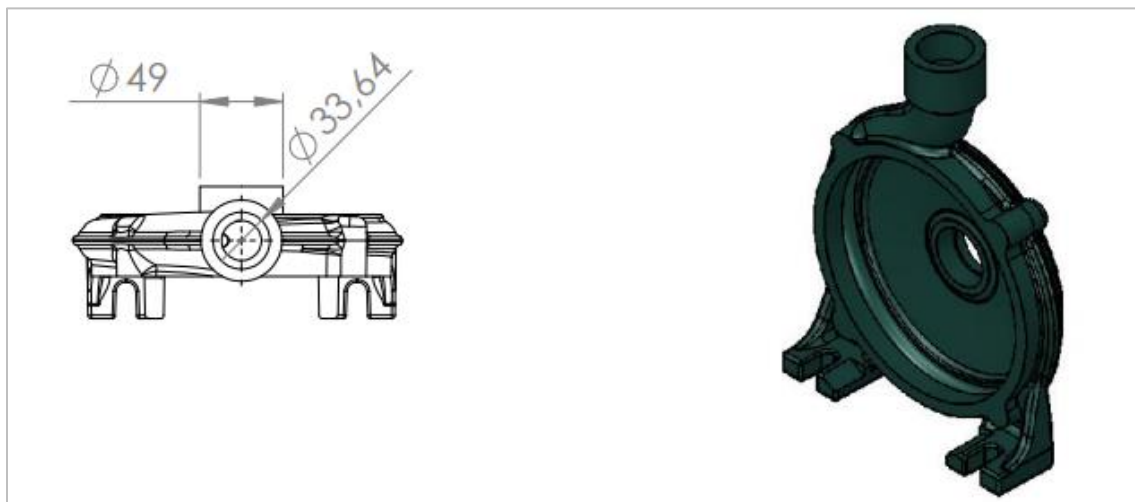
En la Figura 23 y Figura 24 se observa el diámetro de succión y descarga de la bomba modelado en SolidWorks con diámetro de 34,40 mm y 33,64 mm, respectivamente.

Figura 23. Modelado de la succión de la bomba.



Fuente: Autores

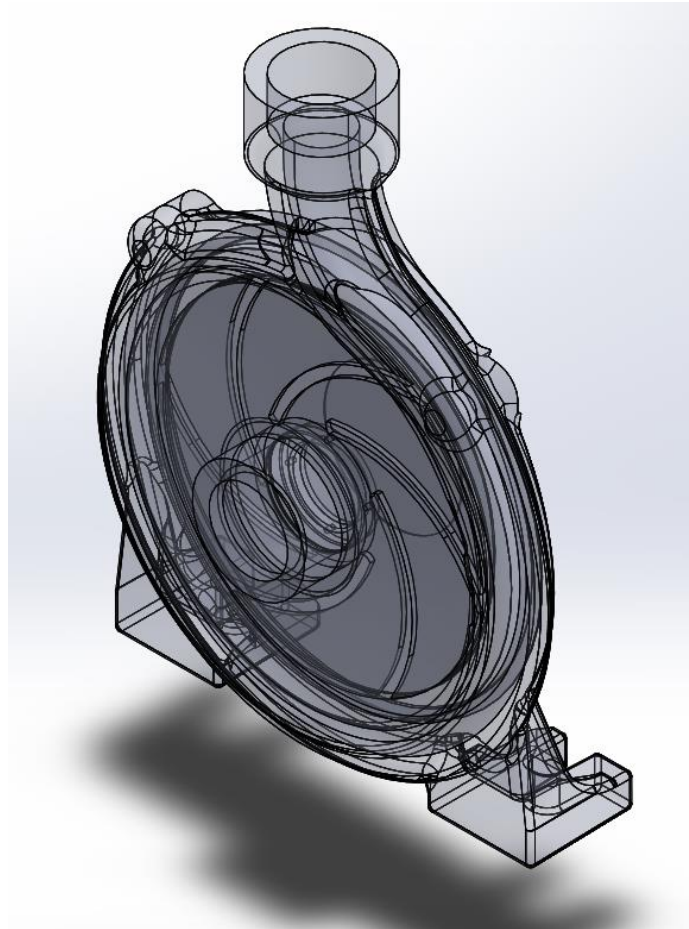
Figura 24. Modelado de la descarga de la bomba.



Fuente: Autores

El modelado geométrico de la bomba se presenta en la Figura 25, esta geometría fue utilizada para realizar la simulación del fluido en SolidWork. Cabe destacar que se omitió el modelado del motor y otros componentes para evitar ralentizar la simulación.

Figura 25. Modelado de la bomba Pedrollo.



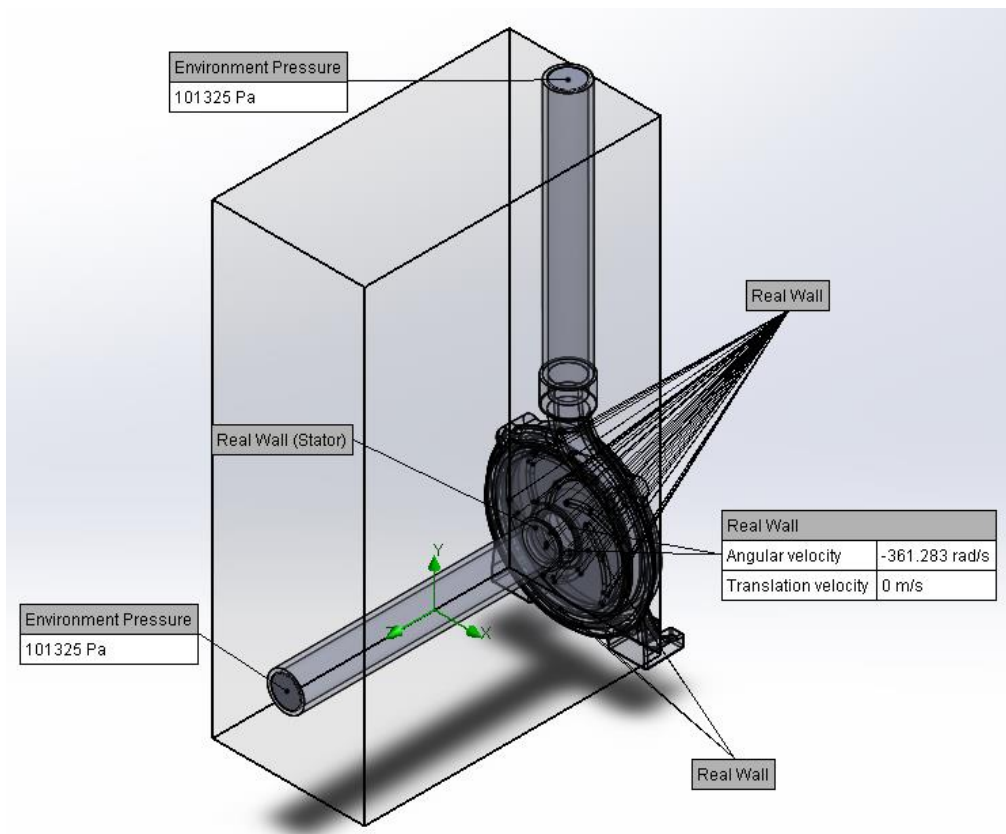
Fuente: Autores

Una vez se realizó el modelado, se procedió a realizar el análisis de la presión y velocidad de la bomba centrífuga. SolidWorks, por medio del método de elementos finitos, resuelve las ecuaciones en tres dimensiones (X, Y Z) de Navier-Stokes (conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales).

Antes de ello, se ingresaron los datos generales para el análisis tales como, tipo de análisis interno, tipo de fluido, condiciones de pared y condiciones iniciales. Automáticamente el software, basado en las dimensiones del modelo realizado, genera un dominio computacional limitando el análisis a dicho dominio.

Los datos de entrada para el dominio computacional definido son las condiciones de frontera: presión de entrada del fluido a la bomba, condición de pared real donde el software toma dicha superficie con rugosidad, condición de pared real tomada en los alabes y la superficie plana del impeler, así también a la región perimetral de la voluta, por último una condición de rotación según la velocidad de trabajo de 3.450 rpm o 361,28 rad/s anti horario, estas condiciones son establecidas según el catálogo del fabricante (ver Figura 26).

Figura 26. Condiciones de frontera de la simulación.

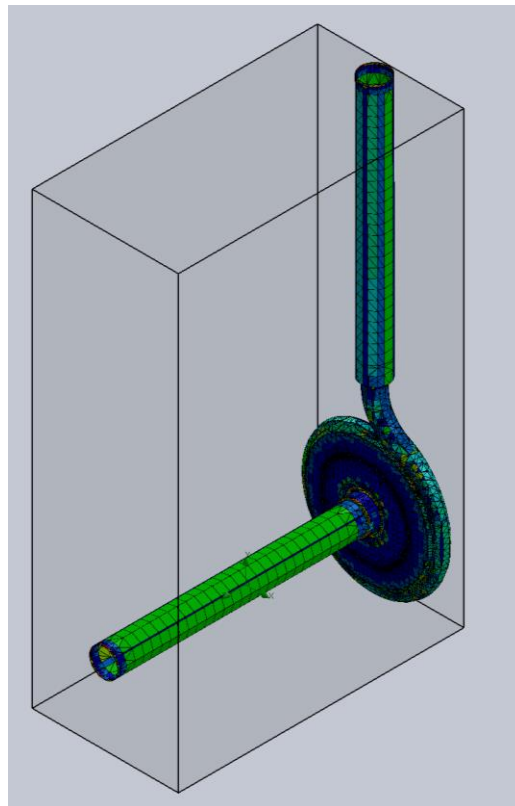


Fuente: Autores

Se genera el mallado de volúmenes finitos, etapa principal del análisis de CFD. El número de celdas totales y del fluido son 19.600; en la Figura 27 se presenta el

resultado del mallado. El criterio de tolerancia mínimo de la malla es de $2,167E-04$ m y se da en las zonas más complejas como el impulsor y la carcasa.

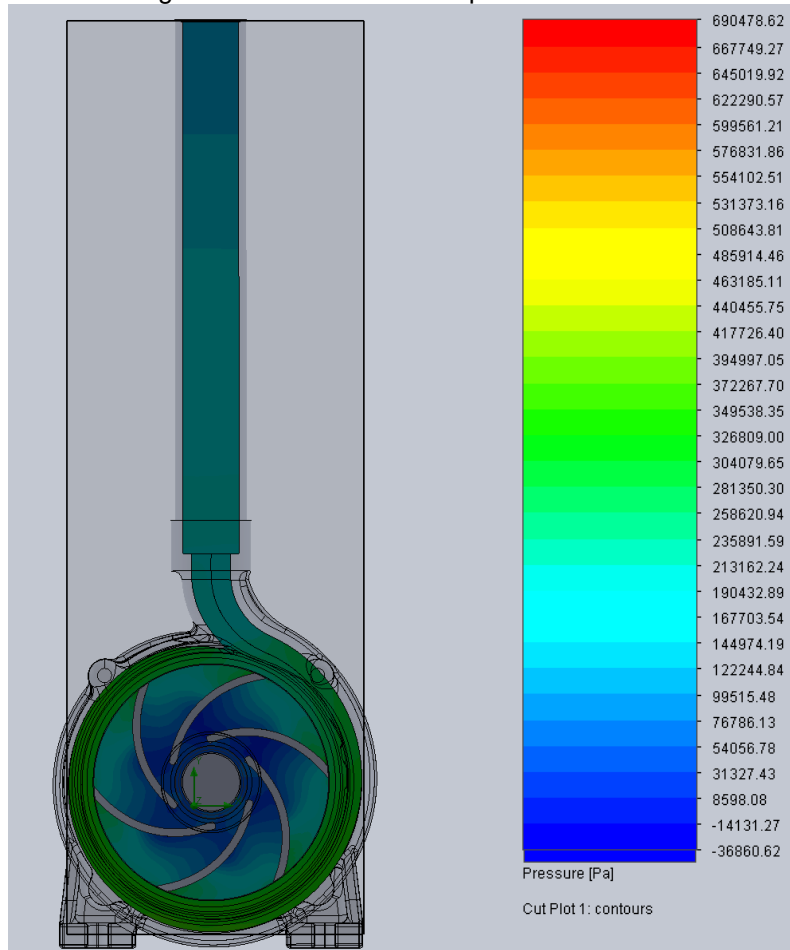
Figura 27. Modelo del mallado.



Fuente: Autores

A partir de allí, el software realiza iteraciones sucesivas para obtener los resultados de presión estática generada, distribución de presión, dirección del flujo y velocidad del fluido; el tiempo de análisis de la simulación fue de 3.160 s con 220 iteraciones.

Figura 28. Resultados de la presión del fluido.

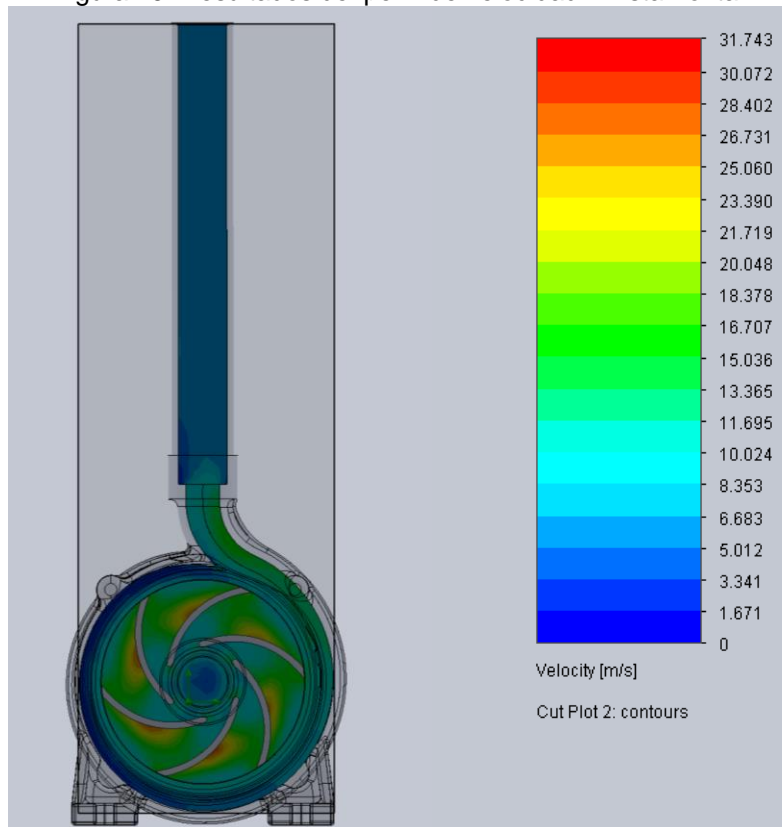


Fuente: Autores

La Figura 28, Figura 29 y Figura 30 respectivamente, permite comprender la distribución de presión, velocidad y diagrama de flujo de fluido dentro de la bomba. Se observa en varios colores la localización de los valores máximos y mínimos de los resultados que posteriormente se presentarán.

Los resultados obtenidos evidencian que la presión estática y total promedio desarrollada en el fluido en zonas cercanas al impulsor, alcanzan aproximadamente presiones de 56.972,57 Pa, tomando importancia la ecuación de Bernoulli; mientras que en otras zonas se alcanzan presiones máximas de 349.451,03 Pa, aproximadamente tres veces más que la presión atmosférica (ver Figura 28).

Figura 29. Resultados del perfil de velocidad – vista frontal.

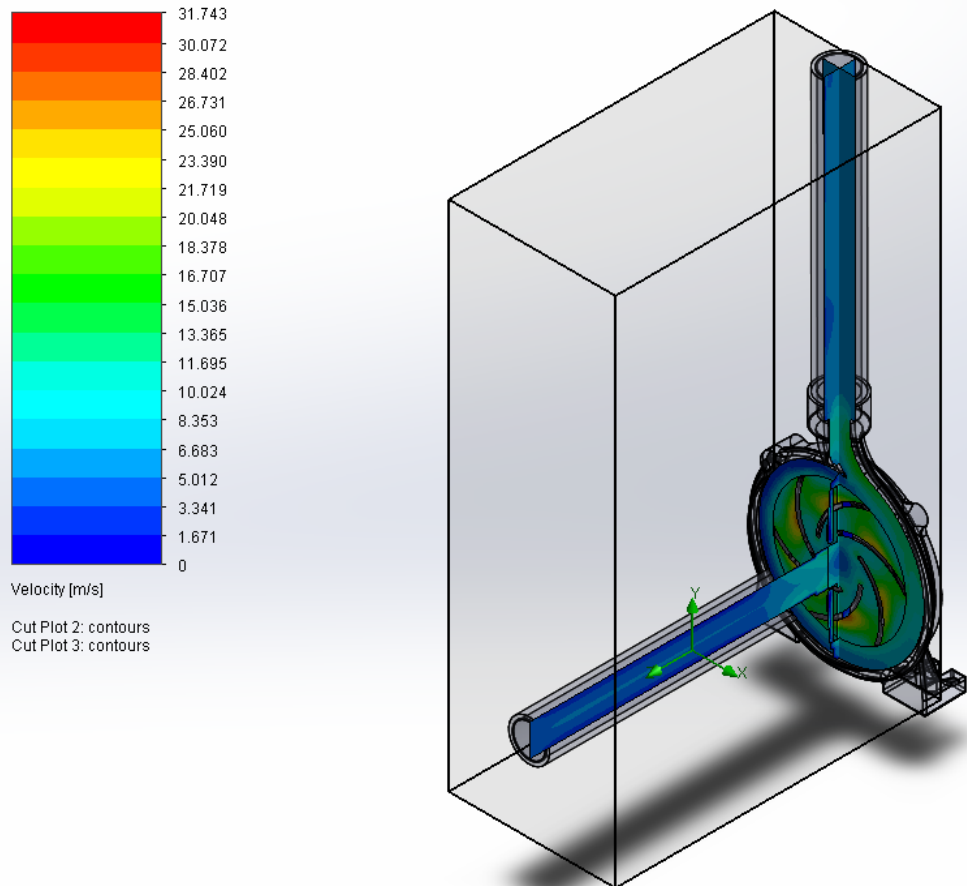


Fuente: Autores

También se evidencia que la velocidad del flujo de fluido promedio dentro del sistema es de 5,08 m/s; sin embargo, en zonas como el impulsor se alcanza velocidades de aproximadamente 25 m/s, siendo estas las más altas (ver Figura 29).

Las siguientes son la evaluación del rendimiento de la bomba, obtenida del estudio CFD. La eficiencia general de la bomba es del 61%, los resultados de CFD predicen una altura total de 30 m.

Figura 30. Resultados del perfil de velocidad – vista 3D.



Fuente: Autores

3.5. GUÍA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS

La guía de operación del banco de pruebas es un material de apoyo útil para los docentes y estudiantes en relación con la materia de mecánica de fluidos, que tiene como objetivo facilitar al estudiante la operación de este banco durante el desarrollo de la práctica.



UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER (UTS)
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Guía de funcionamiento del banco de pruebas

- 1) Verifique que toda la instrumentación como manómetros, caudalímetro y conexiones eléctricas del banco estén en perfectas condiciones para su operatividad; así mismo, garantice la correcta ubicación de los instrumentos para una medición confiable.
- 2) Compruebe que la válvula globo V4 se encuentre abierta totalmente; en dado caso que ésta se encuentre cerrada, abríla en sentido anti horario.
- 3) Inicie el llenado del tanque con la ayuda de una manguera a una fuente externa, hasta completar un volumen de 50 L.
- 4) Conecte el banco a una fuente de energía de 220 V.
- 5) Proceda a cebar la bomba B1 y B2 para que trabaje correctamente. Para cebar la bomba, retire el tapón roscado amarillo ubicado cerca de la descarga de la bomba y proceda a inundar con abundante agua hasta que el nivel supere la descarga de la bomba.

Funcionamiento de la bomba B2 individualmente (ver Figura 31)

- 6) Inicialmente, las válvulas de bola V2 y V3 deben estar cerradas totalmente.
- 7) Abra completamente la válvula de bola V1.
- 8) Active el funcionamiento de la bomba B2 desde el tablero de control.
- 9) Varíe el caudal mediante la manipulación de la válvula globo V4 con giros de 90° en sentido horario, trate de abarcar un rango amplio de caudales,

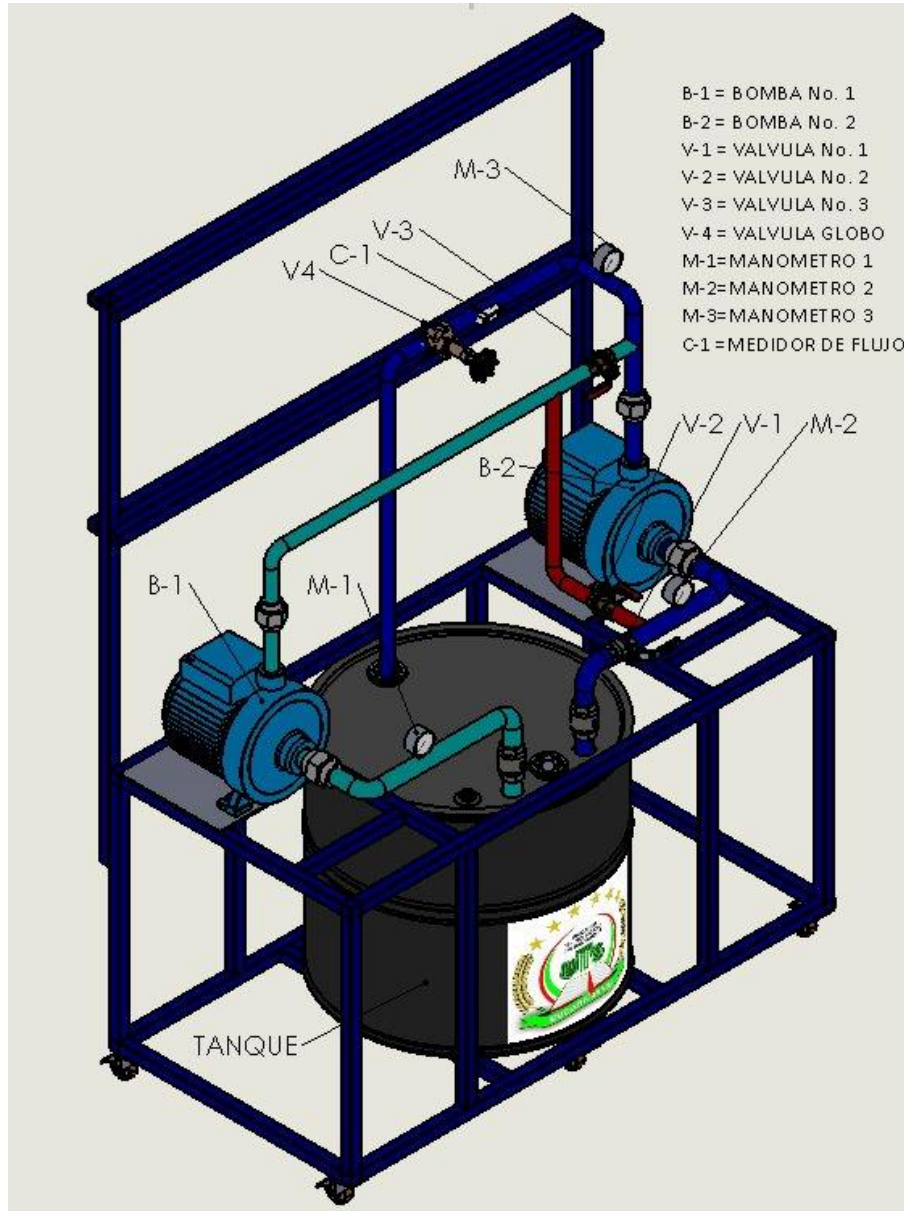
20 L/min \leq Q \leq 100 L/mi; de esta manera se empieza de caudales altos a bajos.

- 10) Tome la medida de presión que indica el manómetro M2 y M3 para las diferentes variaciones de caudal.
- 11) Apague el funcionamiento de la bomba B2 desde el tablero de control.
- 12) Garantice que la válvula globo V4 quede abierta totalmente.

Funcionamiento de las bomba B1 y B2 en serie (ver Figura 31)

- 13) Inicialmente, las válvulas de bola V1 y V3 deben estar cerradas totalmente.
- 14) Abra completamente la válvula de bola V2.
- 15) Active el funcionamiento de la bomba B1 y B2 desde el tablero de control.
- 16) Varíe el caudal mediante la manipulación de la válvula globo V4 con giros de 90° en sentido horario, trate de abarcar un rango amplio de caudales, 20 L/min \leq Q \leq 100 L/min; de esta manera se empieza de caudales altos a bajos.
- 17) Tome la medida de presión que indica el manómetro M1 y M3 para las diferentes variaciones de caudal.
- 18) Apague el funcionamiento de la bomba B1 y B2 desde el tablero de control.
- 19) Garantice que la válvula globo V4 quede abierta totalmente.

Figura 31. Diagrama hidráulico del banco de bombas.




Fuente: Autores

Funcionamiento de las bomba B1 y B2 en paralelo (ver Figura 31)

20) Inicialmente, la válvula de bola V2 debe estar cerrada totalmente.

- 21) Abra completamente las válvulas de bola V1 y V3.
- 22) Active el funcionamiento de la bomba B1 y B2 desde el tablero de control.
- 23) Varíe el caudal mediante la manipulación de la válvula globo V4 con giros de 90° en sentido horario, trate de abarcar un rango amplio de caudales, $20 \text{ L/min} \leq Q \leq 100 \text{ L/min}$; de esta manera se empieza de caudales altos a bajos.
- 24) Tome la medida de presión que indica el manómetro M1 ó M2 y M3 para las diferentes variaciones de caudal.
- 25) Apague el funcionamiento de la bomba B1 y B2 desde el tablero de control.
- 26) Cierre la válvula globo V4 totalmente.
- 27) Desconecte el banco de pruebas de la fuente de energía.
- 28) Vacíe el tanque de almacenamiento, una vez finalice la práctica de laboratorio.

Por otra parte, la guía de mantenimiento del banco de pruebas tiene como propósito prolongar la vida útil de los accesorios e instrumentos que lo conforman. Se programaron actividades de mantenimiento una vez finalizada la práctica de laboratorio y mantenimiento preventivo cada seis (6) meses. A continuación se presentan las guías de mantenimiento.

 <p>uts Unidades Tecnológicas de Santander</p>	<p>UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER (UTS) INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS</p>
<p>Guía de mantenimiento del banco de pruebas al finalizar la práctica</p> <p>➤ Desconectar el banco de pruebas de la fuente de energía.</p>	

- Desocupar totalmente el tanque de almacenamiento de agua.
- Revisar que toda la instrumentación del banco este en perfectas condiciones.
- Revisar que el tablero de control y sus conexiones eléctricas no presenten puntos calientes.
- Cerciorarse que la línea de tubería y los accesorios acoplados a éste no presenten fuga de fluido.

Importante: En dado caso que algún instrumento o accesorio del banco se encuentre en mal estado, reportar al docente que lidera la práctica.

 <p>uts Unidades Tecnológicas de Santander</p>	<p style="text-align: center;">UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER (UTS) INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS</p>
<p style="text-align: center;">Guía de mantenimiento del banco de pruebas cada seis (6) meses</p> <p>De la bomba</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Verificar conexión eléctrica de cada motor.➤ Tomar medidas eléctricas del bobinado del motor.➤ Inspeccionar vibraciones del motor y demás estructura.➤ Revisar el impulsor del motor.➤ Reemplazar sellos mecánicos, de ser necesarios. <p>De la línea de tubería</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Inspeccionar la tubería de succión y de descarga de las bombas.➤ Retirar de la línea de tubería todo aquello que obstruya el paso del fluido.	

- Revisar que las manivelas de las válvulas de bola y globo sean manipuladas fácilmente.
- Verificar el correcto funcionamiento de la línea de tubería en serie y paralelo.
- Retocar la línea de tubería en caso de presentar pérdida de pintura.

Del tanque de almacenamiento

- Realizar lavado del tanque para remover suciedad e impurezas.

Del soporte

- Hacer limpieza y lubricación de las cuatro (4) ruedas de desplazamiento.
- Revisar que el soporte no presente fractura en la soldadura.
- Ajustar la tornillería que sostiene las dos (2) bombas.
- Verificar visualmente que el banco no presente vibraciones.

En el Anexo E se presenta la guía práctica de laboratorio del banco de pruebas.

4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA PRÁCTICA

En las Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos al realizar la guía práctica de laboratorio propuesta para el funcionamiento del banco de pruebas de la bomba B2 independiente, bomba B1 y B2 en serie y bomba B1 y B2 en paralelo, respectivamente.

Tabla 15. Resultados experimentales obtenidos con la Bomba B2 independiente.

N	Apertura válvula globo V4	Caudal (Q)	Caudal (Q)	Presión succión manómetro M2 (P ₁)	Presión descarga manómetro M3 (P ₂)	Delta de presión ΔP = (P ₂ - P ₁)	Altura útil (H)
	Grados	L/min	m ³ /s	Psi	Psi	Psi	m
1	0	0,0	0,00000000	0	38	38	26,8152259
2	90	19,2	0,00032000	0	31	31	21,8755790
3	180	34,1	0,00056833	0	29	29	20,4642513
4	270	45,2	0,00075333	0	24	24	16,9359321
5	360	55,1	0,00091833	0	18	18	12,7019491
6	450	61,3	0,00102167	0	12	12	8,4679661

Tabla 16. Resultados experimentales obtenidos con la Bomba B1 y B2 en serie.

N	Apertura válvula globo V4	Caudal (Q)	Caudal (Q)	Presión succión manómetro M1 (P ₁)	Presión descarga manómetro M3 (P ₂)	Delta de presión ΔP = (P ₂ - P ₁)	Altura útil (H)
	Grados	L/min	m ³ /s	Psi	Psi	Psi	m
1	0	0,0	0,00000000	0	90	90	63,5097455
2	90	26,6	0,00044333	0	74	74	52,2191240
3	180	44,6	0,00074333	0	60	60	42,3398303
4	270	58,2	0,00097000	0	49	49	34,5775281
5	360	66,9	0,00111500	0	34	34	23,9925705
6	450	72,5	0,00120833	0	24	24	16,9359321

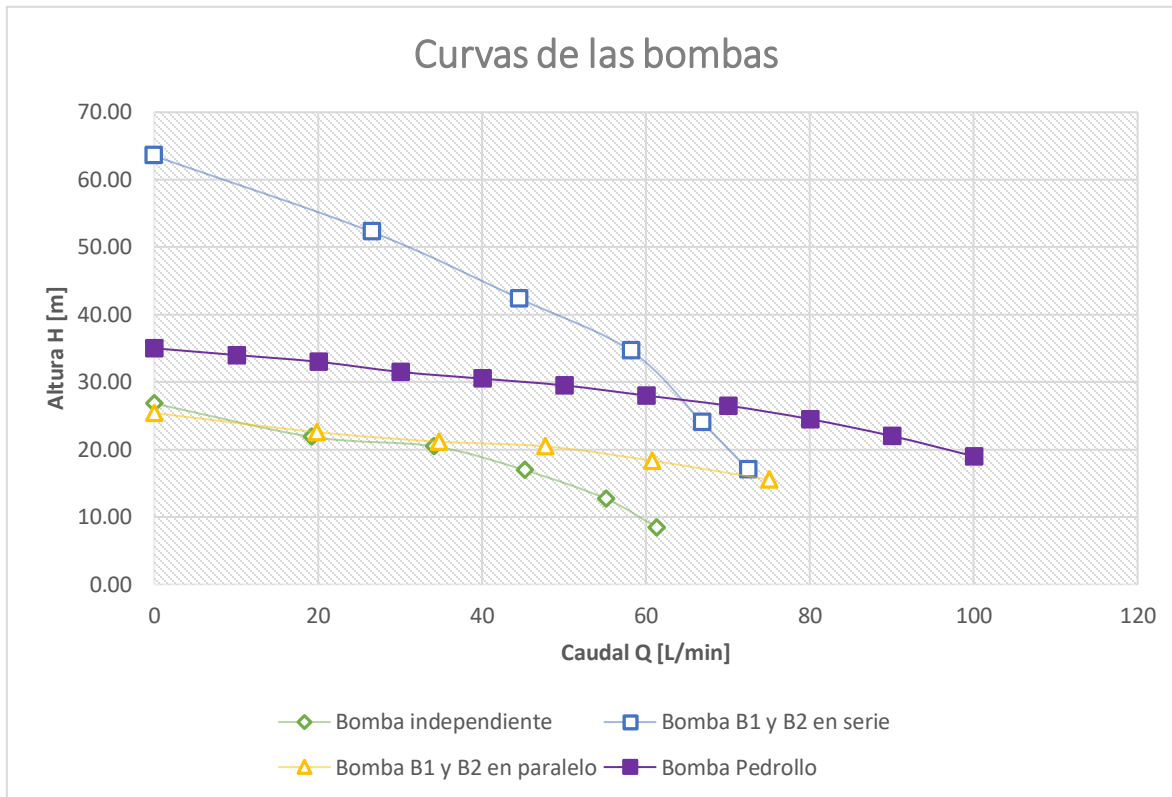
Tabla 17. Resultados experimentales obtenidos con la Bomba B1 y B2 en paralelo.

N	Apertura válvula globo V4	Caudal (Q)	Caudal (Q)	Presión succión manómetro M1 (P ₁)	Presión succión manómetro M3 (P ₁)	Presión descarga manómetro M4 (P ₂)	Delta de presión ΔP = (P ₂ - P ₁)	Altura útil (H)
	Grados	L/min	m ³ /s	Psi	Psi	Psi	Psi	m
1	0	0,0	0,00000000	0	0	36	36	25,4038982
2	90	19,8	0,00033000	0	0	32	32	22,5812428
3	180	34,7	0,00057833	0	0	30	30	21,1699152
4	270	47,7	0,00079500	0	0	29	29	20,4642513
5	360	60,7	0,00101167	0	0	26	26	18,3472598
6	450	75,0	0,00125000	0	0	22	22	15,5246044

Una vez obtenidos los resultados experimentales, se realizó una representación gráfica de éstos a fin de discutir los resultados y compararlos con la curva de

funcionamiento de la bomba del fabricante; por tanto, se graficó la altura útil (m) vs. caudal (L/min) (ver Figura 32).

Figura 32. Curvas experimentales de las bombas centrífugas y del fabricante Pedrollo.



Fuente: Autores

La Figura 32 presenta la curva de la bomba Pedrollo dada por el fabricante (línea color morada), los resultados obtenidos del funcionamiento de una sola bomba (línea verde), de dos bombas en serie (línea azul) y de dos bombas en paralelo (línea amarilla).

De la Figura 32 se infiere que existe una desviación entre la curva dada por el fabricante (línea color morada) y las curvas obtenidas cuando las bombas trabajan independientemente, en serie y paralelo. Lo anterior puede ser atribuido a que al sistema experimental se le incorporaron varios accesorios que conlleva a que el sistema de estudio tenga varias pérdidas por fricción, así como caídas de presión.

Así mismo, es evidente que la configuración de dos bombas en serie conlleva a que, bajo el mismo rango de caudal (0 a 61,3 L/min), las bombas entregan mayor altura manométrica, prácticamente más del doble de una bomba independiente; experimentalmente el sistema en serie entrega a 0 L/min una altura máxima de 63,51 m y a 72,5 L/min una altura de 16,93 m.

Caso contrario sucede con el funcionamiento de dos bombas en paralelo, pues ésta sigue la tendencia del funcionamiento de una bomba independiente a diferencia que entrega mayores caudales, experimentalmente el sistema entrega un caudal máximo de 75 L/min con un desplazamiento de 15,52 m; lo anterior se atribuye a que en este sistema se aumenta la velocidad del fluido en el tramo donde las dos bombas unen sus caudales.

Nótese que ninguna de las bombas en funcionamiento independiente, sistema en serie y sistema en paralelo lograron alcanzar caudales cercanos a los 100 L/min, caudal máximo de funcionamiento de la bomba Pedrollo.

Finalmente, se realizó la simulación de la bomba Pedrollo a las diferentes velocidades realizadas en la práctica experimental mediante el uso del software CFD SolidWorks Fluid Simulation. Principalmente se presentan los resultados de la simulación de tres (3) velocidades $v = 0,33 \text{ m/s}$, $v = 1,42 \text{ m/s}$ y $v = 1,58 \text{ m/s}$, los cuales se presentan en la Figura 33, Figura 34 y Figura 35, respectivamente.

Los resultados obtenidos se presentan en función de la trayectoria en líneas del fluido en la bomba; se observa que el fluido al ingresar a la bomba (en la succión) alcanza valores mínimos de velocidad, mientras que en zonas cercanas al impulsor alcanza velocidades altas, valores que eran de esperarse, y finalmente a la salida de la bomba (en la descarga) los valores de velocidad disminuyen levemente.

Figura 33. Resultados del perfil de velocidad
 $v = 0,33 \text{ m/s}$

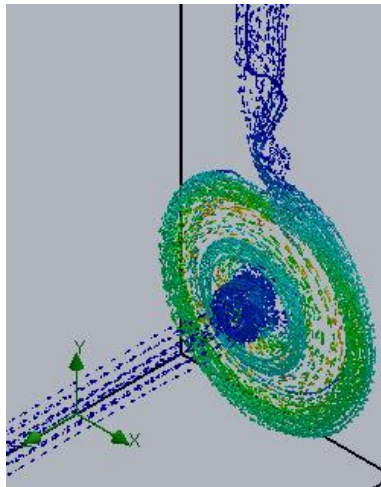


Figura 34. Resultados del perfil de velocidad
 $v = 1,42 \text{ m/s}$

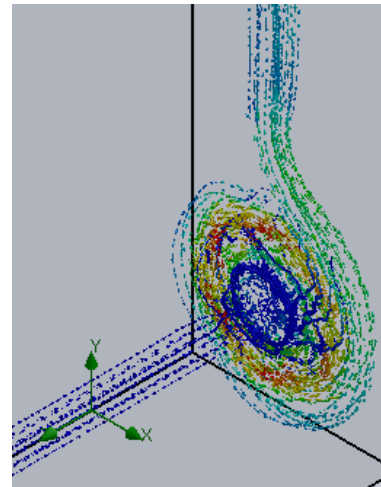
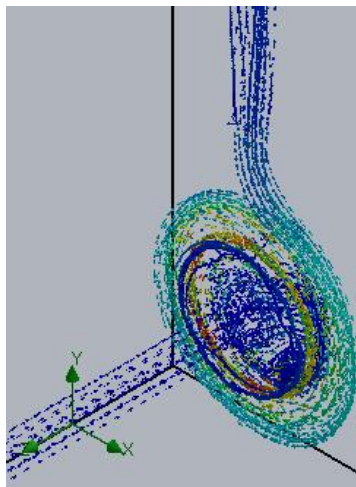


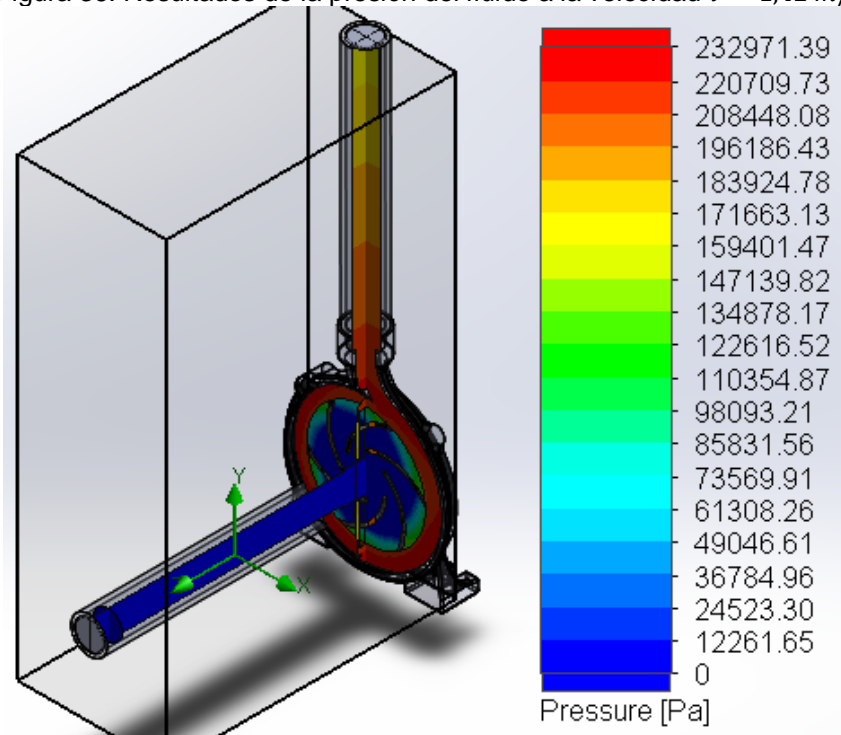
Figura 35. Resultados del perfil de velocidad $v = 1,58 \text{ m/s}$



Fuente: Autores

Por otra parte, la Figura 36 representa los resultados obtenidos de la presión del fluido al correr la simulación a una velocidad de 1,42 m/s, donde se evidencia el incremento de presión desde la entrada de la bomba hacia la salida de la misma

Figura 36. Resultados de la presión del fluido a la velocidad $v = 1,42 \text{ m/s}$



Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

- El desarrollo hidráulico propuesto en este trabajo, permitió el diseño de diferentes configuraciones de los circuitos, bombas operadas independientemente, en serie y paralelo, lo que satisface las necesidades del banco de pruebas y facilita el desarrollo de distintas prácticas de laboratorio.
- Se atribuye que gracias al estudio y a la realización de este proyecto se puede apreciar con facilidad y entendimiento el funcionamiento y comportamiento que tienen las bombas centrífugas en sus diferentes configuraciones, y principalmente comparar el desempeño y eficiencia de las mismas de acuerdo a las especificadas dadas por el fabricante.
- Se observa notoriamente que hay una desviación entre las curvas de eficiencia obtenidas en las pruebas cuando se tienen configuraciones en serie y paralelo demostrando que las bombas en serie tienen mejor respuesta al entregar mayor altura manométrica a un mismo rango de caudal; mientras al estar conectadas en paralelo se obtienen mayor caudal y por ende aumenta la velocidad del fluido en el sistema.
- El software CFD SolidWorks Fluid Simulation permitió la fácil comprensión de la distribución de presión y velocidad del fluido dentro de la bomba centrífuga Pedrollo de 1 hp de potencia. Los resultados obtenidos evidencian que la presión estática y total promedio desarrollada en el fluido en zonas muy cercanas al inicio del impulsor alcanzan presiones más bajas, mientras que en zonas más alejadas al impulsor se alcanzan presiones más altas; de igual forma, se evidencia el incremento de presión desde la entrada de la bomba hacia la salida de la misma. Por otra parte, los resultados de variación de la velocidad del fluido muestran que al ingresar el fluido a la bomba se

alcanzan valores mínimos de velocidad, mientras que en zonas cercanas al impulsor alcanza velocidades altas.

6. RECOMENDACIONES

El diseño y construcción de este banco de pruebas fue una primera aproximación a los objetivos planteados en este trabajo, sin embargo, a fin de mejorar el funcionamiento y la estética del mismo se propone que las mejoras estén en función de:

- Optimizar la toma de medición del caudal, para ello se sugiere cambiar la válvula de globo por una válvula reguladora que garantice una medición de caudal constante, además para que ésta se pueda controlar de manera remota.
- Instalar al tanque de almacenamiento, una línea de llenado de agua limpia para facilitar el llenado del mismo, así mismo, instalar una línea de drenaje en el fondo del tanque a fin de desocupar el fluido de éste, una vez se finalicen las prácticas con los estudiantes.
- Mejorar la estética de la caja de control donde se encuentra instalado el circuito eléctrico del banco, para ello se sugiere reubicar el circuito de control y potencia en una caja de menor dimensión.
- Finalmente, automatizar el proceso realizado en el banco de pruebas mediante la adaptación de un programa de adquisición de datos, de manera que éste se lleve a cabo forma segura y sin que los estudiantes lo manipulen directamente.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agila Díaz, F., Calahorrano Pérez, I. (2011). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para bombas centrífugas conectadas en serie y paralelo* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana – Facultad de Ingenierías. Quito, Ecuador.

American Petroleum Institute (2011). *Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries*. Washington: ANSI/API STANDARD 610.

Amores Silva, I., Chávez Estrada, M., Miranda Ramos, M. (2018). Diseño, implementación y control para un banco de pruebas con bombas centrífugas en conexión serie y paralelo. *Científica*, 22 (1), pp. 51-59.

Cajo Solano, S.A., López López, L.E. (2012). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para la determinación de la eficiencia de bombas centrífugas domiciliarias* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Facultad de Ciencias. Riobamba, Ecuador.

Çengel, Y.A. y Cimbala, y.M. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill.

Corporation, D.S. (2010). *Introducción a la Aplicaciones de Análisis de Tensión con Solidworks Simulation*. Solidworks Corporation, pp. 52-60.

Correa Haz, A. (2016). *Proyecto de banco de pruebas para bombas centrífugas* (Tesis de pregrado). Universidad de Coruña - Escuela Técnica Superior de Náutica y Máquinas. La Coruña, España.

David, H. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. EEUU: McGraw-Hill.

García Hernández, H.A., Suárez Rincón, J.A. (2010). *Diseño, construcción y puesta a prueba de un banco de bombas centrifugas en serie, paralelo y mixto* (Tesis de pregrado). Universidad Pontificia Bolivariana – Facultad de Ingenierías Mecánicas. Bucaramanga, Santander.

Geankopolis, C.J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: Compañía Editorial Continental.

Hicks, T.G. (1974). *Bombas, su selección y aplicación*. México: Compañía Editora Continental S.A.

Karassik, I.J., Carter, R. (1971). *Bombas centrifugas. Selección, operación y mantenimiento*. México: Compañía Editorial Continental S.A.

López Rua, A.M., Tamayo Alzate, O.E. (2012). Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, 8 (1), pp. 145-166.

Mejía López, J.L. (2009). *Diseño de un sistema “banco de pruebas” para la realización de pruebas de rendimiento a bombas centrifugas* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander – Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Bucaramanga, Santander.

Moyano Arévalo, J.R., Naranjo Vargas, E.M. (2015). *Automatización de la adquisición de datos en un banco de pruebas de bombas centrifugas instaladas en serie y paralelo* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Facultad de Mecánica. Riobamba, Ecuador.

Spampinato, T.G. (2005). Baseplate update. USA: Department of Energy. tens, V. M. (2012).

Soler, M.A. (1992). *Manual de bombas, 1ra Edición*. España: Imprenta GRAFISTEC.

ANEXOS

Anexo A. Ficha técnica de la bomba centrífuga Pedrollo CP620

		<p align="center">UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER (UTS) INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS</p>	
1. DATOS GENERALES			
Nombre:	Bomba centrífuga	<p align="center">Bomba centrífuga</p>	
Marca:	Pedrollo		
Modelo:	CP 620		
Laboratorio:	Mecánica de fluidos		
N° Equipos iguales:	2		
2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Caudal máximo:	100 L/min	Altura mínima:	21 m
Altura máxima:	34 m	Altura aspiración manométrica:	7 m
Temperatura del líquido:	-10 °C hasta 90 °C	Temperatura ambiente hasta:	40 °C
Presión máxima en el cuerpo de la bomba:	6 bar	Potencia del motor:	1 Hp
Frecuencia:	60 Hz	Velocidad:	3.450 rpm
USOS Y APLICACIONES			
<p>Son recomendadas para bombear agua limpia, sin partículas abrasivas y líquidos químicamente no agresivos con los materiales que constituyen la bomba. Por su confiabilidad y simplicidad encuentran un amplio uso en el sector doméstico y civil, particularmente para la distribución del agua acopladas a pequeños o medianos tanques autoclaves, para el vaciado o para la irrigación de huertos o jardines. La instalación se debe realizar en lugares cerrados o protegidos de la intemperie.</p>			
MODO DE CONEXIÓN			
		<p>Los motores trifásicos son motores en los que el bobinado inductor colocado en el estátor, está formado por tres bobinados independientes desplazados 120° eléctricos entre sí y alimentados por un sistema trifásico de corriente alterna. Todo circuito bobinado trifásico se puede conectar bien en estrella o bien en triángulo: En la conexión en estrella todos los finales de bobina se conectan en un punto común y se alimentan por los otros extremos libres.</p>	

	Por el contrario en la conexión en triángulo cada final de bobina se conecta al principio de la fase siguiente, alimentando el sistema por los puntos de unión.
Recomendaciones de uso:	Para el correctamente funcionamiento de la bomba, esta se debe cebar primero, retirando el tapón roscado amarillo ubicado cerca de la descarga de la bomba, posteriormente, ésta se debe inundar con abundante agua hasta que el nivel supere la descarga de la bomba.
Ubicación del manual:	https://www.pedrollo.com/public/allegati/CP%200.25-2.2%20kW_ES_60Hz.pdf

Anexo B. Diagramas de los circuitos eléctricos del panel de control

Figura 37. Circuito eléctrico del minibreaker N°1

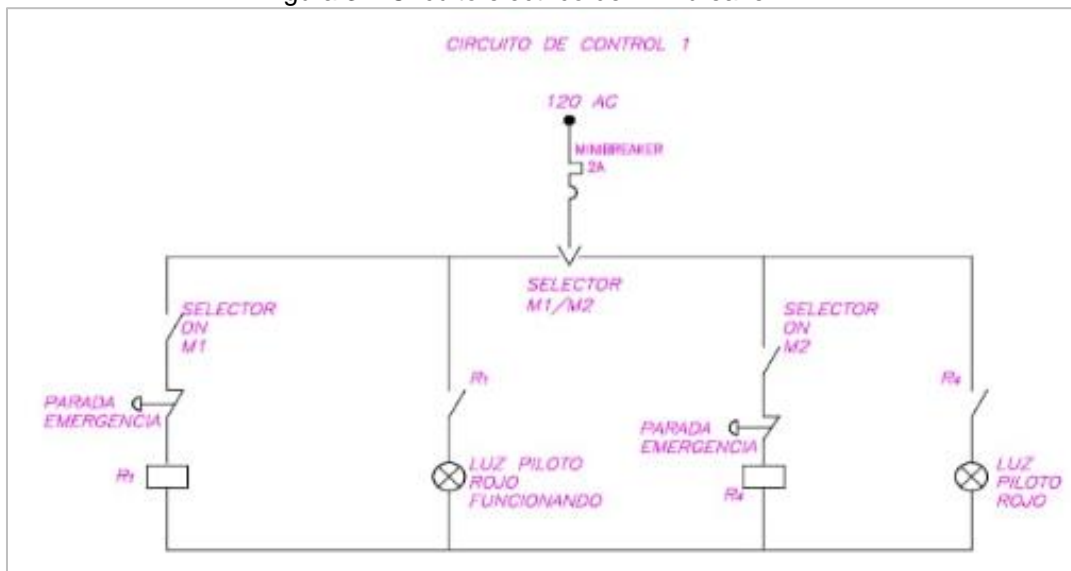


Figura 38. Circuito eléctrico del minibreaker N°2

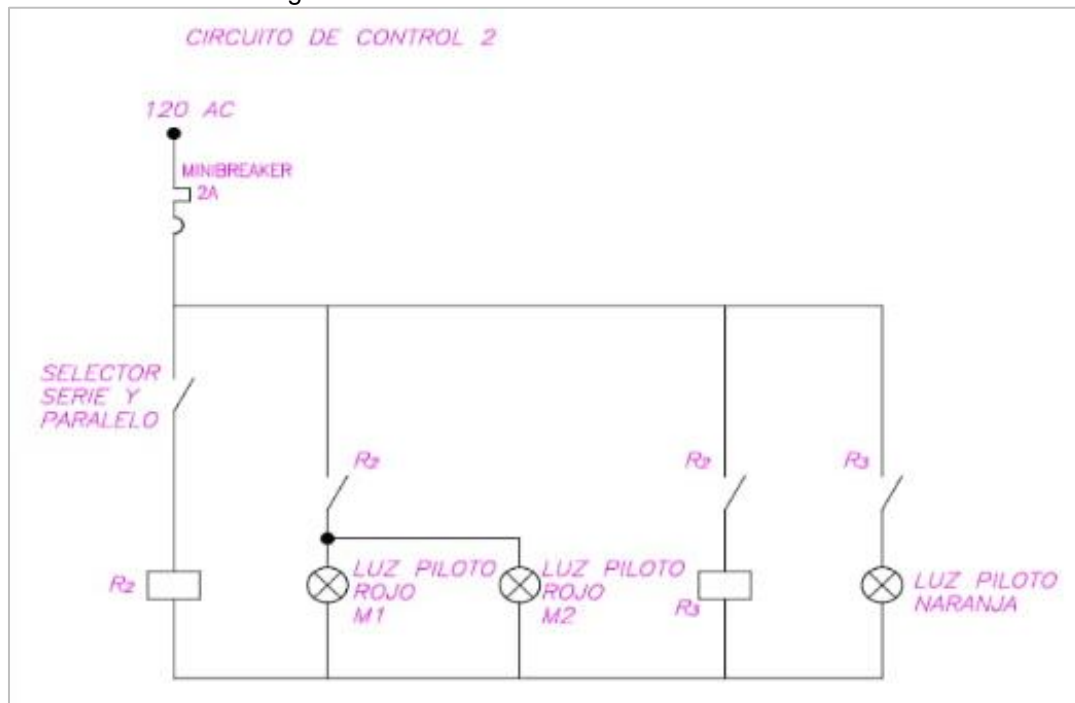


Figura 39. Circuito eléctrico del fusible



Anexo C. Manual de operación y uso del caudalímetro

		<p align="center">UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER (UTS) INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS</p>	
1. DATOS GENERALES			
Nombre:	Caudalímetro		
Marca:	Prime		
Modelo:	-		
Laboratorio:	Mecánica de fluidos		
N° Equipos iguales:	1		
2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Caudal máximo:	120 L/min	Caudal mínimo:	15 L/min
Temperatura de funcionamiento:	-10 °C a 60 °C	Presión de funcionamiento máximo:	20 bar
Precisión de medida:		±1%	
USOS Y APLICACIONES			
<p>Instrumento de medida para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido o para la medición del gasto másico. Estos aparatos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido.</p> <p>Estructura compacta, fácil de instalar, lectura clara, alta confiabilidad y precisión de medición. El instrumento muestra tanto el flujo instantáneo como el acumulativo.</p> <p>Se puede usar ampliamente para medir diesel, queroseno, gasolina, etc.</p>			
MODO DE CONEXIÓN			
		<p>Conexión por alimentación al DC por medio de baterías.</p>	
Recomendaciones de uso:		<p>En dado caso que el caudalímetro se deje de utilizar por mucho tiempo, desconectar la batería de éste para prolongar su vida útil.</p>	
Ubicación del manual:		Ninguna	

Anexo D. Registro fotográfico del montaje y construcción del banco de pruebas en serie y paralelo

Figura 40. Construcción del tanque de almacenamiento



Figura 41. Corte del tubo cuadrado de acero galvanizado de 1" x 1" para la construcción del soporte



Figura 42. Armado de la estructura metálica mediante aplicación de soldadura



Figura 43. Ubicación del tanque de almacenamiento en el banco de pruebas



Figura 44. Cableado de componentes del tablero de control



Figura 45. Vista general del tablero de control



Figura 46. Ubicación de bombas y líneas de tubería



Figura 47. Trabajo en equipo para la construcción del banco de pruebas



Figura 48. Pintura y embellecimiento de estructura y líneas de tubería



Figura 49. Vista preliminar banco de pruebas



Figura 50. Montaje final banco de pruebas



Anexo E. Guía práctica del banco de pruebas

Se planteó una (1) práctica experimental para que el estudiante desarrolle a través del banco de pruebas de bombas centrífugas propuesto en este trabajo. La práctica evalúa el comportamiento de las bombas de manera independiente, en serie y en paralelo.

A continuación se presenta la guía práctica de laboratorio, la cual describe el objetivo principal y específico, los materiales y equipos, el procedimiento de la práctica, la toma de datos y resultados y finalmente, el análisis de los resultados.

 <p>uts Unidades Tecnológicas de Santander</p>	<p>UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER (UTS) INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS</p>
<p>Guía práctica de laboratorio: Sistema de funcionamiento de bombas centrífugas de manera individual, serie y paralelo</p> <p>Objetivo general:</p> <p>Desarrollar aptitud crítica y analítica en los estudiantes del programa de Ingeniería Electromecánica de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) mediante el desarrollo de prácticas experimentales a través del manejo del banco de pruebas de bombas centrífugas de forma independiente, serie y paralelo a fin de mejorar su aprendizaje y formación académica.</p>	

Objetivos específicos:

- Estudiar el comportamiento de las bombas centrifugas en los diferentes sistemas (independiente, serie y paralelo).
- Construir las curvas de las bombas según los diferentes sistemas (independiente, serie y paralelo).

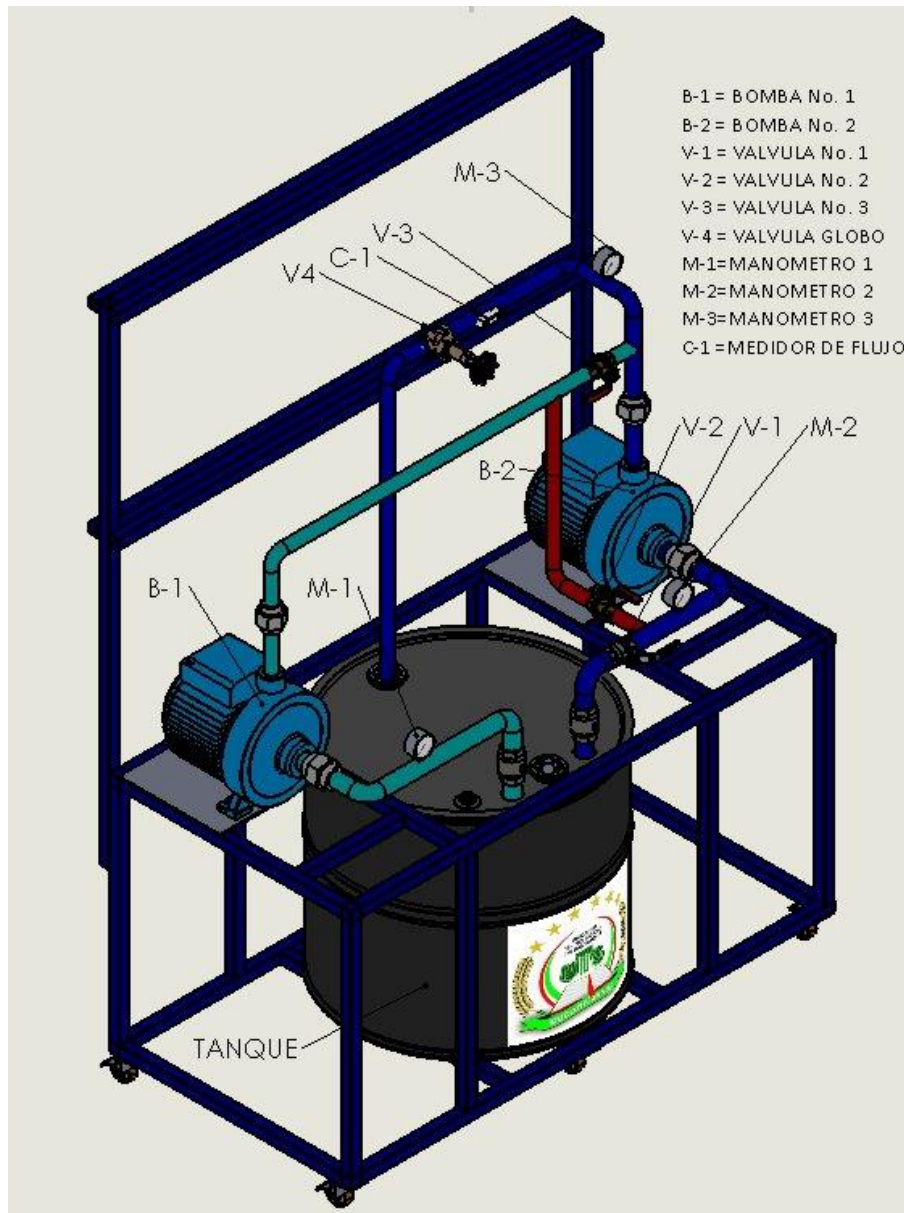
Materiales y equipos:

- Banco de pruebas de bombas centrifugas.
- 2 bombas centrifugas marca Pedrollo de 1 hp y motor trifásico de 220 V; caudal máximo de 100 L/min cada una.
- 3 manómetros con rangos de medición de presión de 0 a 150 psi.
- 1 caudalímetro con rango de medición de caudal de 15 a 120 L/min.

Procedimiento de la práctica:

- 29) Verifique que toda la instrumentación como manómetros, caudalímetro y conexiones eléctricas del banco estén en perfectas condiciones para su operatividad; así mismo, garantice la correcta ubicación de los instrumentos para una medición confiable.
- 30) Compruebe que la válvula globo V4 se encuentre abierta totalmente; en dado caso que ésta se encuentre cerrada, abríla en sentido anti horario.
- 31) Inicie el llenado del tanque con la ayuda de una manguera a una fuente externa, hasta completar un volumen de 50 L.
- 32) Conecte el banco a una fuente de energía de 220 V.
- 33) Proceda a cebar la bomba B1 y B2 para que trabaje correctamente. Para cebar la bomba, retire el tapón roscado amarillo ubicado cerca de la descarga de la bomba y proceda a inundar con abundante agua hasta que el nivel supere la descarga de la bomba.

Figura 51. Diagrama hidráulico del banco de bombas.



Fuente: Autores

Funcionamiento de la bomba B2 individualmente (ver Figura 51)

- 34) Inicialmente, las válvulas de bola V2 y V3 deben estar cerradas totalmente.
- 35) Abra completamente la válvula de bola V1.

- 36) Active el funcionamiento de la bomba B2 desde el tablero de control.
- 37) Varíe el caudal mediante la manipulación de la válvula globo V4 con giros de 90° en sentido horario, trate de abarcar un rango amplio de caudales, $20 \text{ L/min} \leq Q \leq 100 \text{ L/min}$; de esta manera se empieza de caudales altos a bajos.
- 38) Tome la medida de presión que indica el manómetro M2 y M3 para las diferentes variaciones de caudal, mínimo 5 puntos de medida. La toma de datos debe ser ágil y rápida para evitar el sobrecalentamiento de las bombas.
- 39) Apague el funcionamiento de la bomba B2 desde el tablero de control.
- 40) Garantice que la válvula globo V4 quede abierta totalmente.

Los datos obtenidos del anterior desarrollo experimental se deben registrar en la Tabla 18.

Funcionamiento de las bomba B1 y B2 en serie (ver Figura 51)

- 41) Inicialmente, las válvulas de bola V1 y V3 deben estar cerradas totalmente.
- 42) Abra completamente la válvula de bola V2.
- 43) Active el funcionamiento de la bomba B1 y B2 desde el tablero de control.
- 44) Varíe el caudal mediante la manipulación de la válvula globo V4 con giros de 90° en sentido horario, trate de abarcar un rango amplio de caudales, $20 \text{ L/min} \leq Q \leq 100 \text{ L/min}$; de esta manera se empieza de caudales altos a bajos.
- 45) Tome la medida de presión que indica el manómetro M1 y M3 para las diferentes variaciones de caudal, mínimo 5 puntos de medida. La toma de datos debe ser ágil y rápida para evitar el sobrecalentamiento de las bombas.
- 46) Apague el funcionamiento de la bomba B1 y B2 desde el tablero de control.

47) Garantice que la válvula globo V4 quede abierta totalmente.

Los datos obtenidos del anterior desarrollo experimental se deben registrar en la Tabla 19.

Funcionamiento de las bomba B1 y B2 en paralelo (ver Figura 51)

48) Inicialmente, la válvula de bola V2 debe estar cerrada totalmente.

49) Abra completamente las válvulas de bola V1 y V3.

50) Active el funcionamiento de la bomba B1 y B2 desde el tablero de control.

51) Varíe el caudal mediante la manipulación de la válvula globo V4 con giros de 90° en sentido horario, trate de abarcar un rango amplio de caudales, $20 \text{ L/min} \leq Q \leq 100 \text{ L/min}$; de esta manera se empieza de caudales altos a bajos.

52) Tome la medida de presión que indica el manómetro M1 ó M2 y M3 para las diferentes variaciones de caudal, mínimo 5 puntos de medida. La toma de datos debe ser ágil y rápida para evitar el sobrecalentamiento de las bombas.

53) Apague el funcionamiento de la bomba B1 y B2 desde el tablero de control.

54) Cierre la válvula globo V4 totalmente.

55) Desconecte el banco de pruebas de la fuente de energía.

56) Vacíe el tanque de almacenamiento, una vez finalice la práctica de laboratorio.

Los datos obtenidos del anterior desarrollo experimental se deben registrar en la Tabla 20.

Toma de datos:

Durante el desarrollo de la práctica, el estudiante deberá registrar los datos experimentales en la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20.

Tabla 18. Datos experimentales Bomba B2 independiente.

N	Apertura válvula globo V4	Caudal (Q)	Caudal (Q)	Presión succión manómetro M2 (P ₁)	Presión descarga manómetro M3 (P ₂)	Delta de presión ΔP = (P ₂ - P ₁)	Altura útil (H)
	Grados	L/min	m ³ /s	Psi	Psi	Psi	m
1	90						
2	180						
3	270						
4	360						
5	450						

Tabla 19. Datos experimentales Bomba B1 y B2 en serie.

N	Apertura válvula globo V4	Caudal (Q)	Caudal (Q)	Presión succión manómetro M1 (P ₁)	Presión descarga manómetro M3 (P ₂)	Delta de presión ΔP = (P ₂ - P ₁)	Altura útil (H)
	Grados	L/min	m ³ /s	Psi	Psi	Psi	m
1	90						
2	180						
3	270						
4	360						
5	450						

Tabla 20. Datos experimentales Bomba B1 y B2 en paralelo.

N	Apertura válvula globo V4	Caudal (Q)	Caudal (Q)	Presión succión manómetro M1 (P ₁)	Presión succión manómetro M3 (P ₁)	Presión descarga manómetro M4 (P ₂)	Delta de presión ΔP = (P ₂ - P ₁)	Altura útil (H)
	Grados	L/min	m ³ /s	Psi	Psi	Psi	Psi	m
1	90							
2	180							
3	270							
4	360							
5	450							

Para el cálculo de la altura útil (H), el estudiante deberá emplear la siguiente ecuación:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho gH$$

Donde:

P_1 =Presión de succión del sistema (Pa)

P_2 =Presión de descarga del sistema (Pa)

ρ = Densidad del fluido (kg/m^3); fluido de trabajo agua $\rho = 997kg/m^3$

g = Gravedad (m/s^2); $g = 9,8 m/s^2$

H = Altura útil (m)

Recuerde que 1 psi equivale a 6894,7591 Pa.

Análisis de resultados

- a) Graficar altura H (m) vs caudal Q (L/min) para cada uno de los sistemas, bomba B2 independiente, bomba B1 y B2 en serie y bomba B1 y B2 en paralelo.
- b) Comparar los resultados obtenidos en el inciso a) con los datos suministrados por el proveedor de las bombas.