

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS  
PARA PRUEBAS DE CAVITACIÓN EN BOMBAS  
ROTODINÁMICAS**

PRESENTADO POR:

**RODRIGO FERNANDO LÓPEZ PÉREZ**

**ELISEO ANDRÉS SÁNCHEZ BLANCO**

**JUAN FRANCISCO TORREZ MELÉNDEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO 2024

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA**

SECRETARIO GENERAL :

**Lic. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**Ing. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA**

SECRETARIO :

**Arq. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR INTERINO :

**M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS  
PARA PRUEBAS DE CAVITACIÓN EN BOMBAS  
ROTODINÁMICAS**

Presentado por :

**RODRIGO FERNANDO LÓPEZ PÉREZ**  
**ELISEO ANDRÉS SÁNCHEZ BLANCO**  
**JUAN FRANCISCO TORREZ MELÉNDEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Ing. Miguel Tomás Amaya Gómez

San Salvador, Agosto de 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. MIGUEL TOMÁS AMAYA GÓMEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, Julio López y Ana Pérez, por ser un ejemplo constante y una fuente inagotable de inspiración a lo largo de mi vida. Gracias por haber dado siempre todo lo que ha estado a su alcance para que pudiera alcanzar mis metas, por apoyarme incondicionalmente en cada decisión tomada, y por todos los sacrificios que realizaron para hacer posible este logro. Agradezco profundamente todas sus enseñanzas y el haberme acompañado a lo largo de todo mi camino, y por inculcarme valores como la perseverancia, el esfuerzo y la integridad, que han sido fundamentales para llegar hasta aquí.

A mis hermanos, Francisco López y Julio López, les agradezco de corazón por brindarme su apoyo incondicional y servir de guía siempre que lo necesité. Gracias por ser una fuente de inspiración y un ejemplo a seguir, por darme el aliento necesario para continuar, y por compartir generosamente sus conocimientos conmigo. Gracias por estar siempre ahí, dispuestos a ayudarme y motivarme a dar lo mejor de mí mismo.

A mis compañeros de tesis, gracias por su colaboración, su dedicación y su trabajo, y a nuestro asesor de tesis por sus valiosas contribuciones al desarrollo de este trabajo.

**RODRIGO LÓPEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

La culminación de mi vida universitaria tiene grandes protagonistas y seres de luz que han hecho que todo este esfuerzo valga la pena. Primero deseo agradecer a Dios quien me ha protegido y guiado a lo largo de la carrera brindándome sabiduría y asertividad en todo momento.

A mi madre, Silvia quien me motivo desde el primer día, brindándome consejos y cariño, siempre velando por mi bienestar y mi futuro. A mi padre Francisco quien me enseñó a ser un hombre decidido, mostrándome que las caídas son aprendizaje. Padres, valoro y atesoro en mi corazón todo el esfuerzo que ha significado llegar a este punto, Muchas gracias de todo corazón.

A mis hermanas Sofía y Fernanda quienes me guiaron e incentivaron, ellas han celebrado todos mis triunfos y han sido pieza fundamental de todo este esfuerzo. Muchas Gracias.

A mi novia Angélica quien era la primera en enterarse de mis preocupaciones y errores, pero nunca dudo de mi capacidad y me motivo a ser la persona que soy. Muchas gracias

A mis amigos Brian, Miguel y Alejandra quienes compartieron mis risas y mis preocupaciones. Además de apoyarme de distintas maneras para que yo lograré culminar con mis estudios. Muchas gracias

A mis compañeros de tesis, gracias por todo su apoyo y dedicación a lo largo del trabajo.

**GRACIAS TOTALES**

**JUAN TORREZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios Padre por concederme salud, fuerza y perseverancia para completar mis estudios universitarios.

Asimismo, agradezco a mis padres Marvin Sánchez y Adela de Sánchez, por apoyarme incondicionalmente en todos mis emprendimientos a lo largo de todo este proceso académico. También agradezco a mis hermanos mayores Iris Carolina, Iris Guadalupe, Rafael Eduardo, Marvin José y su esposa Claudia Magaña, por su apoyo académico y moral en mi vida estudiantil.

Agradezco a mis compañeros estudiantes Alejandra Flores y David Ramos por ayudarme a egresar en mi carrera y poder dar inicio a este trabajo de grado. También agradezco a mis compañeros de grupo de tesis por dar lo mejor en los aportes al trabajo de grado, dentro de sus capacidades.

También quiero agradecer a mis compañeros de trabajo Walter Peraza, Mauricio Fuentes y Marvin Santos, por ayudarme a cumplir con mi carga laboral al mismo tiempo que llevé mis responsabilidades con este trabajo de grado. Por otra parte, quiero agradecer por su apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo de grado al Ing. Edwin García, a la Ing. Leyla Marina Jiménez Monroy y especialmente a la Ing. Luz María Hernández.

Finalmente, agradezco a nuestro docente asesor Ing. Miguel Tomás Amaya por guiarnos en nuestra investigación para obtener resultados satisfactorios.

**ELISEO SÁNCHEZ**

# PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA PRUEBAS DE CAVITACIÓN EN BOMBAS ROTODINÁMICAS

Estudiantes: Brs. Rodrigo Fernando López Pérez <sup>1</sup>, Eliseo Andrés Sánchez Blanco <sup>2</sup>, Juan Francisco Torrez Meléndez <sup>3</sup>

Docente Asesor: Ing. Miguel Tomás Amaya Gómez <sup>4</sup>

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Universidad de El Salvador

## RESUMEN

Las empresas industriales utilizan los sistemas de bombeo para satisfacer las necesidades del abastecimiento de agua potable en cuestiones como: requerimientos de producción, saneamiento de infraestructura o uso cotidiano por parte del personal. Por lo cual, el mantenimiento de los sistemas de bombeo es de suma importancia, puesto que una falla imprevista puede desencadenar paros operativos prolongados con consecuencias económicas.

De manera general, el nivel de mantenibilidad de los sistemas de una empresa industrial depende de dos factores: la gestión de activos que maneja la gerencia y el diseño previo a la puesta en marcha del sistema; por lo cual, en ingeniería, la cavitación es uno de los fenómenos físicos que se debe evitar al momento de diseñar un sistema de bombeo, ya que consiste en la proliferación de burbujas de vapor que implosionan dentro del flujo del sistema, surgen como consecuencia de caídas de presión ocasionadas por pérdidas energéticas y resultan degradantes para los componentes en contacto.

El presente documento muestra el desarrollo de una propuesta de diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas, basado en los estándares establecidos por la norma ISO 9906.

Palabras clave: Banco de ensayos para pruebas de cavitación.

---

<sup>1</sup> E-mail: [lp16007@ues.edu.sv](mailto:lp16007@ues.edu.sv)

<sup>2</sup> E-mail: [sb13004@ues.edu.sv](mailto:sb13004@ues.edu.sv)

<sup>3</sup> E-mail: [tm17004@ues.edu.sv](mailto:tm17004@ues.edu.sv)

<sup>4</sup> E-mail: [miguel.amaya2@ues.edu.sv](mailto:miguel.amaya2@ues.edu.sv)

# ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I: ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>4</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo General.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos .....	6
1.3 Alcances .....	7
1.4 Limitaciones .....	8
1.5 Justificación .....	9
1.6 Metodología de investigación .....	9
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1 Cavitación.....	15
2.1.1 Antecedentes históricos .....	15
2.1.2 Cavitación como fenómeno físico.....	16
2.1.3 Factores que influyen en la cavitación en sistemas de bombeo.....	18
2.1.4 Medidas para evitar la cavitación en sistemas hidráulicos .....	22
2.2 Bombas hidráulicas.....	23
2.2.1 Bombas rotodinámicas .....	24
2.2.1.1 Entrada y salida de una bomba rotodinámica.....	25
2.2.1.2 Pérdidas internas de una bomba rotodinámica.....	27
2.2.1.3 Triángulos de velocidades .....	29
2.2.1.4 Altura efectiva de una bomba .....	31
2.2.1.5 Leyes de Semejanza en bombas rotodinámicas .....	31
2.2.1.6 Clasificación de las bombas rotodinámicas según su número específico de revoluciones.....	34
2.2.1.7 Clasificación de las bombas rotodinámicas según la dirección de salida del flujo.....	36
2.3 Caracterización y selección de las bombas rotodinámicas .....	38
2.3.1 Curva característica de un sistema hidráulico .....	38
2.3.2 Curva característica de una bomba.....	40
2.3.3 Curva característica de sistemas hidráulicos con arreglos de tuberías en serie .....	44
2.3.4 Curva característica de sistema de bombeo con dos tanques elevados a diferentes cotas .....	46
2.3.5 Punto de operación de una bomba.....	48

<b>2.4</b>	<b>Altura neta de succión positiva (NPSH)</b> .....	<b>53</b>
2.4.1	Antecedentes históricos .....	53
2.4.2	Altura neta de succión positiva (NPSH).....	54
2.4.3	NPSH como criterio de diseño de sistemas hidráulicos .....	55
2.4.2.1	NPSH como criterio de cota de instalación de una bomba en succión.....	55
2.4.2.2	NPSH como criterio de la cota de instalación de una bomba en carga .....	58
2.4.3	Coefficiente de cavitación $\sigma$ .....	62
<b>2.5</b>	<b>Instrumentos de medición</b> .....	<b>63</b>
2.5.1	Manómetros.....	63
2.5.2	Vacuómetros .....	65
2.5.3	Medidor de flujo o caudalímetro .....	67
2.5.4	Termómetro.....	70
<b>2.6</b>	<b>Válvulas de uso común en redes de tuberías</b> .....	<b>71</b>
2.6.1	Tipos de válvulas.....	71
<b>2.7</b>	<b>Normativa para ensayos de cavitación</b> .....	<b>76</b>
2.7.1	Tipos de bancos de ensayo y características según sus circuitos.....	76
2.7.1.1	Circuito cerrado con control por válvula.....	76
2.7.1.2	Arreglo de circuito cerrado con control de presión y temperatura.....	77
2.7.1.3	Tanque abierto con control de nivel.....	78
2.7.1.4	Tanque abierto con válvula de regulación .....	79
2.7.2	Objetivos de las pruebas NPSH. ....	79
2.7.3	Condiciones de las pruebas NPSH .....	80
2.7.4	Tipos de pruebas NPSH.....	81
2.7.4.1	Verificación de características garantizadas en un NPSHd especificado .....	81
2.7.4.2	Determinación del NPSH3.....	81
2.7.3.3	Verificación de la influencia limitada de la cavitación en el rendimiento de la bomba bajo condiciones especificadas .....	84

<b>CAPÍTULO III: DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS DE CAVITACIÓN .....</b>	<b>86</b>
<b>3.1 Consideraciones de diseño .....</b>	<b>87</b>
3.1.1 Modelo de instalación y su funcionamiento .....	87
3.1.1.1 Selección de modelo de instalación.....	89
3.1.1.2 Consideraciones para el diseño del modelo seleccionado .....	91
3.1.1.3 Ensayo de cavitación a realizar .....	94
<b>3.2 Diseño de la red de tuberías del banco.....</b>	<b>98</b>
3.2.1 Selección de la familia de bombas, el caudal y el NPSHr que servirán como referencia para el diseño del Banco de Ensayos. ....	100
3.2.2 Longitud preliminar de la tubería de succión .....	102
3.2.2.1 Sumergencia preliminar de la tubería de succión .....	104
3.2.3 Cálculo del diámetro preliminar de la tubería de succión .....	105
3.2.3.1 Cálculo de diámetro que provocará cavitación en el banco.....	106
3.2.3.2 Selección de diámetro nominal preliminar .....	110
3.2.4 Comprobación estados de cavitación para el diámetro de la red de tuberías .....	119
3.2.4.1 Lecturas de NPSHr para el rango de caudales permitido.....	120
3.2.4.2 Comprobación de ausencia de cavitación con válvula V1 completamente abierta...	121
3.2.4.3 Estimación del comportamiento del NPSHd en la entrada de la bomba bajo condiciones de cavitación.....	125
3.2.5 Selección de componentes y estimación de las dimensiones de las tuberías.....	128
3.2.5.1 Cálculo de la sumergencia definitiva del banco .....	129
3.2.5.2 Instalación de los componentes de la red de tuberías.....	131
A. Instalación de las válvulas reguladoras de caudal.....	132
B. Instalación de la válvula de pie .....	133
C. Instalación de los medidores de presión.....	136
D. Instalación de la válvula desairadora .....	143
E. Instalación del medidor de caudal .....	146
F. Instalación de la tubería de descarga .....	150
3.2.5.3 Selección de los componentes de la red de tuberías .....	153
G. Selección de las tuberías y los codos .....	153
H. Selección de componentes de las instalaciones de las válvulas .....	154
I. Selección de los componentes de las instalaciones de los medidores de presión. ....	156
J. Selección de los componentes de la instalación de la válvula desairadora. ....	164
K. Selección del Caudalímetro .....	172

L.	Selección del reductor de turbulencias .....	176
3.2.5.4	Selección del tanque de reserva.....	177
3.2.5.5	Dimensiones aproximadas de la red de tuberías .....	184
<b>3.3</b>	<b>Diseño de estructura de soporte .....</b>	<b>187</b>
3.3.1	Establecimiento de la geometría preliminar de la estructura de soporte. ....	188
3.3.2	Determinación de cargas y puntos críticos .....	190
3.3.3	Selección del perfil y análisis de esfuerzos .....	205
3.3.3.1	Simulación de cargas estáticas en software .....	208
3.3.4	Análisis de sujeciones .....	209
3.3.5	Selección de rodos .....	215
3.3.6	Geometría definitiva de la estructura de soporte .....	215
<b>3.4</b>	<b>Diseño de sistema eléctrico .....</b>	<b>217</b>
3.4.1	Diseño de circuito de fuerza y control.....	218
3.4.2	Selección de componentes del sistema eléctrico .....	224
3.4.2.1	Selección de interruptores termomagnético trifásicos. ....	224
3.4.2.2	Selección de contactor trifásico .....	225
3.4.2.3	Selección de interruptor termomagnético monofásico .....	226
3.4.2.4	Selección del tablero y el calibre de los cables de los circuitos de potencia y control. .....	227
<b>3.5</b>	<b>Detalles de instalación. ....</b>	<b>228</b>
3.5.1	Detalles en el modelado de la red de tuberías .....	230
3.5.1.1	Modificaciones en las instalaciones de la red de tuberías. ....	230
3.5.1.2	Instalación del sistema de suministro del tanque de reserva.....	236
3.5.1.3	Instalación del sistema de drenaje del tanque de reserva. ....	238
3.5.2	Modificaciones en la Estructura de soporte.....	241
3.5.2.1	Cambios en las dimensiones geométricas del marco de la estructura de soporte. ..	242
3.5.2.3	Componentes adicionales a la estructura de soporte. ....	244
3.5.3	Detalles del sistema eléctrico. ....	252
<b>3.5.4</b>	<b>Presupuesto general.....</b>	<b>255</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>260</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>264</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>265</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>271</b>
	<b>ANEXO I: ENSAYO DE CAVITACIÓN .....</b>	<b>271</b>

<b>AI.I</b>	<b>Procesos de laboratorio involucrados en el ensayo de cavitación.....</b>	<b>271</b>
<b>AI.I.I</b>	<b>Medición de la presión atmosférica.....</b>	<b>271</b>
<b>AI.I.II</b>	<b>Verificación de las propiedades físicas del agua que se utilizará durante los ensayos .....</b>	<b>272</b>
AI.I.II.I	Cálculo de densidades de partículas disueltas y de partículas libres no disueltas .....	273
<b>AI.II</b>	<b>Aplicación NPSH3.....</b>	<b>279</b>
AI.II.I	Desarrollo de la Aplicación NPSH3 .....	281
<b>AI.III</b>	<b>Guía para práctica de laboratorio de ensayo de cavitación .....</b>	<b>283</b>
<b>ANEXO II: Plan de mantenimiento .....</b>		<b>317</b>
<b>AII.I</b>	<b>Metodología a aplicar .....</b>	<b>317</b>
AII.I.I	Análisis de modos y efectos de falla.....	317
AII.I.II	Medidas preventivas de mantenimiento .....	318
<b>AII.I.III</b>	<b>Tareas de mantenimiento.....</b>	<b>318</b>
AII.I.IV	Metodología AMEF aplicada al prototipo del banco de ensayos para pruebas de cavitación .....	319
<b>Anexo III: Tablas y datos representativos.....</b>		<b>332</b>
<b>Anexo IV: Especificaciones de componentes .....</b>		<b>342</b>
<b>Anexo V: Planos de diseño .....</b>		<b>346</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de metodología de diseño.....	11
Figura 2.1: Diagrama P-v .....	17
Figura 2.2: Cavitación en una tubería con obstrucciones.....	18
Figura 2.3: Cavitación en rodete impulsor.....	19
Figura 2.4: Cavitación en sistema de tubería .....	20
Figura 2.5: Erosión en rodete de bomba rotodinámica con cavitación.....	22
Figura 2.6: Clasificación de las bombas hidráulicas según el método de impulsión .....	24
Figura 2.7: Componentes de una bomba rotodinámica.....	25
Figura 2.8: Esquema de potencias para bombas rotodinámicas.....	28
Figura 2.9: Velocidad del flujo en la entrada y la salida de rodete. ....	29
Figura 2.10: Triángulos de velocidad de una bomba rotodinámica.....	30
Figura 2.11: Triángulos de velocidades semejantes.....	32
Figura 2.12: Dimensiones de rodetes según <i>ns</i> .....	35
Figura 2.13: Bomba centrífuga.....	36
Figura 2.14: Bomba de flujo axial .....	37
Figura 2.15: Bomba de flujo mixto.....	37
Figura 2.16: Sistema hidráulico de dos tanques .....	38
Figura 2.16: Curva característica del sistema .....	40
Figura 2.17: Curvas características de una bomba sin considerar las pérdidas internas.....	42
Figura 2.18: Curvas características de bombas rotodinámicas.....	43
Figura 2.19: Sistema hidráulico con arreglo de tuberías en serie .....	44
Figura 2.20: Comportamiento de pérdidas en tuberías en serie .....	45
Figura 2.21: Curva característica de sistemas con arreglo de tuberías en serie .....	45
Figura 2.22: Sistema hidráulico con arreglo de tuberías con dos tanques elevados a diferentes cotas.....	46
Figura 2.23: Curvas características de tuberías en conectadas en paralelo .....	47
Figura 2.24: Curvas características de un sistema hidráulico con arreglo de dos tuberías .....	48
Figura 2.25: Punto de operación de una bomba.....	49
Figura 2.26: Punto de operación de una bomba.....	50
Figura 2.27: Curvas de Rendimiento y Potencia consumida de una bomba hidráulica, para rpm constante. ....	50
Figura 2.28: Punto de operación óptimo de una bomba.....	51
Figura 2.29: Punto de operación de una bomba en un sistema hidráulico con arreglo de dos tuberías .....	52

Figura 2.30: Tubería de succión en un sistema de bombeo.....	56
Figura 2.31: Curvas características de una familia de bombas .....	58
Figura 2.32: Instalación con tubería en carga .....	59
Figura 2.33: Curva NPSHr en sistemas en succión y en carga.....	61
Figura 2.34: Manómetro de tubo de Bourdon para presiones absolutas.....	64
Figura 2.35: Manómetro de tubo de Bourdon para presiones relativas .....	64
Figura 2.36: Manómetros en U de líquido para presiones relativas .....	65
Figura 2.37: Ejemplo vacuómetro efecto Bourdon.....	66
Figura 2.38: Caudalímetro de sonda.....	68
Figura 2.39: Caudalímetro electromagnético.....	69
Figura 2.40: Caudalímetro de Ultrasonido .....	69
Figura 2.41: Modelo TG54 termómetro construido bajo la norma EN13 190 .....	71
Figura 2.42: Válvula de compuerta .....	72
Figura 2.43: Válvula de mariposa.....	72
Figura 2.44: Válvula esférica .....	73
Figura 2.45: Válvulas de globo y aguja .....	73
Figura 2.46: Válvulas antirretorno .....	74
Figura 2.47: Válvula reguladora de presión .....	74
Figura 2.47: Banco de pruebas de circuito cerrado con regulación por válvula.....	77
Figura 2.48: Arreglo de circuito cerrado .....	78
Figura 2.49: Tanque abierto con control de nivel.....	78
Figura 2.50: Tanque abierto con válvula de regulación .....	79
Figura 3.1: Esquema preliminar del banco de cavitación.....	90
Figura 3.2: Gráficas NPSH3 vs Q resultantes del Ensayo NPSH3 .....	95
Figura 3.3: Curvas características de familia de bombas A1.5 X 1-7.....	101
Figura 3.4: Lectura de NPSHr para 105 gpm. Curva NPSHr vs Q de familia de bombas A1.5 X 1-7 .....	102
Figura 3.5: Medidas preliminares de la tubería de succión.....	103
Figura 3.6: Lectura de NPSHr para 100 GPM .....	114
Figura 3.7: Esquema de reductores de sección .....	116
Figura 3.8: Lecturas de factores de pérdida para reductores de sección.....	117
Figura 3.9: Rango de caudales permisibles para pruebas de cavitación.....	120
Figura 3.10: Curva NPSHd vs Q con válvula V1 abierta y sin cavitación .....	127
Figura: 3.11: Curva NPSHr vs Q bajo condiciones de cavitación.....	127
Figura 3.12: Esquema de la instalación de las válvulas de globo .....	133

Figura 3.13: Instalación de la válvula de pie.....	136
Figura 3.14: Esquema de instalación de una bomba en un banco de prueba .....	137
Figura 3.15: Esquema de la instalación de los medidores de presión.....	138
Figura 3.16: Ensamble no.1 de las instalaciones de los medidores de presión.....	141
Figura 3.17: Ensamble no.2 de las instalaciones de los medidores de presión.....	142
Figura 3.18: Instalación de la válvula desairadora.....	145
Figura 3.19: Recomendaciones para la instalación de un caudalímetro.....	146
Figura 3.20: Recomendaciones para la instalación de un caudalímetro.....	147
Figura 3.21: Recomendaciones para la instalación de un caudalímetro.....	147
Figura 3.22: Recomendaciones para la instalación de un caudalímetro.....	148
Figura 3.23: Instalación del caudalímetro en la tubería de impulsión.....	148
Figura 3.24: Instalación de un reductor de turbulencia en un tanque de reserva .....	151
Figura 3.25: Instalación de la tubería de descarga.....	152
Figura: 3.26: Gráfica de selección de diámetros nominales de válvulas desairadoras de marca VAMEX .....	166
Figura 3.27: Lectura de altura neta para 100 GPM, de bomba de 7 hp, con modelo A1.5 X 1-7.....	168
Figura: 3.28: Gráfica de selección de diámetros de venteo de válvulas desairadoras VAMEX, de modelo E20 .....	169
Figura 3.29: Instalación de la válvula desairadora.....	171
Figura 3.30: Esquema de la instalación del caudalímetro F601 .....	174
Figura 3.31: Instalación de los sensores del caudalímetro .....	175
Figura 3.32: Instalación de los sensores del caudalímetro F601 .....	175
Figura 3.33: Instalación del reductor de turbulencia en la tubería de descarga .....	177
Figura 3.34: Dimensiones aproximadas de las tuberías del banco de pruebas de cavitación .	181
Figura 3.35: Instalación del tanque de reserva.....	184
Figura 3.36: Dimensiones aproximadas de la red de tuberías del banco de pruebas .....	185
Figura 3.37: Estructura de soporte .....	190
Figura 3.38: DCL de la tubería de impulsión.....	193
Figura 3.39: DCL de la tubería de impulsión.....	195
Figura 3.40: DCL de la tubería de succión .....	198
Figura 3.41: DCL de la tubería de succión .....	199
Figura 3.42: Ubicación espacial de cargas en estructura de soporte .....	200
Figura 3.43: Plano estructural idealizado.....	202
Figura 3.44: Elemento estructural JM.....	203

Figura 3.45: Diagrama de cortante y momento flector.....	204
Figura 3.46: Análisis de cargas estáticas de la estructura.....	208
Figura 3.47: Geometría de soldadura.....	212
Figura 3.48: Estructura de soporte del banco de cavitación.....	216
Figura 3.49: Diagrama de fuerza a utilizar.....	219
Figura 3.50: Diagrama de control a utilizar.....	219
Figura 3.51: Diagrama de cableado control y potencia.....	220
Figura 3.52: Arreglo de protecciones en paralelo.....	222
Figura 3.53: Circuito integrado de fuerza y control.....	223
Figura 3.53: Esquema general del sistema eléctrico.....	228
Figura 3.54: Variación en las dimensiones en la instalación de las válvulas reguladoras.....	231
Figura 3.55: Variación en las dimensiones de la instalación de las válvulas reguladoras.....	232
Figura 3.56: Variación en las dimensiones de la instalación red de impulsión.....	233
Figura 3.57: Variación en las dimensiones de la instalación de la tubería de descarga de la red de impulsión.....	233
Figura 3.58: Variación en las dimensiones de la instalación de los medidores de presión.....	234
Figura 3.59: Especificación de las dimensiones de la instalación del tanque de reserva.....	235
Figura 3.60: Ubicación del filtro de ozono en el banco de pruebas.....	238
Figura 3.60: Esquema de la instalación del drenaje del tanque.....	238
Figura 3.61: Instalación del drenaje del tanque en el modelo de la red de tuberías.....	240
Figura 3.62: Dimensiones de la instalación del drenaje del tanque de reserva.....	241
Figura 3.63: Modificaciones en las dimensiones del marco de la estructura de soporte.....	242
Figura 3.64: Simulación de esfuerzos en el marco de la estructura de soporte.....	243
Figura 3.65: Vistas isométricas de la estructura de soporte.....	244
Figura 3.66: Distribución de espacios dentro de la estructura de soporte.....	244
Figura 3.67: División entre el tanque de reserva y el sistema eléctrico.....	245
Figura 3.68: División entre la bomba y el sistema eléctrico.....	246
Figura 3.69: Lamina de soporte para la sujeción de la bomba.....	246
Figura 3.70: Lamina de soporte para la sujeción de la bomba.....	247
Figura 3.71: Estructura de refuerzo para los soportes de la tubería de impulsión.....	249
Figura 3.72: Soportes de la manguera de drenaje.....	249
Figura 3.73: Gavetas para equipos complementarios del banco.....	250
Figura 3.74: Soportes laterales para el refuerzo de la estructura.....	251
Figura 3.75: Tomacorriente macho de alimentación del sistema eléctrico del banco.....	252
Figura 3.76: Rieles DIN 46277-3.....	253

Figura 3.77: Tornillos Phillips de cabeza plana, #8 x 1/2 in.....	253
Figura 3.78: Dimensiones del indicador visual. ....	254
Figura 3.78: Montaje de indicador visual led .....	254
Figura 3.78: Conexión de cableado indicador visual led.....	255
Figura AI.1: Paso 2 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT .....	275
Figura AI.2: Paso 3 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT .....	275
Figura AI.3: Paso 4 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT .....	276
Figura AI.4: Paso 5 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT .....	276
Figura AI.5: Paso 6 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT .....	277
Figura AI.6: Paso 7 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT .....	277
Figura AI.7: Flujograma de la Aplicación NPSH3 .....	281
Tabla AIII.12: Características de cables según la SIGET .....	339
Figura AIII.1: Factores de pérdida para reductores de sección transversal .....	340
Figura AIII.2: Temperatura media en San Salvador, año 2023 .....	340
Figura AIII.3: diagrama de moody.....	341
Figura AIV.1: Dimensiones de las válvulas de globo RED-WHITE.....	342
Figura AIV.2: Dimensiones de las válvulas de pie SIMMONS .....	342
Figura AIV.3: Dimensiones de las válvulas de esfera RED-WHITE.....	343
Figura AIV.4: Oferta de tuberías de agua potable, Amanco. ....	344
Figura AIV.5: Oferta de accesorios para tuberías de agua potable, Amanco. ....	345

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Propiedades del agua fría limpia.....	80
Tabla 2.2: Métodos de obtención del NPSH3 con tasas de flujo variables .....	83
Tabla 2.3: Métodos de obtención del NPSH3 con tasas de flujo constantes.....	84
Tabla 3.1: Características de los modelos de instalación para bancos de ensayos de cavitación .....	88
Tabla 3.2: Resultados de procesos iterativos para determinar el diámetro de la tubería .....	110
Tabla 3.3: Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 105 GPM.....	113
Tabla 3.4: Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 100 GPM.....	115
Tabla 3.5: Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 100 GPM.....	118

Tabla 3.6: Lecturas en la curva de NPSHr de familia de bombas de la serie AG- Franklin Electric .....	121
Tabla 3.7: Comprobación de condiciones libres de cavitación con válvula V1 completamente .....	123
Tabla 3.8: Comprobación de condiciones de cavitación con válvula V1 con distintas aberturas .....	125
Tabla 3.9: Figuras representativas de los componentes de la red de tuberías .....	131
Tabla 3.10: Componentes de las instalaciones de las válvulas reguladoras .....	132
Tabla 3.11: Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de succión con 100 GPM y válvula de pie de 2 in .....	135
Tabla 3.12: Dimensiones de los componentes de instalaciones de los medidores de presión	141
Tabla 3.13: Métodos de reducción de turbulencias en salida de tuberías de descarga .....	150
Tabla 3.14: Selección de tubería y codos .....	154
Tabla 3.15: Selección de los componentes de las instalaciones de las válvulas.....	155
Tabla 3.16: Selección del manómetro para la tubería de impulsión .....	156
Tabla 3.17: Selección del vacuómetro para la tubería de succión.....	157
Tabla 3.18: Componentes del arreglo no.4 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión .....	159
Tabla 3.19: Componentes del arreglo no.2 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión .....	160
Tabla 3.20: Componentes del arreglo no.3 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión .....	161
Tabla 3.21: Componentes del arreglo no.4 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión.....	162
Tabla 3.22: Componentes del Ensamble 2 de la instalación de los medidores de presión.....	163
Tabla 3.23: Especificaciones de la válvula desairadora seleccionada.....	170
Tabla 3.24: Componentes seleccionados para la instalación de la válvula desairadora.....	170
Tabla 3.25: Ventajas y desventajas de los tipos de caudalímetros .....	172
Tabla 3.26: Datos técnicos del caudalímetro seleccionado .....	173
Tabla 3.27: Especificaciones del reductor de turbulencia seleccionado .....	176
Tabla 3.28: Ventajas y desventajas de los distintos tipos de tanques de almacenamiento .....	177
Tabla 3.29: Características técnicas del tanque seleccionado .....	183
Tabla 3.30: Ventajas y desventajas de los tubos estructurales .....	188
Tabla 3.31: Cuadro comparativo entre mecanismos de sujeción.....	209
Tabla 3.32: Geometría del tubo metálico de chapa 16 .....	210

Tabla 3.33 Recomendaciones de electrodo .....	211
Tabla 3.34: Especificaciones técnicas de los rodos seleccionados.....	215
Tabla 3.35: Componentes del Sistema de Control Eléctrico. ....	218
Tabla 3.36: Componentes del sistema eléctrico.....	223
Tabla 3.37: Selección de protección de sistema eléctrico. ....	225
Tabla 3.38: Ejemplo grafico de contactor a utilizar LC1D25F7 .....	226
Tabla 3.39: Ejemplo grafico de interruptor termomagnético monofásico.....	226
Tabla 3.40: Cables a utilizar en la instalación eléctrica. ....	227
Tabla 3.41 Dimensionamiento de tablero.....	227
Tabla 3.42: Selección del sistema de purificación de agua con ozono.....	237
Tabla 3.43: Componentes del sistema de drenaje del tanque de reserva.....	240
Tabla 3.44: Costos unitarios de partidas de los componentes de la red de tuberías del banco de pruebas .....	256
Tabla 3.45: Costos unitarios de partidas de los Componentes de la estructura de soporte del banco de pruebas.....	257
Tabla 3.46: Costos unitarios de partidas de los componentes del sistema eléctrico del banco de pruebas .....	257
Tabla 3.47: Costos unitarios de partidas de los instrumentos de laboratorio e insumos para las pruebas de cavitación.....	258
Tabla 3.48: Costos unitarios de partidas de mano de obra para la fabricación del banco de pruebas .....	258
Tabla 3.49: Costos unitarios de partidas de mano de obra para el mantenimiento del banco de pruebas .....	259
Tabla 3.50: Costos totales del banco de pruebas de cavitación.....	259
Tabla AI.1: Especificaciones técnicas de Barómetro seleccionado .....	272
Tabla AI.2: Propiedades del agua fría limpia .....	272
Tabla AI.3: Instrumentación para determinación de densidades SST y SSD .....	274
Tabla AI.4: Recursos mínimos para que una PC pueda correr la aplicación NPSH3.....	280
Tabla AI.5: Procedimientos lógicos en la programación de la Aplicación NPSH3.....	282
Tabla AII.1: AMEF Sistema hidráulico .....	321
Tabla AII.2: AMEF Sistema estructural.....	323
Tabla AII.3: AMEF Sistema eléctrico.....	324
Tabla AII.4: Modos de falla, categoría de riesgo y selección de tareas.....	325
Tabla AII.5: Propuesta de plan de mantenimiento.....	329
Tabla AI.1.1: Dimensiones de la bomba de referencia y características de sus motores .....	332

<b>Tabla AIII.2: Velocidades flujo máximas recomendadas .....</b>	<b>333</b>
<b>Tabla AIII.3: TABLA 11-6 de coeficientes de pérdidas para válvulas de pie .....</b>	<b>333</b>
<b>Tabla AIII.4: “Tabla 6.2” Coeficientes representativos de pérdidas de cabeza, K, para diferentes accesorios .....</b>	<b>334</b>
<b>Tabla AIII.5: Tabla 8-4 de factores K de pérdidas representativos para accesorios de tuberías .....</b>	<b>334</b>
<b>Tabla AIII.6: Tabla de reacciones para viga biempotrada con carga repartida.....</b>	<b>335</b>
<b>Tabla AIII.7: Recomendaciones generales de factores de seguridad.....</b>	<b>335</b>
<b>Tabla AIII.8: Especificaciones de tuberías de PVC.....</b>	<b>336</b>
<b>Tabla AIII.9: Propiedades flexionantes para filetes de soldadura .....</b>	<b>337</b>
<b>Tabla AIII.10: Propiedades mínimas del metal de aporte en soldaduras .....</b>	<b>337</b>
<b>Tabla AIII.11: Especificaciones de tuberías estructurales cuadradas.....</b>	<b>338</b>
<b>Tabla AIII.13 Límites permisibles de características físicas y organolépticas del agua potable .....</b>	<b>339</b>

## **INTRODUCCIÓN**

El presente documento consiste en el desarrollo de una propuesta de diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas, la cual se ha efectuado en 3 capítulos que presentan el siguiente contenido informativo:

- **Capítulo I: Análisis y planteamiento del problema**

En este capítulo se describen las características de la propuesta de diseño del banco de pruebas; asimismo se presentan los objetivos, alcances y las limitaciones que direccionarán la investigación teórica junto con ejecución del diseño; también se incluye la justificación del tema y la metodología utilizada para su desarrollo.

- **Capítulo II: Marco teórico**

Este capítulo muestra una recopilación bibliográfica sobre la teoría involucrada dentro del diseño del banco de pruebas, enfocándose principalmente en temas de mecánica de fluidos relacionados con: el fenómeno de cavitación, tipos de bombas hidráulicas, curvas características de sistemas hidráulicos, curvas características de bombas, accesorios de tuberías, instrumentación de medición de variables físicas, etc. Asimismo, se incluye un breve resumen sobre el contenido de la norma internacional bajo la cual se rige la propuesta de diseño del banco.

- **Capítulo III: Diseño del banco de pruebas**

En lo que respecta a este capítulo, contiene el desarrollo del diseño del banco de pruebas, el cual se divide en cinco etapas, iniciando con el diseño de la red de tuberías del banco; luego procede con el diseño de la estructura de soporte del prototipo completo; posteriormente continua con

el diseño del sistema eléctrico para el abastecimiento energético del banco; después continua con una sección de detalles de instalación, la cual describe cuestiones específicas que no fueron contempladas durante las etapas anteriores y que se toman en cuenta principalmente para el desarrollo de los planos de diseño; finalmente, el capítulo concluye con la quinta sección que contiene el desarrollo del presupuesto general de la fabricación y mantenimiento del banco de pruebas.

Cabe destacar que en la etapa de los detalles de instalación se hace referencia en diversas ocasiones a los anexos I y II de la investigación, los cuales contienen correspondientemente el ensayo de cavitación que se pretende realizar con el equipo y el plan de mantenimiento.

Con respecto al anexo I, el desarrollo del ensayo se presenta en 3 apartados, iniciando con la presentación de los procesos de laboratorio que deberán efectuarse durante los ensayos de cavitación; luego continua con el desarrollo y funcionamiento de una aplicación que auxiliará a los laboratoristas con los cálculos involucrados; finalmente, se muestra una guía de laboratorio práctico con los pasos que se deben seguir para realizar el ensayo. Asimismo, en cuanto al anexo II, en este se define el plan de mantenimiento que garantizará la disponibilidad del banco cuando sea requerido; en este apartado se definen todas las tareas de mantenimiento y la periodicidad con la que deberán efectuarse.

Además de los tres capítulos mencionados anteriormente, el documento también cuenta con los anexos III, IV y V, los cuales contienen correspondientemente los datos representativos para los cálculos de diseño, tablas con especificaciones técnicas de los componentes seleccionados y los planos de diseño del prototipo final de banco de pruebas.

# **CAPÍTULO I: ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **CAPITULO I: ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La formación en ingeniería mecánica requiere de la aplicación práctica de los conceptos teóricos impartidos en el área de la mecánica de fluidos y las máquinas hidráulicas. En este sentido, el estudio de la cavitación en las bombas rotodinámicas es fundamental para el diseño, operación y mantenimiento de sistemas fluido mecánicos.

La cavitación consiste en el cambio de estado líquido a gas que un flujo determinado experimenta por caídas de presión que disminuyen la presión de flujo a niveles inferiores a la presión de vapor, para la temperatura del flujo; dichas caídas de presión están vinculadas con las pérdidas energéticas. De manera que la cavitación se manifiesta en la proliferación de burbujas de vapor en zonas de baja presión, las cuales implosionan nocivamente cuando alcanzan zonas de alta presión, ocasionando daños graves en los elementos que interactúan con el flujo.

En el caso de las bombas rotodinámicas, la cavitación se presenta en la entrada por las presiones de succión, consecutivamente las burbujas de vapor implosionan al entrar en contacto con los álabes del rodete y dañan su superficie por erosión, afectando directamente el rendimiento general de la bomba y descomponiendo sus elementos internos.

El NPSH es el parámetro internacional relacionado con la prevención de este fenómeno en las bombas rotodinámicas y su comportamiento se determina a través de pruebas de laboratorio en bancos de ensayos.

## 1.1 Planteamiento del problema

El presente documento comprende las distintas etapas del diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas, el cual cumple con las siguientes características:

- Posibilidad de controlar las diferentes variables involucradas en el fenómeno de cavitación: presión en la entrada de la bomba, presión en la salida de la bomba ensayada y caudal que fluye por el sistema.
- Instrumentación adecuada para medición de variables de operación del banco, entre éstos se incluyen manómetros, vacuómetros, termómetros y caudalímetros.
- Carácter didáctico, puesto que servirá para incluirlo en gestiones educativas relacionadas con laboratorios prácticos sobre la cavitación en bombas rotodinámicas.
- Permite obtener la información necesaria para graficar la curva NPSHr vs Q, la cual se utiliza en diseños de sistemas hidráulicos de abastecimiento de agua.
- Alto grado de mantenibilidad.
- Versatilidad para instalar bombas cuyas magnitudes de potencia nominal se encuentren dentro de un rango preestablecido.
- Capacidad para realizar ensayos que cumplan con los requerimientos indicados por normas internacionales.
- Para que el diseño del banco se ejecutase correctamente, se incluye una investigación bibliográfica sobre la teoría relacionada con el fenómeno de cavitación, los cálculos necesarios para el diseño y los planos de diseño

mecánico, los cuales se realizaron con softwares de diseño tridimensional para el modelado de piezas mecánicas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Elaborar una propuesta de diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar las variables pertinentes al fenómeno de cavitación.
- Identificar las consideraciones a tomar en cuenta para el diseño de los sistemas que componen el banco de ensayos para pruebas de cavitación.
- Seleccionar los componentes pertinentes que integrarán los distintos sistemas del banco de ensayos.
- Seleccionar la instrumentación adecuada para la toma de datos de las distintas variables involucradas en el fenómeno de cavitación durante los ensayos de laboratorio.
- Elaborar una guía de laboratorio para los ensayos de cavitación.
- Elaborar los planos de diseño mecánico, los modelos 3D de las piezas y el ensamblaje del banco de ensayos en un software CAD.
- Elaborar un plan de mantenimiento que garantice la disponibilidad del equipo cuando sea requerido.
- Elaborar un presupuesto general de la fabricación y mantenimiento del banco de ensayos.

### **1.3 Alcances**

La formulación de la propuesta de diseño del banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas involucra los siguientes alcances:

- El diseño del banco de ensayos deberá cumplir con normativas internacionales.
- El diseño del banco garantizará que la cavitación pueda presentarse en bombas rotodinámicas cuya potencia nominal se encuentre dentro de un rango preestablecido.
- El diseño de la estructura de soporte de todo el equipo contará con la geometría adecuada para la instalación de un sistema de suministro y drenaje de agua para el tanque de reserva.
- El diseño del banco incluirá un sistema de medición que garantice la obtención correcta de las variables involucradas en los ensayos de cavitación.
- Se dispondrá de un plan de mantenimiento que asegure que el banco opere bajo condiciones óptimas para obtener mediciones confiables, contando con un plan de verificación y calibración. Este plan garantizará la mitigación de fugas y buen estado de componentes; además tendrá los apartados de tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, junto con sus frecuencias correspondientes.
- Se contará con planos de diseño mecánico, dentro de los cuales se detallarán puntos como: caracterización de los componentes del banco, metodología de sujeción del banco, uniones entre accesorios del banco y dimensionamiento total de la geometría del banco.

- Se dispondrá de guías para incluir laboratorios prácticos, sobre ensayos en cavitación en bombas rotodinámicas, en planes de estudio de asignaturas relacionadas con el área de sistemas.
- Se dispondrá de un plan de mantenimiento para garantizar la operación correcta del banco de ensayos cuando sea requerido.
- Se dispondrá de un presupuesto detallado para la ejecución de la construcción del banco de ensayos, en donde los precios cotizados incluirán IVA y además se incluirá la mano de obra por hora de trabajo.

#### **1.4 Limitaciones**

La elaboración de la propuesta de diseño del banco implica las siguientes limitaciones para poder realizar la propuesta de diseño del banco de ensayos:

- Las curvas de NPSHr vs Q que se utilizarán como referencia para el diseño del banco se obtendrán a partir de catálogos de bombas publicados por distribuidoras certificadas.
- La geometría final del diseño del banco de ensayos se deberá adecuar al espacio disponible para su instalación en el local destino de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.
- Los componentes seleccionados para el diseño del banco se limitarán a la disponibilidad en el mercado local e internacional.
- El banco de ensayos no contará con la instrumentación necesaria para graficar NPSHr vs Q, sino que se limitará a la obtención de datos de las variables que servirán para graficar la curva NPSHr vs Q de la bomba ensayada; es decir, el ploteo de dicha curva no será un proceso automatizado incorporado en el banco.

## **1.5 Justificación**

La formación académica de cualquier ingeniería implica la realización de laboratorios prácticos en las materias estudiadas, puesto que la transición de la teoría a la práctica es primordial para fortalecer los conocimientos adquiridos para la resolución de problemas que se puedan presentar durante el futuro ejercicio profesional de los estudiantes.

Actualmente, en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, el fenómeno de cavitación es estudiado en las asignaturas de Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas, por lo cual, se considera que una propuesta de diseño de un banco de ensayos de cavitación podría impulsar un proyecto futuro que consistiría en su construcción; en consecuencia, con la inclusión de este equipo didáctico de laboratorio en el desarrollo de las materias mencionadas, la Escuela de Ingeniería mecánica obtendría un recurso más apropiado para potenciar en los estudiantes las competencias referentes al fenómeno de cavitación y su efecto en las bombas rotodinámicas.

## **1.6 Metodología de investigación**

Debido a que el proyecto consiste en el desarrollo de una propuesta de diseño de un banco de ensayos, la metodología de investigación a utilizar debe estar encaminada al diseño de prototipos; para tal efecto, el Método generalizado en el proceso de diseño se adapta perfectamente a esta situación, ya que permite partir de una necesidad y aplicar principios teóricos de forma práctica en la resolución de problemas concretos.

Esta metodología de diseño incluye 4 etapas básicas, las cuáles son las siguientes (Gamarra, 2013):

- Fase I de información (Comprensión de la solicitud): Esta primera etapa consiste en comprender el problema definiendo las características del producto a diseñar, restricciones y recursos disponibles (tecnología, mano de obra, tiempos, costos, plazos, etc.).
- Fase II de creación (Conceptos de la solución): Esta etapa permite obtener los conceptos de ingeniería que se empleará en la solución y el diseño cualitativo del producto, es decir contar con un bosquejo de la solución completa.
- Fase III de desarrollo (Elaboración del proyecto): Al finalizar esta etapa ya se habrán hecho todos los cálculos del diseño, se contará con un plano de ensamble y un listado de todas las piezas.
- Fase IV de elaboración de ingeniería de detalle (Elaboración de detalles): Es la etapa final donde se obtendrán los planos para la fabricación y montaje de la máquina, así como con todos los cálculos documentados, el plan de mantenimiento y el presupuesto de fabricación.

Tomando en cuenta la propuesta del temario expuesto en la introducción de documento, la fase I se abarca en el presente capítulo; la fase II se desarrolla en el capítulo II del marco teórico; la fase III y IV se contemplan dentro del capítulo III, que incluye todo el proceso de diseño del banco de pruebas junto con su presupuesto general; asimismo, en este mismo capítulo se hace referencia al anexo I del presente documento, en donde se presenta el desarrollo la guía de laboratorio práctico que se pretende llevar a cabo con el banco de pruebas; por otra parte, también se hace referencia al anexo II donde se presenta el plan de mantenimiento que garantizará la disponibilidad de todo el equipo. En la figura 1.1 se muestra un flujograma de la metodología mencionada anteriormente.

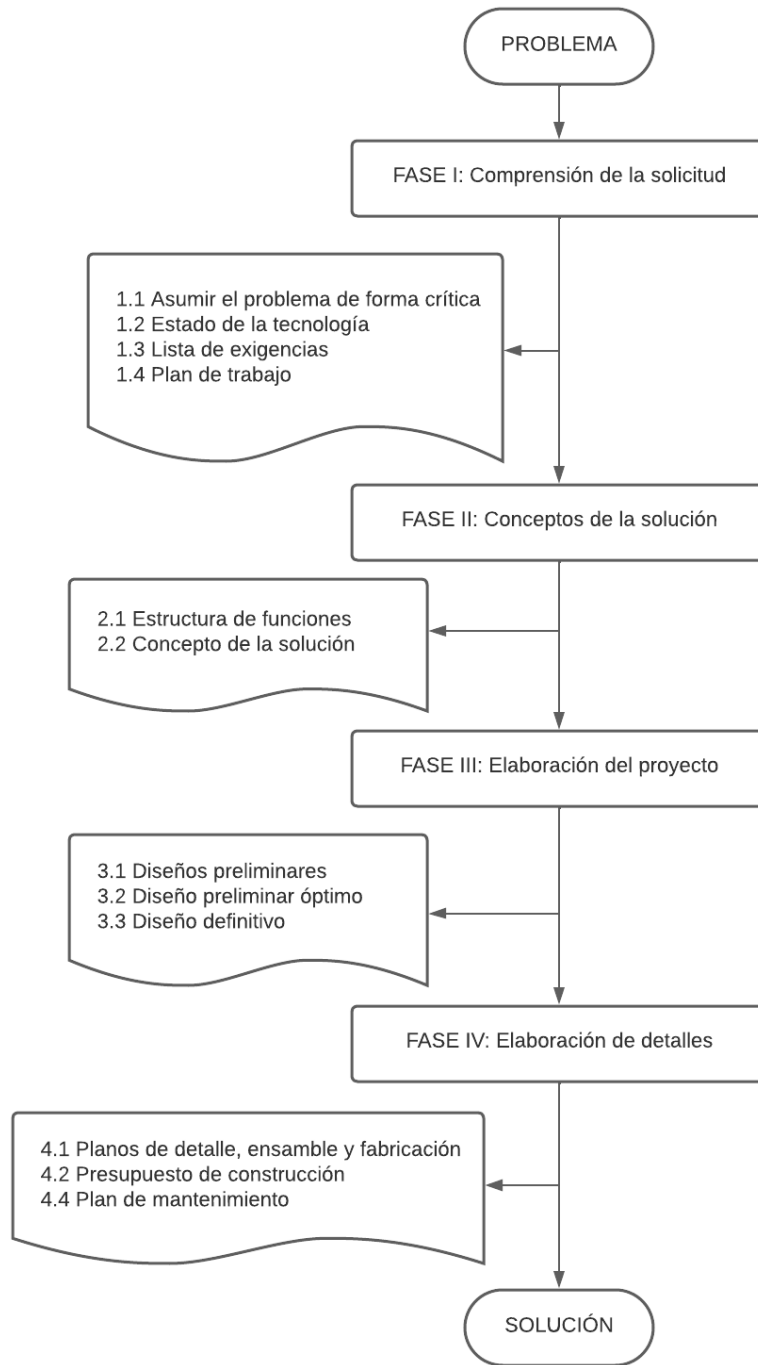


Figura 1.1: Diagrama de metodología de diseño

Fuente: Gamarra, B. Métodos de diseño en ingeniería mecánica. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ. Lima, Perú.

La metodología del diseño se desarrollará con las actividades que se detallan a continuación:

A. Fase I: Comprensión de la solicitud

- a. Planteamiento del problema, partiendo de la necesidad que existe en la escuela de Ingeniería Mecánica de un banco de ensayos para formar a los estudiantes en distintas asignaturas.
- b. Definición de los requerimientos del proyecto a partir de las necesidades identificadas en la escuela de ingeniería mecánica para la formación de estudiantes, y el cumplimiento de la normativa.
- c. Planteamiento del plan de desarrollo del proyecto de diseño.

B. Fase II: Conceptos de la solución

- a. Investigación bibliográfica de la temática necesaria para desarrollar el tema (cavitación, bombas hidráulicas, bombas rotodinámicas, NPSH, sistemas de bombeo, normativa, entre otros)
- b. Investigación bibliográfica de los modelos de bancos de ensayo existentes, descripción de componentes y funcionamiento de cada uno de ellos.
- c. Selección a partir de distintos criterios el tipo de banco de ensayo a desarrollar.
- d. Investigación de software CAD y formación para su uso.

C. FASE III: Elaboración de proyecto

- a. Definición de variables de diseño; desarrollo de los cálculos involucrados en el diseño del banco de ensayos; caracterización

de componentes; selección de tuberías, accesorios, componentes e instrumentación de medición.

- b. Procesos iterativos de mejoras y correcciones hasta desarrollar el diseño definitivo.

#### D. FASE IV: Elaboración de detalle

- a. Elaboración de modelos en software de diseño CAD.
- b. Elaboración de planos de detalle y plano de ensamblaje del banco de ensayos.
- c. Desarrollo de guías de laboratorios prácticos.
- d. Desarrollo del plan de mantenimiento.
- e. Elaboración del presupuesto.

# **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Cavitación**

#### **2.1.1 Antecedentes históricos**

El término de cavitación fue introducido por primera vez por el ingeniero británico Robert Edmund Froude, durante la primera década del siglo XX, para indicar el cambio de fase que experimenta un flujo líquido por reducciones repentinas de presión que surgen como consecuencia de interacciones dinámicas con el medio del flujo; asimismo, la cavitación se relacionó con las transferencias de calor hacia el flujo que provocarían que éste alcanzara su temperatura de vapor. En ambos casos ocurre un cambio de fase debido a la presencia de factores externos que provocan que la presión del flujo se reduzca a valores menores que la presión de vapor (The Shipyard, 2020). Etimológicamente, la palabra “cavitación” está formulada con raíces latinas cuyo significado sería “formación de cavidades en un tejido”; por lo tanto, el término se asoció con el cambio de fase de líquido a vapor, porque se forman cavidades de vapor entre las porciones líquidas, en donde el volumen específico es mucho mayor dentro del flujo (Julián Pérez Porto, 2018).

En 1917, el físico británico Lord Rayleigh extendió los estudios publicando un modelo matemático sobre la cavitación en fluidos incompresibles. Desde el punto de vista físico, la cavitación representa un fenómeno complejo porque involucra simultáneamente interacciones dinámicas y termodinámicas entre dos fases presentes en un flujo, las cuales son provocadas por el contacto directo entre el líquido en movimiento y la red que lo conduce.

Por lo cual, durante el siglo XX y lo que va del siglo XXI, la cavitación ha sido un tema de estudio en numerosas ramas de la ingeniería, principalmente, en las

que se relacionan con las máquinas hidráulicas, en donde se han aplicado numerosos experimentos para poder desarrollar teoremas que ayuden a predecir el comportamiento de las maquinarias y sistemas hidráulicos cuando se presenta el fenómeno en cuestión. En consecuencia, con el paso del tiempo los especialistas han profundizado en aspectos específicos sobre la cavitación en convenios investigativos, presentando sus resultados en diversos congresos internacionales y publicaciones tales como:

- Publicaciones anuales de la revista “Annual Reveiw of Fluid Mechanics” (Reseña anual de la mecánica de fluidos).
- Conferencias y estudios de la “Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidroambiental” (IAHR, por sus siglas en inglés).
- Sesiones anuales del “Foro sobre Cavitación y Flujo con múltiples fases”, impartido por la Asociación Americana de Ingeniería Mecánica (ASME, por sus siglas en inglés).

### **2.1.2 Cavitación como fenómeno físico**

La cavitación es un fenómeno que hace referencia a las burbujas de vapor que se presentan en un fluido que circula a través de una tubería, accesorio o máquina hidráulica, cuando la presión en alguna zona de corriente descienda hasta un valor igual o menor que la presión de saturación del fluido.

La presión de saturación de un fluido es el punto exacto en el que existe un cambio de fase para una temperatura constante; para conocer este punto exacto se ha experimentado a lo largo de los años dando como resultado diagramas característicos para cada fluido. A continuación, se muestra un diagrama P-V de una sustancia pura para ejemplificar el comportamiento del fluido.

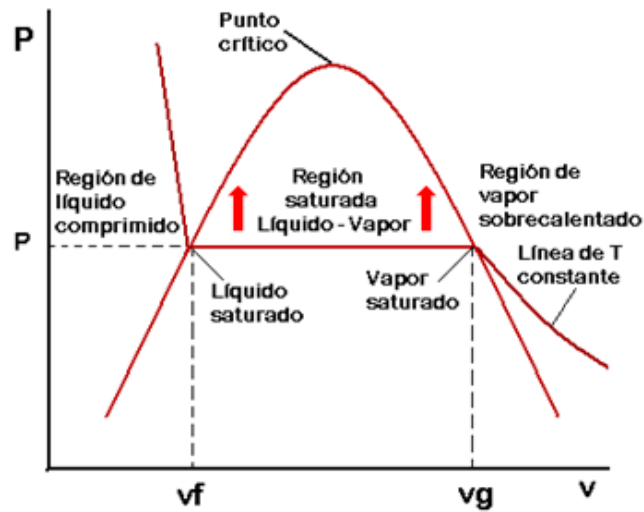


Figura 2.1: Diagrama P-v

Fuente: <https://www.thefinitelement.com/diagramas-de-propiedades>

En la figura 2.1 se puede observar una línea isoterma que define los estados de una sustancia pura a una temperatura constante. El conjunto de todas las isothermas posibles forma la línea sólida que marca los cambios de estado en las regiones mostradas en el diagrama, las flechas rojas indican el sentido en el cual ocurre el aumento de temperatura.

Es importante enfatizar que el diagrama demuestra que, para una temperatura constante, el descenso en la presión absoluta implicará un incremento en el volumen específico, lo cual produce los distintos cambios de fase, ya sea de líquido comprimido a mezcla o de mezcla a vapor sobrecalentado. Asimismo, considerando el comportamiento de una de las isothermas en el diagrama, se establece que todo cambio en la fracción líquido-vapor, dentro de la zona de mezcla saturada, ocurre a presión constante. A este nivel de presión se le conoce como “presión de saturación” (Çengel, Termodinámica, 2015).

Por lo tanto, retomando las condiciones anteriormente enunciadas, podemos concluir que el fenómeno de cavitación ocurre en el cambio de fase de líquido comprimido a mezcla líquido-vapor, manifestándose a una temperatura y presión

constante; es por este motivo que la cavitación se relaciona bastante con las caídas de presión que resultan de las pérdidas energéticas en los sistemas hidráulicos. En la sección 2.1.3 se tratará con mayor detalle los factores que influyen en el fenómeno en cuestión y en la figura 2.2 se presenta un esquema de las burbujas de cavitación que se pueden presentar en una tubería con obstrucciones que dificultan el paso de un caudal:

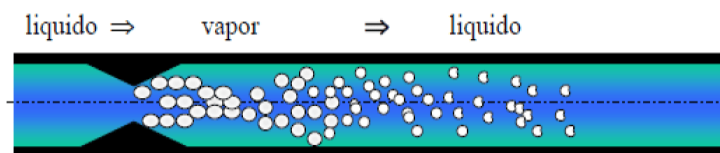


Figura 2.2: Cavitación en una tubería con obstrucciones

Fuente: <https://www.ms-ingenieria.com.mx/ingenieria-mecanica/el-fenomeno-fisico-de-la-cavitacion/>

### 2.1.3 Factores que influyen en la cavitación en sistemas de bombeo

La cavitación no es un fenómeno exclusivo de las bombas, ya que únicamente depende de características intrínsecas del fluido, así que puede presentarse en cualquier zona del sistema hidráulico que cumpla con un decremento de presión. Algunos de los factores que influyen en presencia de cavitación en un sistema hidráulico son los siguientes:

#### a) Etapa de succión dentro de la instalación de una bomba

Normalmente la cavitación ocurre en las bombas en la sección de su entrada, donde el líquido se acelera hacia el impulsor. Se ha comprobado que a mayor altura de instalación con respecto al nivel de la superficie de la reserva, la bomba aumentará la presión de succión, corriendo el riesgo de alcanzar la presión de saturación y provocar la cavitación. Asimismo, los reductores concéntricos en la entrada de la bomba ocasionan un estrangulamiento del flujo que pueden contribuir al incremento de burbujas de

vapor. Los efectos inmediatos son pérdidas de eficiencia y erosión del impulsor por el contacto con las burbujas de vapor, tal y como se muestra en la figura 2.3 (Juan, 2018).

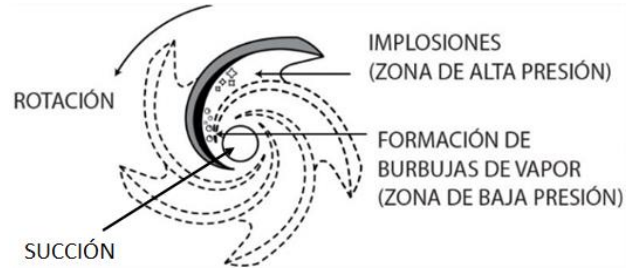


Figura 2.3: Cavitación en rodete impulsor

Fuente: <https://0grados.com/cavitacion-de-bomba-centrifuga/>

#### b) Condiciones de operación de una bomba

La cavitación está asociada con las condiciones de operación de una de bomba: a mayor velocidad específica, mayor riesgo a cavitación. Si el caudal de trabajo es mayor que el diseñado, el riesgo a cavitación aumenta. Ambos factores son directamente proporcionales y están ligados a la cavitación con el coeficiente de cavitación, el cual se explica con mayor detalle en la sección 2.4.3.

#### c) Diseño y montaje de un sistema hidráulico (Llord, 2012)

Otro de los factores que pueden propiciar la cavitación en un sistema hidráulico es el diseño incorrecto de sus redes de tuberías, pues una de las ubicaciones donde pueden ocurrir caídas de presión es en los puntos altos de la red de conducción, ya que se debe procurar que la ubicación de estos puntos no supere la línea piezométrica del sistema, la cual se traza con todas las alturas piezométricas que resultan de sumar la energía de presión y la energía potencial en las distintas ubicaciones de la red de tuberías:

$$\text{Altura Piezométrica} = P/\gamma + Z \quad (2.1)$$

Cuando la traza de la tubería queda por encima de la línea piezométrica de la conducción, se alcanzan presiones relativas negativas. Es necesario evaluar la presión en la conducción en estos puntos, puesto que podría alcanzarse la presión de vapor y, por tanto, desencadenarse la cavitación; tal y como sucede en la figura 2.4, donde se muestran dos sistemas de drenaje entre los tanques 1 y 2, las tuberías se representan con las líneas azules y siguen el relieve geográfico que existe entre los dos tanques; entonces, se señalan las siguientes observaciones:

- En cuanto al primer sistema, la ubicación del punto alto PA-1 no supera la línea de la altura piezométrica de color verde, por lo cual no hay riesgo de una caída de presión que provoque la cavitación.
- Por el contrario, en el segundo sistema el punto PA-2 supera la línea de altura piezométrica de color rojo, por lo cual la zona de color rojo indica las ubicaciones que la tubería no debería alcanzar ya que puede presentar cavitación.

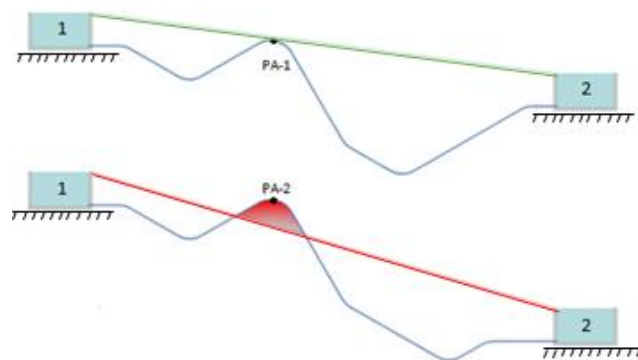


Figura 2.4: Cavitación en sistema de tubería

Fuente: <https://amusementlogic.es/articulos/la-cavitacion-en-redes-de-tuberias>

**d) Deformaciones por desgaste en los accesorios (Llord, 2012)**

Este tipo de deficiencias en los accesorios comúnmente ocurren por falta mantenimiento e inspecciones al sistema completo. Esto propicia la cavitación

debido a que las deformaciones en la geometría de los accesorios provocan que se pierda demasiada energía de flujo, lo cual se traduce en caídas de presión y dando como consecuencia un sobre esfuerzo de la bomba, puesto que se ve obligada a operar bajo condiciones fuera de diseño para abastecer las demandas de caudal.

**e)** Discrepancias entre las magnitudes teóricas y reales de las propiedades físicas del fluido de trabajo de un sistema hidráulico.

Esto puede presentarse durante la etapa de diseño de un sistema hidráulico, ya que se pueden tomar consideraciones equivocadas en cuanto a las magnitudes de propiedades como temperatura del fluido o la presión atmosférica que lo rodea; ya que el sistema hidráulico se diseñaría tomando en cuenta distintas presiones de saturación y puede darse el caso de que durante el desarrollo del diseño del sistema, el fluido no cavite, pero sí lo haga dentro del sistema hidráulico construido.

Estos factores inciden en la cavitación y sirven para desarrollar criterios para determinar si un sistema hidráulico tenderá a cavitarse. Si en la práctica con un sistema determinado se encuentran al menos tres de las condiciones descritas en los factores anteriores, es probable que dicho sistema esté operando con cavitación. Asimismo, la cavitación también se manifiesta de manera agresiva dejando consecuencias a su paso, algunos de sus síntomas y daños son los siguientes:

- Fluctuaciones de presión que ocasionan vibraciones.
- Reducciones en la eficiencia general del sistema hidráulico.
- Aumento en el consumo energético necesario para impulsar el flujo.
- Daños severos por erosión en los componentes de los equipos.

- Paros de operación imprevistos que ocasionan retrasos en cronogramas laborales, los cuales se traducen en pérdidas económicas que implican: reparaciones o sustituciones de equipos, pagos de horas extra a operarios de mantenimiento.

En la figura 2.5 se muestra los daños por erosión que produce la cavitación en el rodete de una bomba rotodinámica:



*Figura 2.5: Erosión en rodete de bomba rotodinámica con cavitación*

*Fuente: <https://www.debem.com/es/la-cavitacion-en-las-bombas-centrifugas/>*

#### **2.1.4 Medidas para evitar la cavitación en sistemas hidráulicos**

La presencia de cavitación en la operación de un sistema hidráulico produce muchas fluctuaciones en las presiones y en los caudales, lo cual normalmente resulta principalmente en el aumento excesivo de vibraciones que degrada la integridad de los componentes del sistema. Por tal motivo, los planes de mantenimiento de los sistemas siempre deben incluir peritajes programados de ruido y de vibraciones, pues ésta es una de las medidas más efectivas para determinar si hay presencia de cavitación dentro de los componentes de un sistema (Servipresión, s.f.).

Asimismo, algunas recomendaciones extras para mitigar el riesgo de cavitación en un sistema hidráulico son las siguientes:

- En el caso de las tuberías de succión, evitar superar la cota de instalación permitida entre la reserva del fluido de trabajo y la entrada de la bomba; asimismo, en dicho ducto, se debe utilizar la mínima cantidad de accesorios que puedan generar caídas de presión que impulsen la cavitación.
- Instalar válvulas de retención en la tubería de succión para mantener el cebado de las bombas; de esta manera se garantiza que se evitarán los espacios vacíos e ingresos de aire durante el arranque de los tiempos de operación.
- Mantenimiento de la tubería de succión para verificar la ausencia de obstrucciones
- En las instalaciones de las bombas, procurar que el diámetro de la tubería de succión sea mayor que el de la tubería de descarga.
- Se recomienda el uso de válvulas desairadoras en la tubería de succión si los puntos altos (que superan la altura piezométrica), son inevitables.

## **2.2 Bombas hidráulicas**

Las bombas hidráulicas son máquinas que intercambian la energía mecánica proveniente de un motor en energía de flujo a través de un elemento impulsor. Se definen como máquinas hidráulicas porque el fluido de trabajo se mantiene constante durante los tiempos de operación. Por otra parte, las bombas hidráulicas se clasifican en dos categorías según el método de impulsión del flujo: las bombas de desplazamiento positivo y las bombas rotodinámicas (Ingeniería Mecánica y Mas, 2018).

En el esquema de la figura 2.6 se muestra una clasificación de las bombas rotodinámicas:

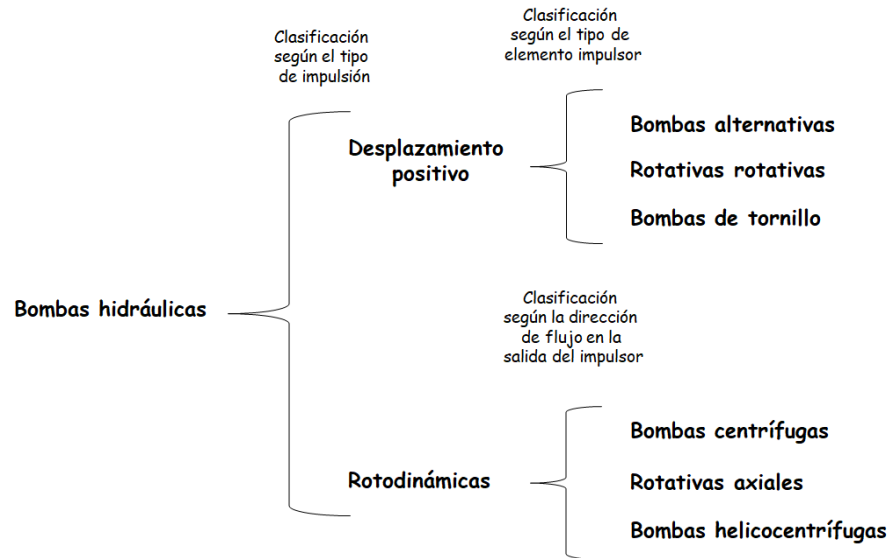


Figura 2.6: Clasificación de las bombas hidráulicas según el método de impulsión

Fuente propia

### 2.2.1 Bombas rotodinámicas

En el caso de este tipo de bombas la energía se transmite de forma continua al fluido en movimiento a partir de la energía cinética con la cual gira un impulsor rotativo, el cual puede variar entre un rodete, una propela o un rotor. Normalmente son utilizadas en aplicaciones donde se requiere aumentar la magnitud de un caudal dentro de un sistema hidráulico. A diferencia de las bombas de desplazamiento positivo, las rotodinámicas se clasifican como turbomáquinas porque el intercambio energético siempre se da de manera rotativa y los cambios en la dirección y magnitud de la velocidad del fluido juegan un papel esencial en el aumento energético del caudal.

### 2.2.1.1 Entrada y salida de una bomba rotodinámica

En la figura 2.7 se muestra un esquema general con los componentes que toda bomba rotodinámica posee:

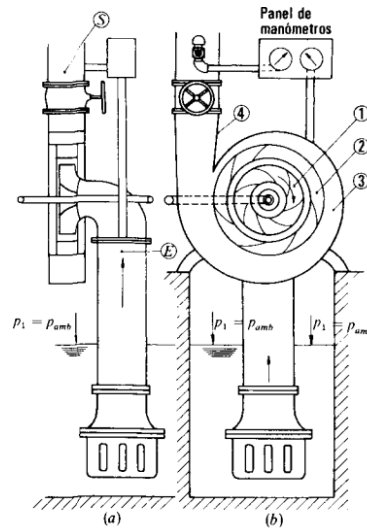


Figura 2.7: Componentes de una bomba rotodinámica

Fuente: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Cap 19

Se observa que la bomba centrífuga de la figura 2.7 se encuentra instalada para succionar el fluido que se encuentra en un tanque abierto a la atmósfera. Asimismo, en la imagen se indican los siguientes componentes:

- Rodete (1): Es el elemento impulsor que gira solidario con el eje de la máquina y consta de un cierto número de álabes que se encargan de transmitir energía al fluido en forma de energía cinética y energía de presión.
- Corona directriz (2): es una corona de álabes fijos que se encargan de recoger y direccionar el líquido que sale del rodete; básicamente este componente ayuda a transformar la energía cinética comunicada por el rodete en energía de presión, ya que la rapidez del flujo comienza a disminuir porque la sección de paso se aumenta en esta corona. Cabe

destacar que no todas las bombas poseen este elemento debido a que los costos de fabricación se elevan, a pesar de que aumente la eficiencia de la bomba.

- Caja espiral (3): Es un conducto con forma de espiral que transforma también la energía dinámica en energía de presión. Por su geometría, se encarga de dirigir el fluido que sale del rodete hacia el tubo difusor con pérdidas mínimas.
- Tubo difusor troncocónico (4): Se encarga de terminar de transformar la energía dinámica en energía de presión y dirigir el fluido hacia la tubería de impulsión.

De manera general, la sección de entrada de una bomba rotodinámica se toma antes de la brida de conexión del tubo de aspiración, es decir, en la sección “E” que se muestra en la figura; por otra parte, la sección de salida se toma después de la brida de conexión del tubo de impulsión, o sea, la sección “S” de la figura.

Por lo tanto, todas las pérdidas de energía que tienen lugar entre las secciones E y S se atribuyen a la bomba, se conocen como “pérdidas internas”, se denominan con las letras  $H_{r\ int}$  y disminuyen el rendimiento general de la bomba; asimismo, todas las pérdidas que tienen lugar antes de la sección E y después de la sección S se atribuyen a la instalación, se conocen como “pérdidas externas”, se denominan con las letras  $H_{r\ ext}$ , disminuyen la eficiencia del sistema hidráulico y se dividen en pérdidas primarias y secundarias, en donde las primarias corresponden a las pérdidas por fricción y las secundarias a las que se provocan por los accesorios de las tuberías del sistema (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 369-371).

### **2.2.1.2 Pérdidas internas de una bomba rotodinámica**

Las pérdidas internas de una bomba se clasifican en tres tipos (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 390-396):

- **Pérdidas hidráulicas:** afectan directamente a la energía específica útil que la bomba comunica al fluido. Este tipo de pérdidas se divide en dos tipos: las pérdidas de superficie y de forma; las de superficie hacen referencia a las pérdidas que se producen por el rozamiento del flujo con las paredes de los elementos de la bomba y las de forma son las que se generan por el desprendimiento de la capa límite del flujo en los cambios bruscos de dirección en el flujo. De manera que las pérdidas hidráulicas se dan mayoritariamente en la entrada del rodete, en el cambio del rodete hacia la corona directriz (si existe), en la caja espiral y en el cambio del tubo difusor hasta la salida de la bomba.
- **Pérdidas volumétricas:** se refieren a las pérdidas que se ocasionan por fugas en el flujo, por lo cual también se dividen en interiores y exteriores. Por un lado, las interiores hacen referencia a la parte del caudal que no es impulsado cuando el rodete gira, esto se debe a que esta fracción del caudal se regrese a través del intersticio que existe entre el rodete y la carcasa de la bomba. De todas las pérdidas internas, ésta es la que más afecta al rendimiento general de la bomba.
- Por otra parte, las pérdidas volumétricas exteriores se dan por las salpicaduras de fluido que se escapan por el juego entre la carcasa y eje de la bomba; este tipo de pérdidas se puede reducir utilizando empaques especiales que se instalan según las condiciones del flujo.
- **Pérdidas mecánicas:** son las pérdidas energéticas que se dan por los rozamientos con los empaques del eje, los cojinetes y el

accionamiento de sistemas auxiliares, tales como la bomba de engranajes para lubricación, el contador de revoluciones, etc.

En la figura 2.8 se muestra un esquema de potencias sobre las pérdidas interiores de una bomba rotodinámica:

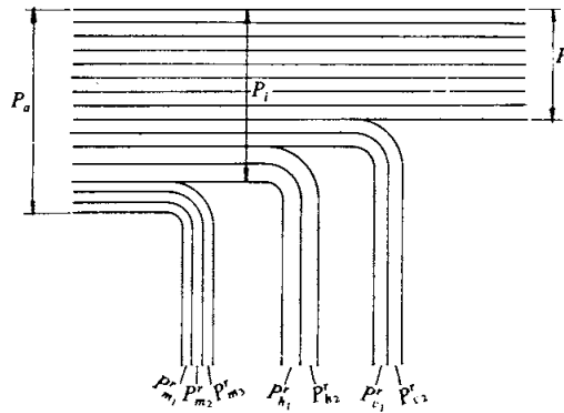


Figura 2.8: Esquema de potencias para bombas rotodinámicas

Fuente: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Capítulo 19.

Donde:

- $P_a$ : es la potencia de accionamiento, la cual consiste en la potencia que el motor transmite al eje para impulsar la operación de la bomba.
- $P_i$ : es la potencia interna y se refiere a la potencia que el eje logra transmitir al rodete una vez que las pérdidas mecánicas han ocurrido.
- $P$ : es la potencia efectiva (o útil) que el rodete logra transmitir al fluido una vez que las pérdidas hidráulicas y volumétricas han afectado la transferencia energética.
- $P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}$ : son los tres tipos de pérdidas mecánicas que experimenta el eje, es decir, rozamiento con los empaques, rozamiento con los cojinetes y accionamiento de sistemas auxiliares.

- $P_{h1}, P_{h2}$ : Son los dos tipos de pérdidas hidráulicas, o sea, las pérdidas hidráulicas de superficie y de forma.
- $P_{v1}, P_{v2}$ : Son las pérdidas volumétricas internas y externas.

### 2.2.1.3 Triángulos de velocidades

Cuando una partícula del fluido ingresa al rodete y entra en contacto con uno de los álabes, el vector de su velocidad absoluta se puede proyectar en 2 componentes: una que sigue una dirección periférica al giro del rodete y otra que es tangencial a la curvatura del álabe. Este comportamiento se mantiene presente tanto en la entrada como en la salida del rodete y se puede representar esquemáticamente con la figura 2.9 (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 359-365):

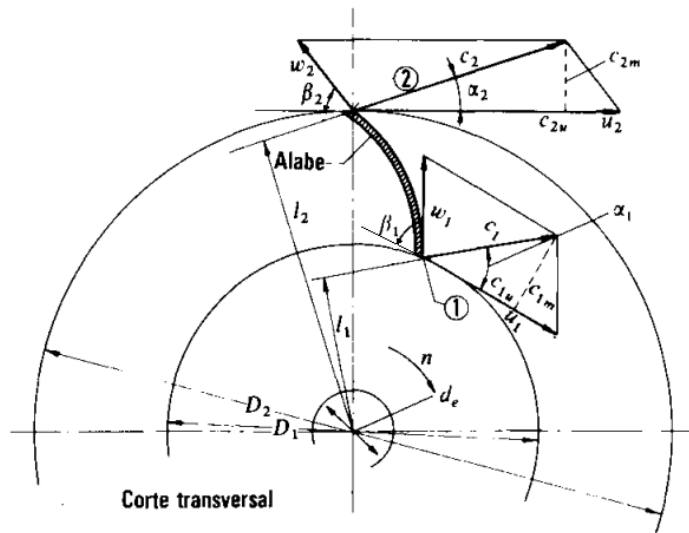


Figura 2.9: Velocidad del flujo en la entrada y la salida de rodete.

Fuente: C. Mataix. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Capítulo 18.

En el esquema anterior los seudónimos 1 y 2 se relacionan con las posiciones de entrada y de salida del rodete. Para cada posición corresponden las siguientes velocidades:

- $c$ : Velocidad absoluta del flujo.
- $u$ : Velocidad periférica de flujo, es igual a la velocidad periférica del rodete
- $w$ : Velocidad tangencial al álabe

También para ambas posiciones la velocidad absoluta del flujo se puede proyectar en las siguientes velocidades, tal y como se muestra el esquema:

- $C_m$ : Componente meridional de la velocidad absoluta de flujo
- $C_u$ : Componente periférica de la velocidad de flujo

Asimismo, la figura 2.9 muestra cómo se forman los siguientes ángulos entre las velocidades:

- $\alpha$ : Ángulo que se forma entre  $c$  y  $u$
- $\beta$ : ángulo que se forma entre  $w$  y  $-u$

A partir de las variables anteriores se pueden formar los triángulos de velocidades tanto para entrada como para la salida y normalmente se utilizan para definir el comportamiento de una bomba, tal como se muestra en la figura 2.10.

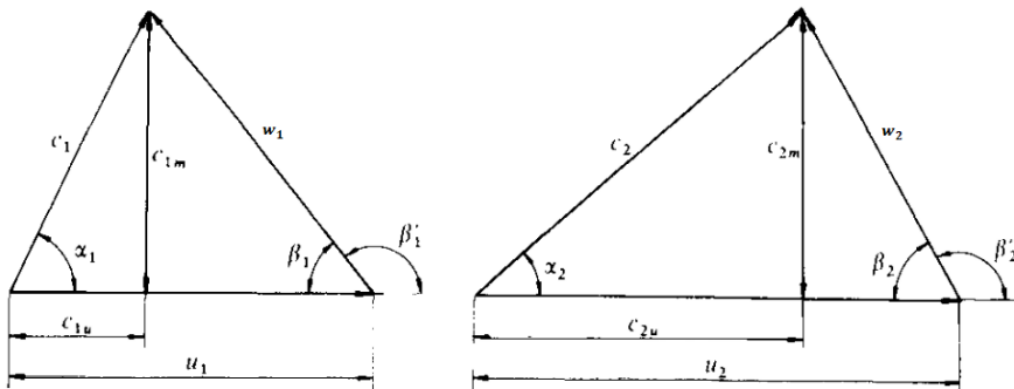


Figura 2.10: Triángulos de velocidad de una bomba rotodinámica

Fuente: C. Mataix. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Capítulo 18.

#### **2.2.1.4 Altura efectiva de una bomba**

La Altura útil o altura efectiva ( $H$ ) se define como la diferencia entre la altura energética teórica ( $H_u$ ) que la bomba imparte al flujo a través del rodete y las pérdidas interiores de la bomba; dicha variable se define bajo la ecuación 2.2 (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 386-389):

$$H = H_u - H_{r\ int} \quad (2.2)$$

En otras palabras, la altura efectiva es la energía que la bomba logra transmitir al flujo cuando se consideran presentes las pérdidas hidráulicas. Para una bomba determinada los valores de esta variable se obtienen experimentalmente sometiéndola a pruebas en bancos de ensayo; de modo que la altura efectiva juega un papel importante en la caracterización de las bombas hidráulicas.

#### **2.2.1.5 Leyes de Semejanza en bombas rotodinámicas**

Los fabricantes de bombas aplican todos sus criterios de diseño a un modelo reducido semejante a todos los prototipos para producir una familia de bombas. Existen tres tipos de semejanzas que el modelo debe cumplir con respecto a los prototipos para realizar todos los procesos que implica dicha producción (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 530-541):

- Semejanza geométrica: se refiere a que un modelo de la bomba será semejante geoméricamente a un modelo si sus dimensiones son proporcionales, es decir, si es fabricado con una escala reducida.
- Semejanza cinemática: básicamente, un modelo de bomba será cinemáticamente semejante al prototipo si las direcciones de las velocidades se mantienen constantes y sus magnitudes son proporcionales. En otras palabras, este tipo de semejanza se da

cuando los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  de la entrada y la salida resultan ser los mismos tanto para el modelo como para el prototipo, de modo que los triángulos de velocidades solamente cambian de proporción para ambos casos, tal y como se ve en la figura 2.11.

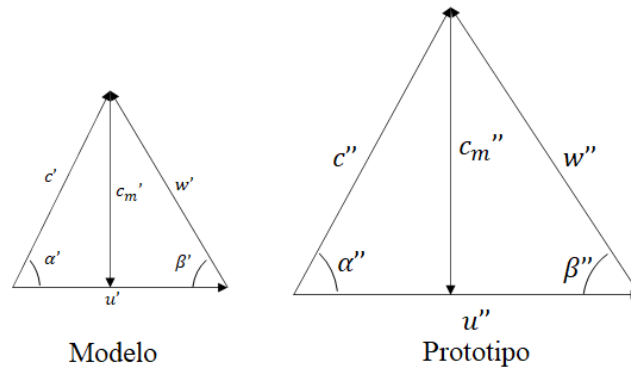


Figura 2.11: Triángulos de velocidades semejantes

Fuente adaptada de: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Capítulo 25.

Donde:

$$\alpha' = \alpha'' \quad \beta' = \beta''$$

- Semejanza dinámica: un modelo de bomba será dinámicamente semejante al prototipo si la dirección de las fuerzas experimentadas durante la impulsión del flujo es la misma en ambos casos; por lo cual, las magnitudes de los vectores de fuerza también deben ser proporcionales.

Por lo tanto, si el modelo de bomba presenta los tres tipos de semejanza en relación con los prototipos, se cumplen las siguientes relaciones:

$$\frac{Q'}{Q''} = \left(\frac{n'}{n''}\right) \left(\frac{D'}{D''}\right)^3$$

$$\frac{H'}{H''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \left(\frac{D'}{D''}\right)^2$$

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^3 \left(\frac{D'}{D''}\right)^5$$

Donde:

- $Q$ : es el caudal que fluye por la bomba
- $H$ : es la altura efectiva de la bomba
- $P$ : es la potencia efectiva de la bomba
- $n$ : es la velocidad de giro en rpm del rodete
- $D$ : es el diámetro del rodete de la bomba
- Las variables que corresponden al modelo se identifican con el superíndice (') y las del prototipo con ('').

Si se despeja relación de diámetros a partir de la ecuación, se obtiene:

$$\frac{D'}{D''} = \left(\frac{H'}{H''}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{n'}{n''}\right)$$

Sustituyendo la relación de diámetros en la ecuación de la relación de potencias:

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{H'}{H''}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{n'}{n''}\right)^2$$

Despejando los términos de modelo y los del prototipo:

$$n'^2 P' H'^{-5/2} = n''^2 P'' H''^{-5/2}$$

$$n' P'^{1/2} H'^{-5/4} = n'' P''^{1/2} H''^{-5/4}$$

La igualdad anterior comprueba que el producto de  $n P^{1/2} H^{-5/4}$  es el mismo para el modelo y el prototipo. Por lo cual, este producto se le conoce como “número específico de revoluciones”, se denomina por las letras  $n_s$  y se utiliza como un parámetro para caracterizar a un grupo de bombas que presentan los

tres tipos de semejanza; de manera que el  $n_s$  de una bomba se expresa con la siguiente ecuación:

$$n_s = n P^{1/2} H^{-5/4}$$

Si se sustituye la definición de la potencia útil  $P = Q\rho gH$  en el  $n_s$  y se supone que el fluido de trabajo es agua, la ecuación toma los siguientes términos:

$$n_s = 3.65 n Q^{1/2} H^{-3/4} \quad (2.3)$$

Donde las unidades de cada variable son las siguientes:

$$n: RPM \quad Q: \frac{m^3}{s} \quad H: m$$

#### **2.2.1.6 Clasificación de las bombas rotodinámicas según su número específico de revoluciones**

De manera general se ha logrado demostrar experimentalmente que la geometría del rodete de las bombas rotodinámicas se puede alterar con tal de conseguir la forma adecuada para adaptarse a las distintas condiciones de servicio, de modo que las bombas puedan cumplir con los valores de Q y H que sean requeridos (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 371-379).

A partir de lo expuesto en la sesión anterior, se establece que para un modelo de bomba corresponde un valor determinado de número específico de revoluciones ( $n_s$ ) y se demostró que este valor será compartido con todos los prototipos bombas que presenten los tres tipos de semejanza con dicho modelo. Según la geometría del rodete, experimentalmente se ha comprobado que el  $n_s$  de las bombas rotodinámicas oscila entre 35 y 1800 aproximadamente y este valor aumenta a medida se disminuye el tamaño de los álabes del rodete; para comprobar este comportamiento se presenta la figura 2.12:

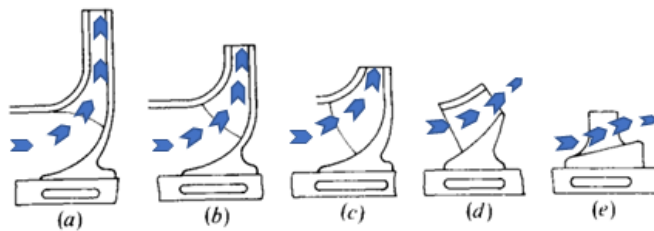


Figura 2.12: Dimensiones de rodetes según  $n_s$

Fuente adaptada de: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Capítulo 19.

A través de pruebas en bancos de ensayos se ha comprobado que la capacidad que poseen las bombas rotodinámicas para entregar altura efectiva  $H$  disminuye a medida se aumenta el caudal impulsado  $Q$ ; analizando la ecuación , se observa que el  $n_s$  aumentará a medida crezca el caudal impulsado por la bomba, por tal motivo, el  $n_s$  de las bombas con rodetes que impulsan el flujo en dirección radial ronda entre 40 a 80, tal y como sucede con el rodete (a) de la figura, por lo cual se utilizan cuando se requieren grandes saltos energéticos y caudales bajos, puesto que no pueden girar a altas velocidades. Por el contrario, el  $n_s$  de las bombas con rodetes que impulsan flujo de manera axial varía entre 600 y 1800, así como el caso del rodete (e) de la figura y, en consecuencia, se utilizan para aplicaciones donde se requieren mayores aumentos de caudal, ya que son capaces de alcanzar altas velocidades de giro (Mataix, *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*, págs. 371-379).

Por lo tanto, los rangos de valores de  $n_s$  para los distintos tipos de rodete que se muestran en la figura son los siguientes:

- Rodete (a):  $40 \leq n_s \leq 80$  (Altura efectiva alta, caudales bajos, RPM bajas)
- Rodete (b):  $80 \leq n_s \leq 140$
- Rodete (c):  $140 \leq n_s \leq 300$
- Rodete (d):  $300 \leq n_s \leq 600$

- Rodete (d):  $600 \leq n_s \leq 1800$  (Altura efectiva baja, caudales altos, RPM altas)

### 2.2.1.7 Clasificación de las bombas rotodinámicas según la dirección de salida del flujo

Una forma más habitual de clasificar las bombas rotodinámicas es según la dirección de flujo en la salida del rodete y actualmente, bajo este criterio, se poseen los siguientes grupos:

- Bombas centrífugas: son aquellas donde el fluido ingresa axialmente al rodete de la bomba y sale de éste con dirección radial (o perpendicular al eje). Cabe mencionar que el aumento energético en el flujo se debe a la variación en la velocidad de giro del rotor (Ingeniería Mecánica y Mas, 2018).

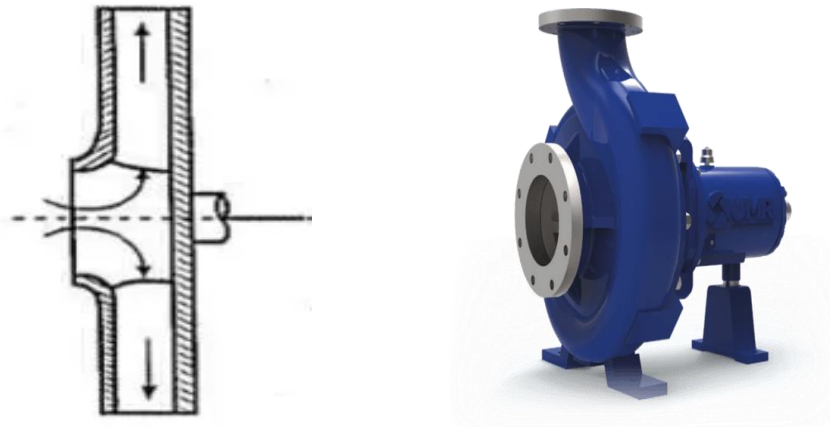


Figura 2.13: Bomba centrífuga

Fuente: <http://ingenieriamecanicaymass.blogspot.com/2018/05/clasificacion-y-tipos-de-bombas.html>

- Bombas axiales: dentro de este grupo se encuentran aquellas donde el flujo ingresa axialmente al elemento giratorio impulsor y no cambia su dirección durante el intercambio energético.

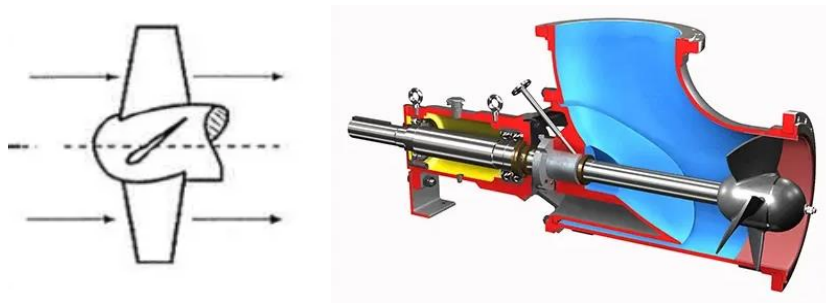


Figura 2.14: Bomba de flujo axial

Fuente: <http://ingenieriamecanicaymass.blogspot.com/2018/05/clasificacion-y-tipos-de-bombas.html>

- Bombas helicocentrífugas: También conocidas como “de flujo mixto”. Se llama así porque el vector de dirección del flujo en la salida puede proyectarse componentes verticales y horizontales.

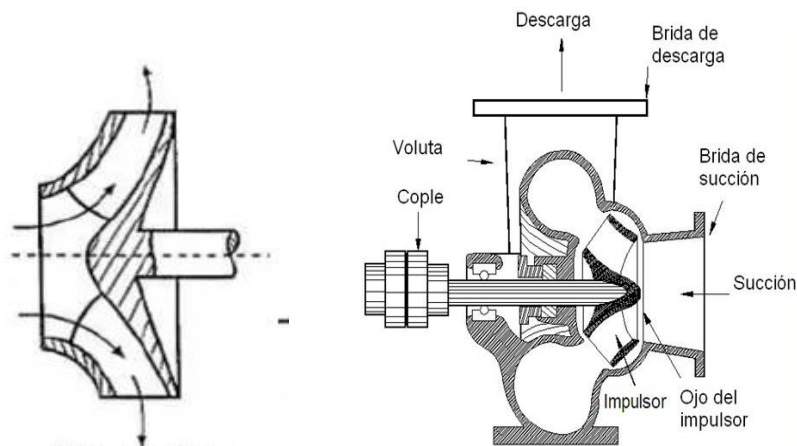


Figura 2.15: Bomba de flujo mixto

Fuente: <http://ingenieriamecanicaymass.blogspot.com/2018/05/clasificacion-y-tipos-de-bombas.html>

## 2.3 Caracterización y selección de las bombas rotodinámicas

### 2.3.1 Curva característica de un sistema hidráulico

La altura efectiva de una bomba ( $H_p$ ) se define como el salto neto energético que ésta aporta al flujo de un sistema hidráulico cuando ya se han considerado las pérdidas que se generan dentro de ésta. En otras palabras, la altura  $H_p$  representa la cantidad de energía requerida por el sistema ( $H_{sist}$ ) para que exista un flujo entre dos puntos de ubicación. Para definir mejor este concepto se puede aplicar la ecuación de Bernoulli entre las superficies del sistema que se ilustra en la figura 2.16, de manera que se obtiene la siguiente expresión (Kenneth, 1987):

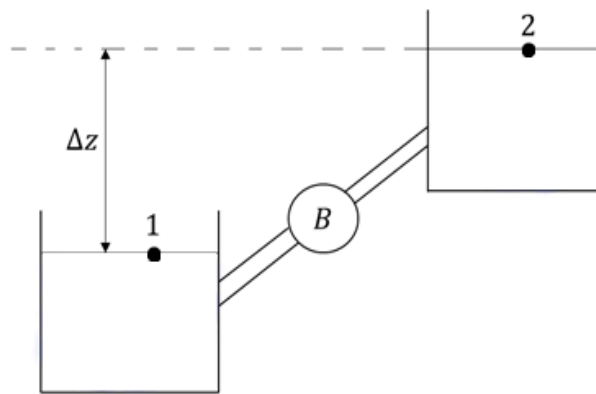


Figura 2.16: Sistema hidráulico de dos tanques

Fuente adaptada de: K. J. McNaughton. BOMBAS, selección, uso y mantenimiento.

Capítulo 2.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_p = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_{r\ 1-2}$$

$$H_p = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Delta z + H_{r\ 1-2}$$

En este caso la carga de presión  $\left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right)$  se cancela porque el fluido se encuentra abierto a la atmósfera en ambas ubicaciones, es decir, la presión ejercida en ambas ocasiones posee la misma magnitud. Asimismo, la carga de

velocidad  $\left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}\right)$  también se cancela porque el fluido se encuentra en reposo en las dos ubicaciones seleccionadas (Kenneth, 1987, págs. 71-147).

Por lo tanto, la altura efectiva de la bomba se define como la sumatoria entre la diferencia de alturas ( $\Delta z$ ) y el conjunto de pérdidas ( $H_{r\ 1-2}$ ) que el flujo experimenta durante su recorrido (Tullis, 1989):

$$H_p = \Delta z + H_{r\ 1-2}$$

Como ya se mencionó anteriormente,  $H_p$  representa la cantidad de energía que se requiere para impulsar el flujo dentro del sistema, por lo tanto, la ecuación se puede expresar así:

$$H_{sist} = \Delta z + H_{r\ 1-2} \quad (2.4)$$

Recordando que  $H_{r\ 1-2}$  se refiere a la sumatoria de las pérdidas primarias y secundarias:

$$H_{r\ 1-2} = \sum \left[ \frac{v^2}{2g} * \left( K + F \frac{L}{D} \right) \right]$$

Por su comportamiento en la gráfica  $H_{sist}$  vs  $Q$ , también se pueden definir como:

$$H_{r\ 1-2} = C_1 Q + C_2 Q^2$$

Sustituyendo en la ecuación de  $H_{sist}$ :

$$H_{sist} = \Delta z + C_1 Q + C_2 Q^2 \quad (2.5)$$

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes numéricas que se definen a evaluar dos valores de caudal dentro de la ecuación y aplicar métodos de simultaneo entre dos resultados de altura efectiva. Por lo tanto, la curva característica del sistema se define con el siguiente gráfico (Tullis, 1989, págs. 29-52):

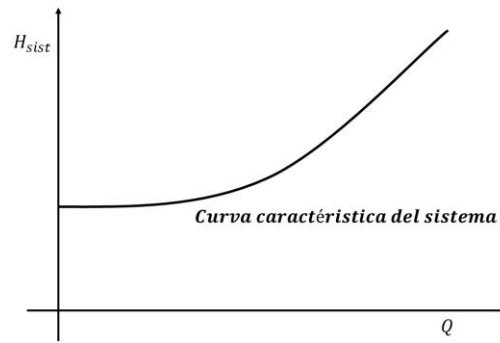


Figura 2.16: Curva característica del sistema

Fuente adaptada de: J. P. Tullis. HYDRAULICS OF PIPELINES. Capítulo 3.

### 2.3.2 Curva característica de una bomba

En la sección 2.2.1.4 se mostró la definición de la altura efectiva, o neta, de una bomba, la cual representa la energía que una bomba es capaz de transmitir a un flujo considerando sus pérdidas internas. Por lo cual, la altura neta consiste en la diferencia entre la altura energética teórica ( $H_u$ ) y las pérdidas internas de la bomba ( $H_{r\ int}$ ), tal y como se especificaba en la ecuación 2.2:

$$H = H_u - H_{r\ int}$$

Retomando los triángulos de velocidades (Figuras 2.10 y 2.11) presentados en la sección 2.2.1.3, en caso ideal de funcionamiento, donde en la entrada de la bomba tiene una velocidad radial igual a 0, se obtiene (Mataix, Turbomáquinas Hidráulicas, págs. 1004-1025):

$$H_u = \frac{u_2 c_{2u}}{g} \quad (2.6)$$

Donde:

- $u_2$ : Velocidad periférica del flujo en la salida del rodete de la bomba
- $c_{2u}$ : Componente periférica de la velocidad absoluta del flujo en la salida del rodete.
- $g$ : gravedad

Asimismo, analizando los triángulos de velocidades de la figura 1.10, se observa que la componente  $c_{2u}$  se define con la siguiente ecuación:

$$c_{2u} = u_2 - c_{2m} \cot \beta_2 \quad (2.7)$$

Donde:

- $c_{2m}$ : Componente meridional de la velocidad absoluta del flujo en la salida del rodete.
- $\beta_2$ : Ángulo entre la velocidad tangencial  $w_2$  y la velocidad periférica  $-u_2$ , en la salida del rodete.

Sí la componente meridional  $c_{2m}$  se expresa en términos de  $Q$ , y a su vez expresamos la velocidad periférica en términos de  $n$  se obtiene:

$$c_{2m} = \frac{Q}{\pi d_2 b_2} \quad u_2 = \frac{\pi d_2 n}{\pi}$$

Donde:

- $Q$ : Caudal que fluye a través de la bomba
- $n$ : Velocidad de giro de la bomba
- $d_2$ : Diámetro exterior del rodete de la bomba.
- $b_2$ : Ancho del alabe en la salida del rodete de la bomba.

Al sustituir las definiciones de  $c_{2m}$ ,  $u_2$  y  $c_{2u}$  (ec. 2.7) en la ecuación 2.6, se obtiene:

$$H_u = \frac{u_2^2}{g} \left( 1 - \frac{c_{2m} \cot \beta_2}{u_2} \right) = \frac{\pi^2 n^2 d_2^2}{3600g} \left( 1 - \frac{60Q \cot \beta_2}{\pi^2 d_2^2 b_2 n} \right)$$

$$H_u = \frac{\pi^2 n^2 d_2^2}{3600g} - \frac{Qn \cot \beta_2}{60b_2} \quad (2.8)$$

Ya que  $n$ ,  $d_2$ ,  $b_2$  y el ángulo  $\beta_2$  se mantendrán constantes para cualquier bomba, la ecuación 1.8 se puede expresar con las siguientes constantes:

$$H_u = a - bQ \quad (2.9)$$

Donde las constantes a y b se definen como:

$$a = \frac{\pi^2 n^2 d_2^2}{3600g} \quad \wedge \quad b = \frac{n \cot \beta_2}{60b_2}$$

La curva característica de una bomba describe su desempeño en base a la altura efectiva de ésta suministra a un flujo, a medida se aumenta el caudal que fluye a través de un sistema de tuberías. Idealmente, si no se considerasen las pérdidas internas, la curva característica de una bomba se podría definir con la ecuación 2.9, donde dependiendo de la magnitud del ángulo  $\beta_2$ , podría tomar los comportamientos que se muestran en la figura 2.17.

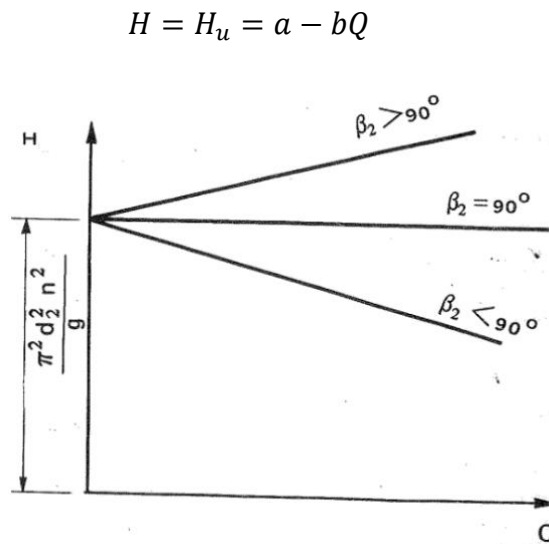


Figura 2.17: Curvas características de una bomba sin considerar las pérdidas internas

Fuente adaptada de: C. Mataix. Turbomáquinas Hidráulicas. 2° Edición

Sin embargo, la curva característica de cualquier bomba hidráulica normalmente es ploteada a partir de los resultados de pruebas en bancos de ensayo, las cuales son realizadas por la empresa fabricante. En general, las bombas rotodinámicas pueden presentar el comportamiento que se muestra en el diagrama de la figura 2.18 (Tullis, 1989, págs. 53-82):

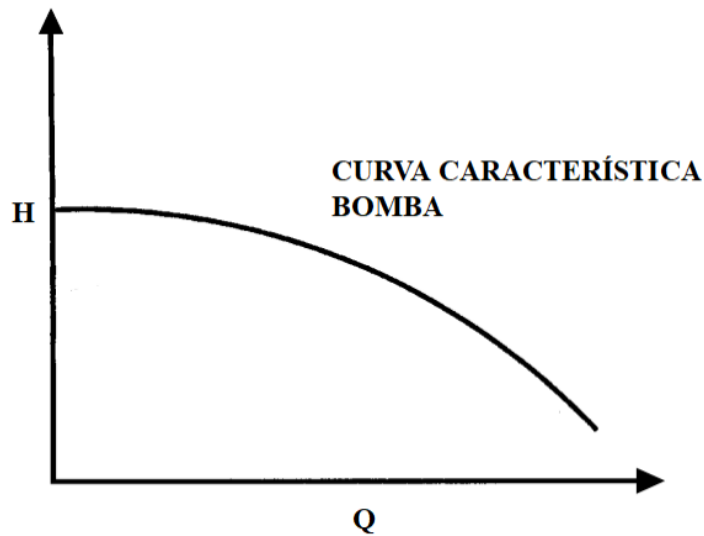


Figura 2.18: Curvas características de bombas rotodinámicas

Fuente adaptada de: J. P. Tullis. HYDRAULICS OF PIPELINES. Capítulo 3

Al contrario de las curvas de la figura 2.17, la curva H vs Q presentada en la figura 2.18 muestra un comportamiento cóncavo negativo porque los datos para su ploteo se han obtenido de manera experimental, lo cual implica la consideración de las pérdidas internas  $H_{r\ int}$  dentro de la bomba, por lo cual básicamente la altura efectiva disminuye a medida se incrementa el caudal del sistema. Por lo cual, este tipo de curvas se puede definir bajo la siguiente ecuación:

$$H = H_0 - H_{r\ int}(Q)$$

Dado que la curva presenta una pendiente cuadrática negativa, las pérdidas energéticas se pueden reescribir de la siguiente manera:

$$H_p = H_0 - C_1Q - C_2Q^2 \quad (2.10)$$

- $H_0$ : es la altura para  $Q = 0$ .
- $C_1$  y  $C_2$ : son constantes matemáticas que se determinan de manera similar al proceso que se utiliza en las curvas características de los sistemas hidráulicos (ecuación 2.5, sección 2.3.1).

### 2.3.3 Curva característica de sistemas hidráulicos con arreglos de tuberías en serie

Los sistemas hidráulicos con tuberías en serie tienen dos o más tuberías conectadas una a continuación de la otra, de modo que el caudal no varía a medida fluye por arreglo completo. Las tuberías conectadas difieren en sus características geométricas, por lo que las pérdidas del sistema son la sumatoria de las de cada tubería conectada, mientras el caudal se mantiene constante en la red. Considerando el siguiente arreglo con dos tuberías de distinta geometría conectadas en serie (Tullis, 1989, págs. 29-52):

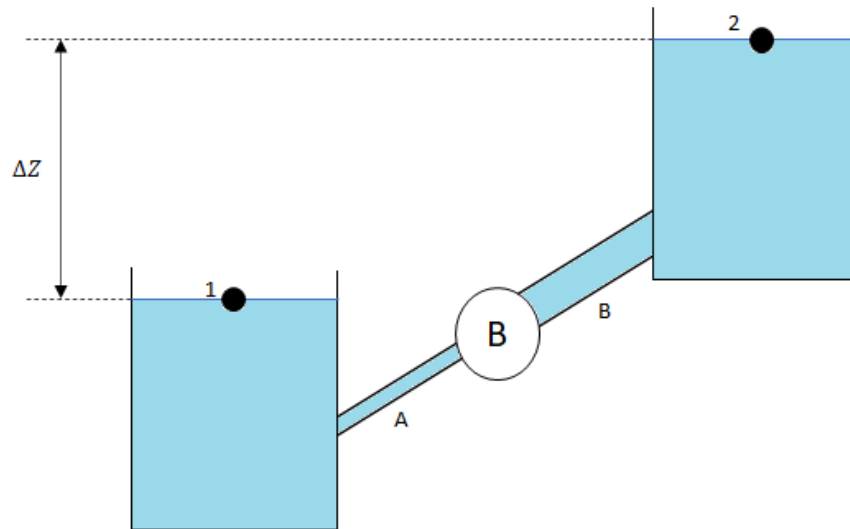


Figura 2.19: Sistema hidráulico con arreglo de tuberías en serie

Fuente propia.

El comportamiento de las pérdidas de cada tubería por separado se puede graficar con las siguientes curvas:

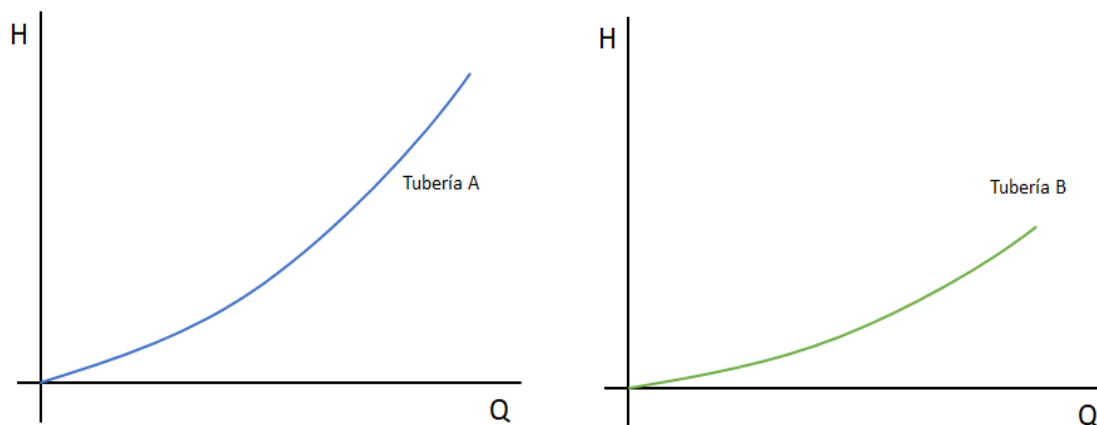


Figura 2.20: Comportamiento de pérdidas en tuberías en serie

Fuente propia

Dado que existe una diferencia de alturas entre las superficies de los tanques y las pérdidas totales del arreglo en serie son la sumatoria de las pérdidas de las tuberías A y B, la curva característica del sistema completo se representa en la siguiente gráfica (Tullis, 1989, págs. 29-52):

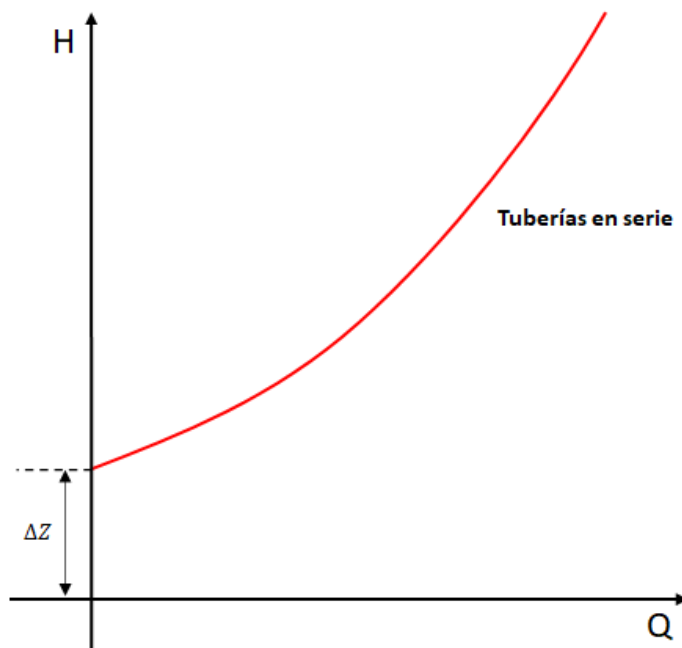


Figura 2.21: Curva característica de sistemas con arreglo de tuberías en serie

Fuente propia.

Por lo tanto, considerando que  $Q_A = Q_B$ , el comportamiento de la curva anterior se puede definir bajo la ecuación 2.11:

$$H_{sist} = \Delta Z + H_{r_A} + H_{r_B} \quad (2.11)$$

### 2.3.4 Curva característica de sistema de bombeo con dos tanques elevados a diferentes cotas

Normalmente, las redes de impulsión de los sistemas de bombeo no cuentan solamente con una tubería, sino que requieren de dos o más tuberías para lograr suministrar agua en diferentes ubicaciones; tal es el caso de los sistemas residenciales, donde se requiere el abastecimiento de agua en servicios sanitarios, cocinas, jardines, etc. Para obtener la curva característica de estos casos, se puede tomar como referencia el sistema de dos tuberías que se muestra en la figura 2.22 (Tullis, 1989, págs. 29-52).

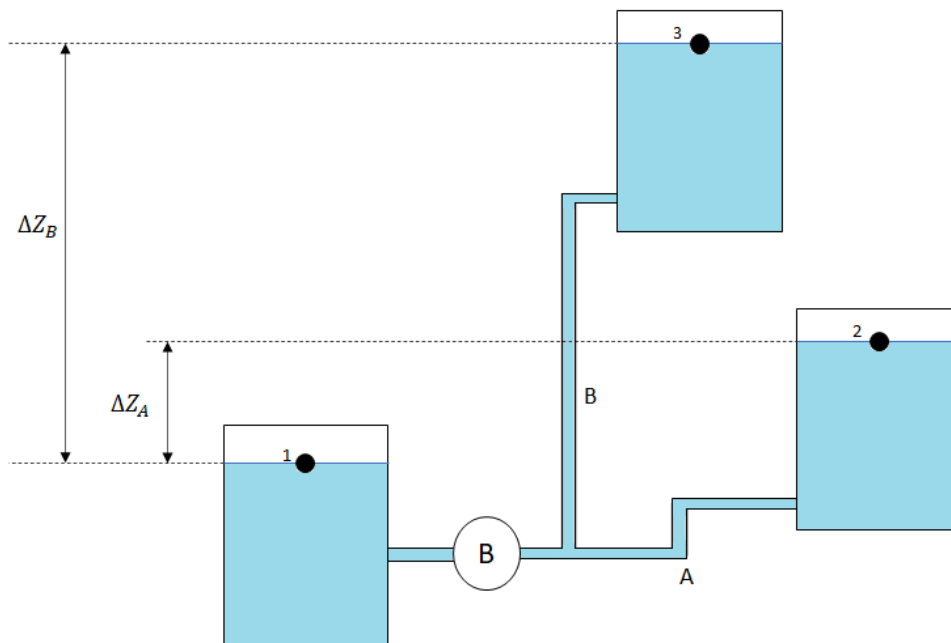


Figura 2.22: Sistema hidráulico con arreglo de tuberías con dos tanques elevados a diferentes cotas

Fuente propia

Se observa que la superficie de ambos tanques se encuentra abierta a la atmósfera, lo cual significa que ambas ubicaciones se encuentran bajo la misma presión. En este caso las curvas características de las tuberías separadas presentan el comportamiento que se muestra en la figura 2.23 (Tullis, 1989, págs. 29-52).

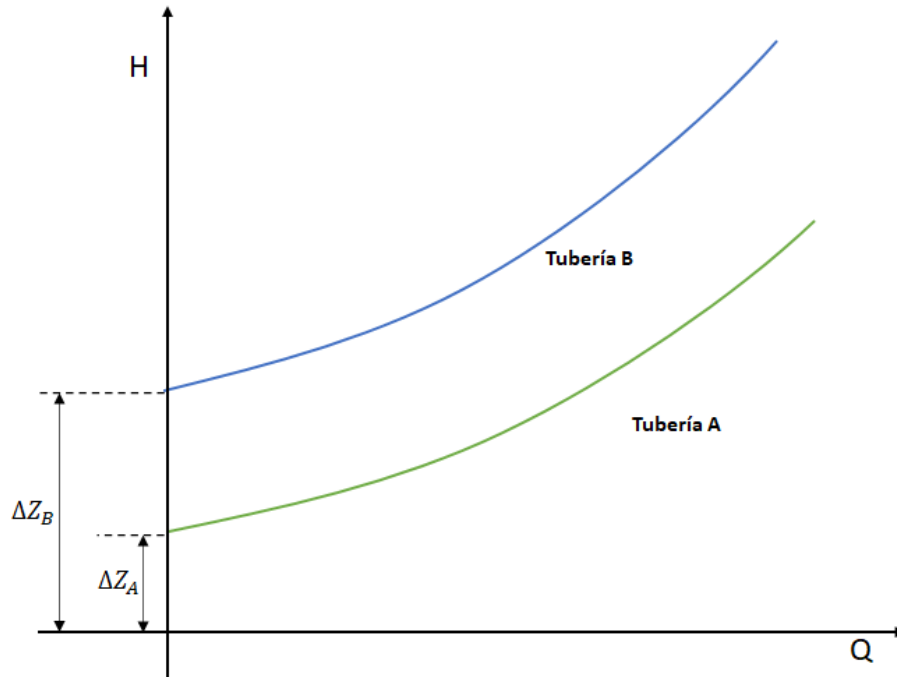


Figura 2.23: Curvas características de tuberías en conectadas en paralelo  
Fuente propia.

El hecho de que las presiones en las superficies de los tanques sean iguales implica que las pérdidas energéticas de cada tubería deben poseer la misma magnitud, cuando los distintos caudales fluyen al mismo tiempo. Asimismo, la sumatoria de los caudales de ambas tuberías representa el caudal que deberá fluir en la tubería de impulsión de la bomba. Por lo tanto, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

$$Q_{total} = Q_A + Q_B \quad y \quad H_{fA} = H_{fB}$$

La curva característica para este tipo de sistema presenta el comportamiento de la línea de color rojo en el esquema de la figura 2.24; la tendencia de este tipo de curva resulta de sumar los caudales cuando se requiere habilitar el flujo de agua por la tubería B (Tullis, 1989, págs. 59-52).

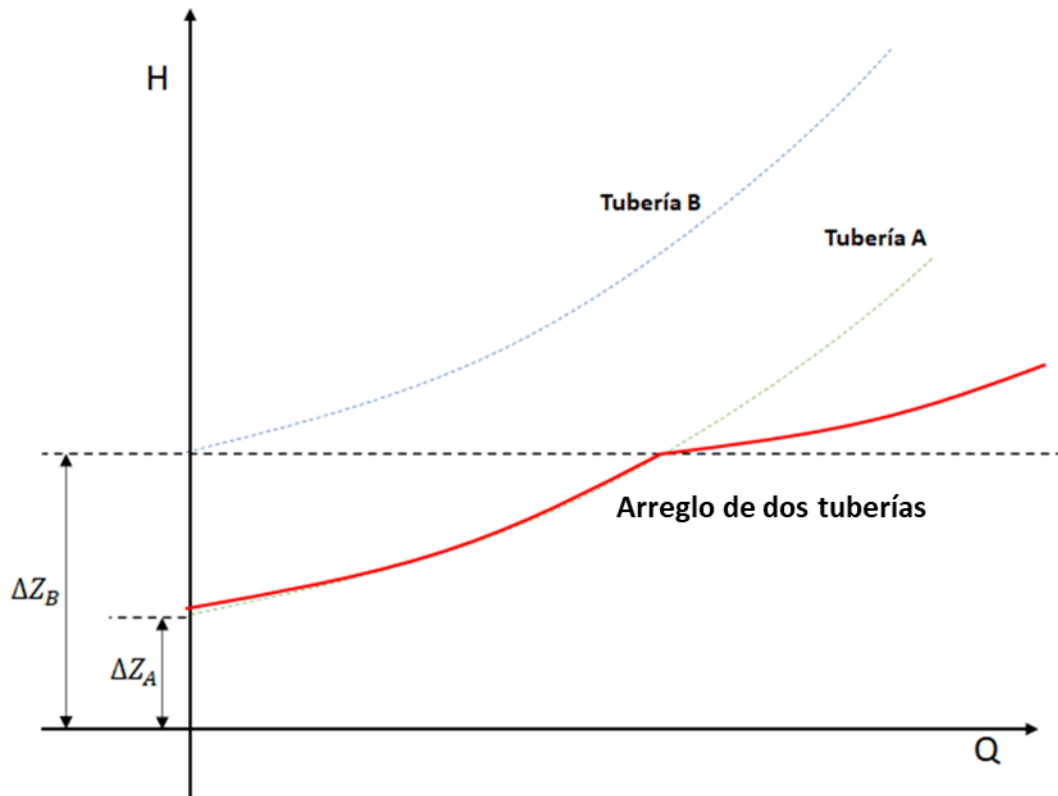


Figura 2.24: Curvas características de un sistema hidráulico con arreglo de dos tuberías

Fuente adaptada de: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*.

### 2.3.5 Punto de operación de una bomba

El punto de operación de una bomba se define como el punto de intersección entre su curva característica y la curva característica del sistema hidráulico donde se encuentre instalada. Cabe destacar que este punto indica el caudal bajo el cual la bomba estaría operando dentro del sistema hidráulico en cuestión, tal y como se muestra en la figura 2.25 (Kenneth, 1987, págs. 71-147).

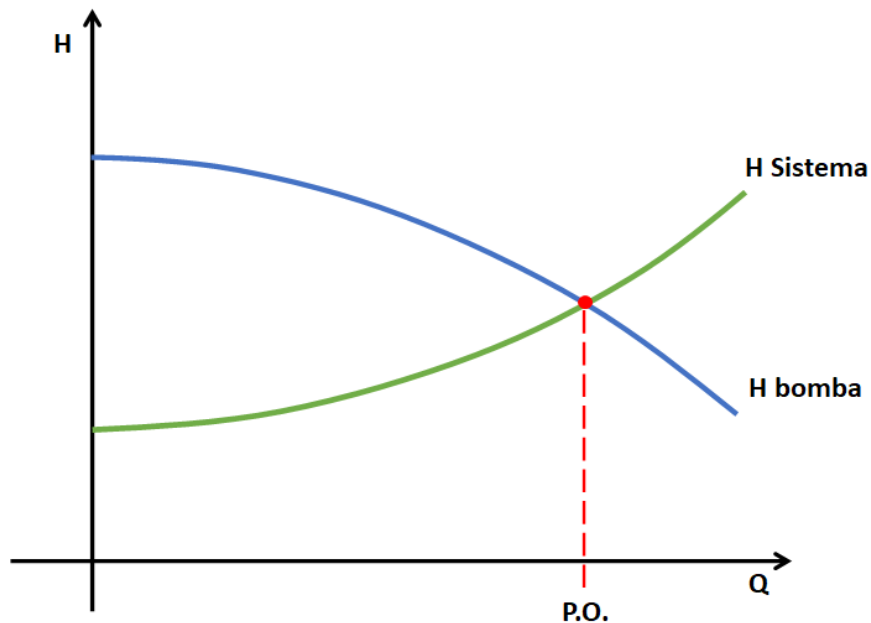


Figura 2.25: Punto de operación de una bomba

Fuente adaptada de: K. J. McNaughton. BOMBAS, selección, uso y mantenimiento

Dentro de un sistema hidráulico determinado, el punto de operación de una bomba se puede modificar variando las pérdidas energéticas primarias y secundarias, ya que éstas son las que determinan la pendiente de la curva característica de dicho sistema, además de que la geometría de rodete de la bomba se mantiene constante.

Es por esto que el autor Kennet J. explica, en su libro “BOMBAS: selección, uso y mantenimiento”, que uno de los métodos para alterar el punto de operación de una bomba consiste en instalar una válvula reguladora en la red de impulsión y aumentar el estrangulamiento del flujo que corre por el sistema, de manera que se aumenta la pendiente de la curva del sistema. Como resultado, el punto de operación y la curva característica del sistema presentan el comportamiento de la figura 2.26, donde el caudal del punto de operación varió de A a D (Kenneth, 1987, págs. 71-147):

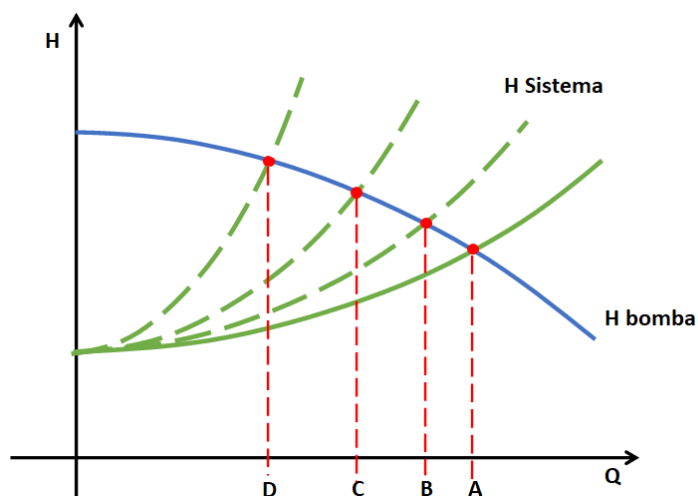


Figura 2.26: Punto de operación de una bomba

Fuente adaptada de: K. J. McNaughton. BOMBAS, selección, uso y mantenimiento

Por otra parte, Kennet J. afirma que el comportamiento de la eficiencia  $\eta$  (línea azul) y la potencia consumida  $Pot$  (línea verde) de una bomba toman las tendencias de las curvas mostrada en la figura 2.27, bajo condiciones de velocidad de giro constante y geometría del rodete constante (Kenneth, 1987, págs. 71-147):

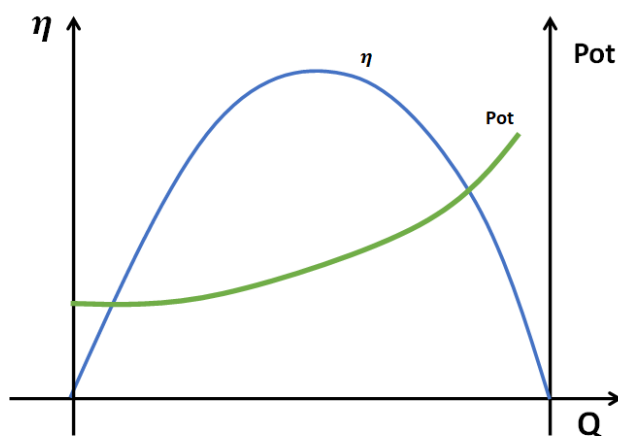


Figura 2.27: Curvas de Rendimiento y Potencia consumida de una bomba hidráulica, para rpm constante.

Fuente adaptada de: K. J. McNaughton. BOMBAS, selección, uso y mantenimiento

Por lo tanto, el punto de operación se utiliza como un criterio de selección de una bomba para un sistema hidráulico, procurando optar por una bomba que garantice que se presente el punto de operación óptimo, el cual ocurre bajo las condiciones de mayor eficiencia de operación; así como sucede en la figura 2.28, donde Claudio Mataix presenta el punto de operación óptimo para una bomba centrífuga que gira a 1450 rpm, dentro de un sistema determinado:

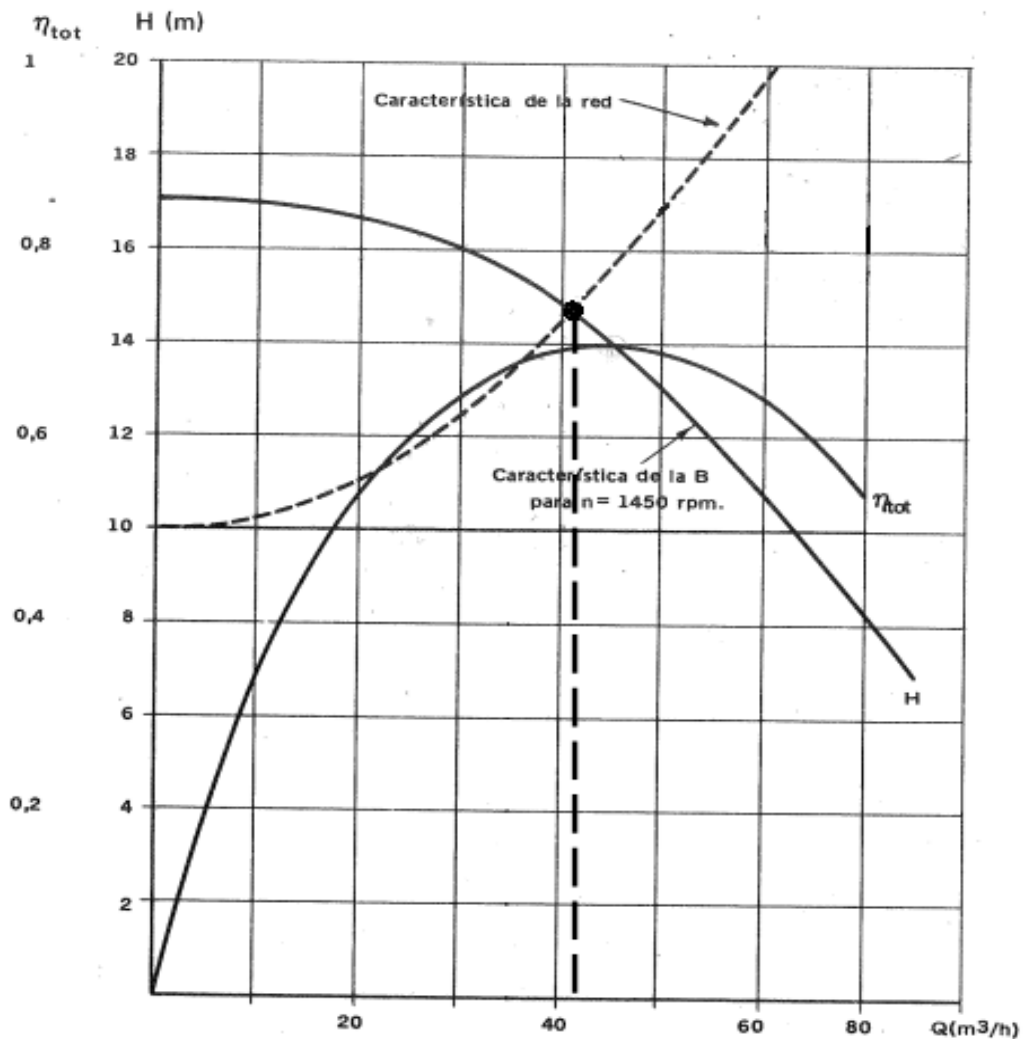


Figura 2.28: Punto de operación óptimo de una bomba

Fuente adaptada de: C. Mataix. Turbomáquinas Hidráulicas. Capítulo 18

En el caso de los sistemas con tuberías en serie, el punto de operación óptimo se presenta de manera similar al esquema de la figura 2.25; sin embargo, para

los sistemas con dos o más tuberías, la selección de las bombas debe garantizar que el punto de operación siempre se encuentre entre los caudales que aseguran que exista flujo en todas las tuberías del arreglo, así como se muestra en la figura 2.29.

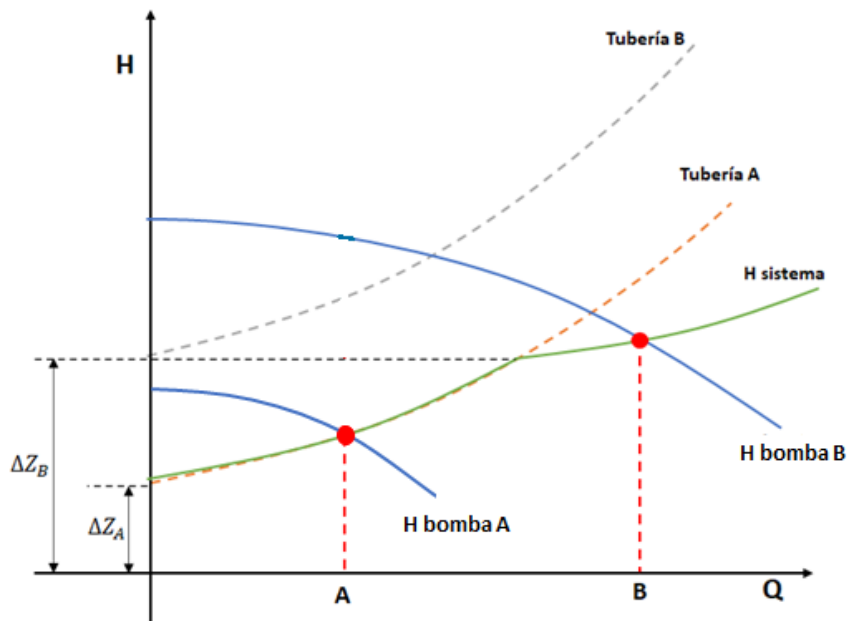


Figura 2.29: Punto de operación de una bomba en un sistema hidráulico con arreglo de dos tuberías

Fuente adaptada de: K. J. McNaughton. BOMBAS, selección, uso y mantenimiento.

Capítulo 2.

En la figura 2.29 se observa que las curvas de color azul corresponden a las bombas A y B, así como la curva verde corresponde a la curva característica de un sistema con dos tuberías. Si se selecciona la bomba A, el sistema funcionará con el punto de operación A y, en consecuencia, solamente habrá caudal en una de las tuberías del sistema; por tal motivo, para estos casos la bomba del sistema debe seleccionarse de manera que el punto de operación ocurra dentro del intervalo de caudales que garantiza que exista flujo en todas las tuberías del arreglo, tal y como sucede con la bomba B, la cual presenta el punto de operación B que cumple con los requisitos de abastecimiento del sistema de dos tuberías.

## 2.4 Altura neta de succión positiva (NPSH)

### 2.4.1 Antecedentes históricos

El primer método para cuantificar las interacciones termodinámicas que se involucran en la cavitación dentro de las bombas rotodinámicas fue desarrollado por el científico Alexey J. Stepanoff entre los años 1961 y 1964. Stepanoff propuso relacionar la cavitación con las características de distintos líquidos utilizando el “Parámetro B”, el cual se refiere al volumen del líquido que se transforma en vapor como consecuencia de las pérdidas energéticas que se producen en la red donde se encuentra operando una bomba; dicho parámetro se define con la siguiente ecuación (d'Agostino, 2017, págs. 8-13):

$$B = \frac{\rho_L}{\rho_v} * \frac{c_{pL} \Delta T}{q_{LV}}$$

Donde:

- $\rho_L$ : Densidad del líquido del flujo
- $\rho_v$ : Densidad del vapor del flujo
- $c_{pL}$ : Calor específico del líquido del flujo
- $\Delta T$ : Cambio de temperatura en el líquido del flujo como producto de la vaporización
- $q_{LV}$ : Calor latente de vaporización

A través del parámetro B se pretendía lograr establecer un modelo matemático que relacionase al fenómeno de cavitación con la operación de una bomba. Sin embargo, se comprobó que este método no ofrecía mayor información sobre los mecanismos responsables de provocar cavitación dentro de un sistema determinado, principalmente, en la entrada de las bombas. Por tal motivo, a partir de 1974, el ingeniero Randal D. Moore, científico de la NASA,

junto con un cuerpo de investigadores, comenzaron a utilizar métodos experimentales que involucraron el desarrollo del parámetro NPSH para poder predecir condiciones de succión que impulsarían la presencia de cavitación durante la operación de una bomba (d'Agostino, 2017, págs. 8-13).

#### **2.4.2 Altura neta de succión positiva (NPSH)**

El desempeño satisfactorio de las bombas requiere un especial cuidado con la cavitación, ya que pueden ser forzadas a que éste fenómeno ocurra si la presión de succión se reduce demasiado. En general, este problema tiene dos efectos en la operación de la bomba: Primero, genera daños internos por erosión que afectan principalmente al rodete y a otras partes que disminuyen su eficiencia. Segundo, incluso antes de que se presenten los daños por erosión, la presencia de vapor dentro de la bomba afecta la transferencia energética al flujo por las pérdidas que se generan tanto en vibraciones como en ruido (Días, Mustafá, & Ríos, 2006).

La energía necesaria para que la cavitación ocurra en una ubicación de un sistema se determina con un parámetro conocido como “Altura neta de succión positiva” o “cabeza neta de succión positiva” (NPSH por sus siglas en inglés), también conocido como ANPA (Altura Neta Positiva en la Aspiración) y CNPA (Carga Neta Positiva en Aspiración), y se representa con la ecuación 2.12 (Kenneth, 1987, págs. 71-147):

$$NPSH = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (2.12)$$

Donde  $P$  y  $v$  son la presión y la velocidad de flujo en el punto de análisis y  $P_v$  es la presión de vapor del fluido a la temperatura de trabajo. En otras palabras, el NPSH se define como la diferencia entre la energía que un flujo posee en una ubicación específica y su carga de presión de vapor.

### 2.4.3 NPSH como criterio de diseño de sistemas hidráulicos

El NPSH es un parámetro estandarizado que permite caracterizar las condiciones energéticas del flujo en puntos de interés en una red de distribución. Por lo tanto, se utiliza el término  $NPSH_r$  (requerido) para hacer referencia a las condiciones energéticas del fluido a la entrada de una bomba cuando hay presencia de cavitación; en consecuencia, el  $NPSH_r$  normalmente se entrega por los fabricantes de bombas y se determina con pruebas en bancos de cavitación. Por otra parte, también existe un NPSH para el sistema donde la bomba será instalada y a éste se le conoce como NPSH disponible ( $NPSH_d$ ).

Cuando se está desarrollando el diseño de un sistema hidráulico, lo que se busca es evitar la presencia de cavitación en las ubicaciones más propensas a este fenómeno, principalmente en la red de succión de la bomba. Generalmente, el NPSH es el parámetro principal para seleccionar la bomba que se instalará, por lo cual el criterio de selección consiste en que el  $NPSH_d$  en la entrada de la bomba necesariamente debe ser mayor que el  $NPSH_r$  que indique el fabricante para el caudal de trabajo.

#### 2.4.2.1 NPSH como criterio de cota de instalación de una bomba en succión

A partir de lo planteado anteriormente se deriva que el  $NPSH_d$  también puede ser utilizado como un criterio de diseño para determinar la altura máxima permitida (con respecto a la superficie de la reserva) a la cual debe instalarse una bomba para que no exista cavitación en su tubería de succión; esto se calcula planteando una igualdad entre el  $NPSH_d$  y el  $NPSH_r$ . Para aplicar este criterio el  $NPSH_d$  de un sistema se determina en los puntos donde existe mayor probabilidad de que ocurra la cavitación, por lo cual generalmente se escoge la

entrada de la bomba, ya que en ese lugar ocurren las mayores caídas de presión. Considerando el sistema de la siguiente imagen, donde la bomba se ha instalado en succión, el  $NPSH_d$  en la entrada de la bomba se define de la siguiente forma (Kenneth, 1987, págs. 71-147):

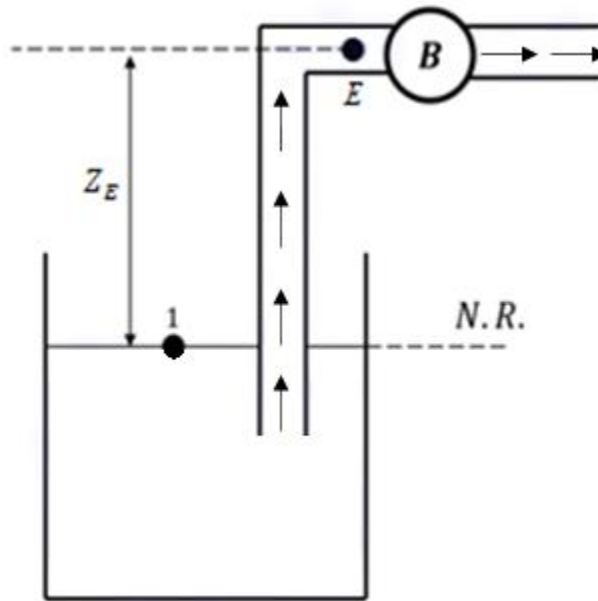


Figura 2.30: Tubería de succión en un sistema de bombeo

Fuente adaptada de: K. J. McNaughton. *BOMBAS, selección, uso y mantenimiento.*

Capítulo 2.

$$NPSH_d = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

El proceso para determinar la cota máxima a la cual se puede instalar una bomba en un sistema inicia con plantear una ecuación de Bernoulli entre la superficie y la entrada a la bomba:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 - H_{r\ 1-E} = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} + Z_E$$

Teniendo en cuenta que:

- $\frac{v_1^2}{2g} = 0$

- $Z_1 = 0$
- $\frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = NPSH_d + \frac{P_v}{2g}$

La ecuación de Bernoulli anterior queda de la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\gamma} - H_{r\ 1-E} = NPSH_d + \frac{P_v}{2g} + Z_E$$

Despejando la energía disponible del sistema:

$$NPSH_d = \frac{P_1 - P_v}{\gamma} - Z_E - H_{r\ 1-E}$$

Para calcular  $Z_{s\ max}$  permisible para evitar la cavitación, se debe plantear la igualdad entre la energía disponible del sistema y la de la bomba:

$$NPSH_d = NPSH_r$$

$$NPSH_r = \frac{P_1 - P_v}{\gamma} - Z_{E\ max} - H_{r\ 1-E} \quad (2.13)$$

$$Z_{E\ max} = \frac{P_1 - P_v}{\gamma} - H_{r\ 1-E} - NPSH_r \quad (2.14)$$

Entonces, se puede afirmar que la ecuación 2.13 es la segunda forma de la definición del NPSH y la ecuación 2.14 brinda la cota máxima permisible para instalar en succión una bomba determinada. Cabe destacar que el valor del  $NPSH_r$  se obtiene a partir de las gráficas otorgadas por el fabricante de la bomba y también puede ser graficado en función del caudal de operación. A continuación, se muestra un diagrama de  $H$  vs  $Q$  donde aparecen las variables que se han descrito anteriormente y que es similar a la que los fabricantes ofrecen para sus familias de bombas.

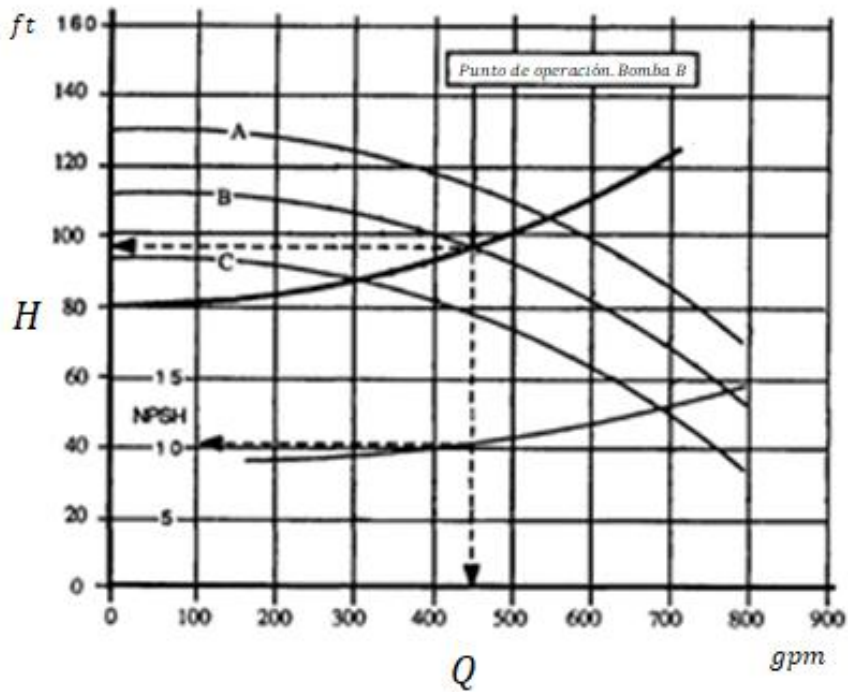


Figura 2.31: Curvas características de una familia de bombas

Fuente adaptada de: J. P. Tullis. HYDRAULICS OF PIPELINES. Capítulo 3

La curva de NPSHr de una bomba se grafica en base a los resultados de las pruebas que se realizan en bancos de ensayos de cavitación; dichas pruebas básicamente consisten en determinar los valores de presión y velocidad de flujo a los cuales el fluido comienza a cavitarse en la entrada de la bomba, a una temperatura determinada, para definir los distintos valores de  $NPSH_r$ . Los detalles de estos ensayos se explican en la sección 2.8 de normativa para ensayos de cavitación.

#### 2.4.2.2 NPSH como criterio de la cota de instalación de una bomba en carga

Otra situación que se hace necesario analizar es la supuesta en el que el tanque se encuentre en un nivel superior al que se encuentra la bomba, así como se muestra en la figura 2.32 (Kenneth, 1987, págs. 71-147):

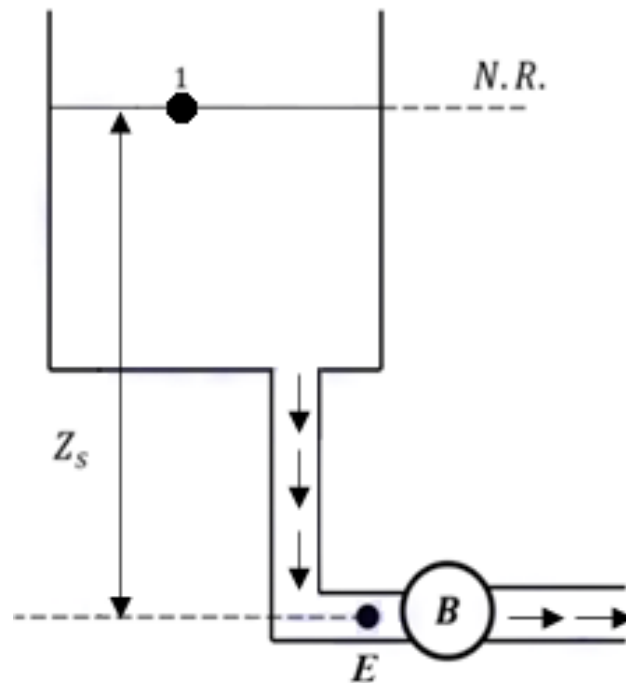


Figura 2.32: Instalación con tubería en carga

Fuente adaptada de: K. J. McNaughton. BOMBAS, selección, uso y mantenimiento.

Capítulo 2.

$$NPSH_d = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

El proceso para determinar la cota de instalación permisible a la cual se debe instalar una bomba en un sistema inicia con plantear una ecuación de Bernoulli entre la superficie del tanque y la entrada a la bomba:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 - H_{r\ 1-E} = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} - Z_E$$

Teniendo en cuenta que:

- $\frac{v_1^2}{2g} = 0$
- $Z_1 = 0$
- $\frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = NPSH_d + \frac{P_v}{2g}$

La ecuación de Bernoulli anterior queda de la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\gamma} - H_{r\ 1-E} = NPSH_d + \frac{P_v}{2g} - Z_E$$

Despejando la energía disponible del sistema:

$$NPSH_d = \frac{P_1 - P_v}{\gamma} + Z_E - H_{r\ 1-E}$$

Analizando el comportamiento de las variables involucradas en la ecuación anterior se observa que a mayores valores de  $Z_E$ , mayor será el  $NPSH_d$  en la entrada de la bomba, por lo cual la disminución en la magnitud de esta variable dependerá principalmente de las pérdidas  $H_{r\ 1-E}$ , por lo tanto, el criterio de diseño para los sistemas hidráulicos que presentan una conexión de bombas en carga consiste en determinar la cota  $Z_E$  mínima para provocar la cavitación en la entrada de la bomba. Entonces, de manera similar al caso de las conexiones en succión, para calcular  $Z_{E\ min}$  permisible se debe plantear la igualdad entre la energía disponible del sistema y la de la bomba:

$$NPSH_d = NPSH_r$$

$$NPSH_r = \frac{P_1 - P_v}{\gamma} + Z_{E\ min} - H_{r\ 1-E} \quad (2.15)$$

$$Z_{E\ min} = NPSH_r - \frac{P_1 - P_v}{\gamma} + H_{r\ 1-E} \quad (2.16)$$

Al comparar la ecuación 2.15 con la 2.13, se observa que el NPSH siempre disminuirá principalmente por las pérdidas  $H_{r\ 1-E}$  independientemente del tipo de instalación que se tenga, ya sea en carga o en succión. Por este motivo es que en los bancos de ensayo para pruebas de cavitación normalmente se pretende alterar las pérdidas de la red para monitorear las variables que determinan el  $NPSH_r$  de la bomba ensayada; en la sección 2.8 se explica mejor el funcionamiento de estos equipos.

Por lo tanto, ya que la curva de NPSHr se obtiene mediante pruebas de cavitación en bancos de ensayos, se concluye que esta variable depende únicamente de la bomba ensayada y es independiente del sistema donde ésta se instale; por tal motivo, el comportamiento de la curva NPSHr se mantendrá constante sin importar el tipo de instalación que se tenga dentro de un sistema, tal y como se muestra en la figura 2.33.

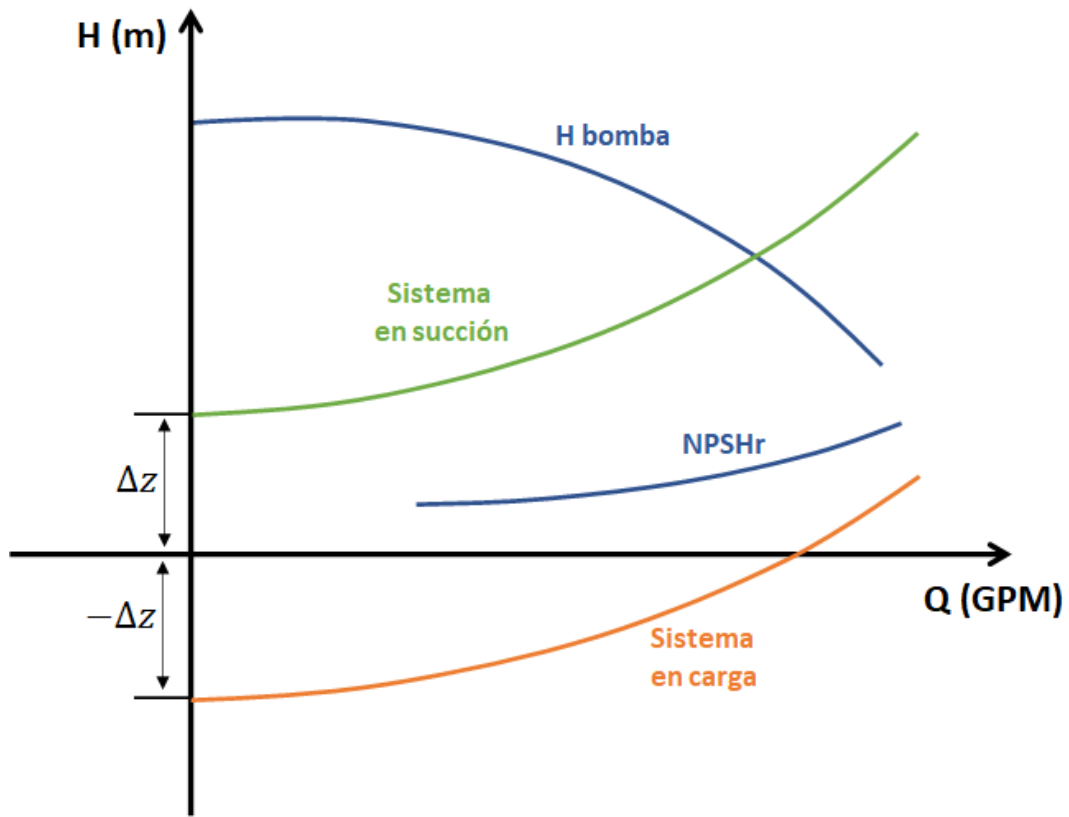


Figura 2.33: Curva NPSHr en sistemas en succión y en carga

Fuente propia

### 2.4.3 Coeficiente de cavitación $\sigma$

Así como el número específico de revoluciones  $n_s$  es un parámetro común entre bombas semejantes que relaciona el comportamiento del caudal y la altura efectiva, también existe un parámetro común que relaciona el  $NPSH_r$  con la altura efectiva, con el cual se puede caracterizar a una familia entera de bombas semejantes en lo que respecta al  $NPSH_r$  a partir de los resultados de un ensayo aplicado a un modelo. A dicho parámetro se le conoce como “coeficiente de cavitación”, se denomina con la letra  $\sigma$  y se define con la siguiente relación (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 397-403):

$$\sigma = \frac{NPSH_r}{H}$$

Sin embargo, el científico Alexey J. Stepanoff (alto referente en cuanto al diseño de bombas rotodinámicas) propone la siguiente ecuación para determinar el coeficiente de cavitación  $\sigma$  de manera aproximada:

$$\sigma = (2.14 \times 10^{-4})(n_s)^{\frac{4}{3}} \quad (2.17)$$

En donde el  $n_s$  (número específico de revoluciones) en función del caudal se define bajo la ecuación 2.3 presentada en la sección 2.2.1.6, para agua con  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ :

$$n_s = 3.65 n Q^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{3}{4}}$$

Donde:

- $n$ : rpm
- $Q$ :  $\text{m}^3/\text{s}$
- $H$ : m

## **2.5 Instrumentos de medición**

Un instrumento de medición, es un equipo que se utiliza para comparar proporciones o magnitudes con un patrón (unidad de medida) o estándar previamente establecido. Los instrumentos de medición, son los encargados de hacer posible esta comparativa entre el objeto a medir y el patrón, arrojando un número que indica de forma lógica esta relación.

Existen gran variedad de instrumentos de medición, en el caso del banco de pruebas sujeto a estudio se utilizarán algunos de los que se presentarán en las siguientes secciones.

### **2.5.1 Manómetros**

Existen diferentes tipos de manómetros, en la industria los más utilizados son los manómetros de tubo de Bourdon. Estos manómetros entran en la calificación de manómetros elásticos, a diferencia de los manómetros de líquido tienen una gama de presiones muy amplia pudiéndose construir para medir desde un vacío del 100 por 100 hasta 10.000 bar y aún más. Esto unido a su sencillez, su pequeño tamaño y su robustez de construcción, ha sido la causa de su extensa aplicación en la industria.

En los manómetros elásticos la presión del fluido actúa sobre un resorte, un tubo elástico, una membrana ondulada, un fuelle metálico, etc. O combinación de estos elementos, y se transmite a una aguja indicadora, que recorre una escala graduada, a través de un mecanismo sencillo de palanca, sector y piñón.

- Manómetro de tubo de Bourdon para presiones absolutas

En el interior del tubo elástico de Bourdon, se ha hecho el vacío. La presión a medir actúa sobre el exterior del tubo. La sección transversal del tubo se deforma. La deformación se transmite a la aguja indicadora por el mecanismo

esquemático en la figura 2.34 (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 48-62).

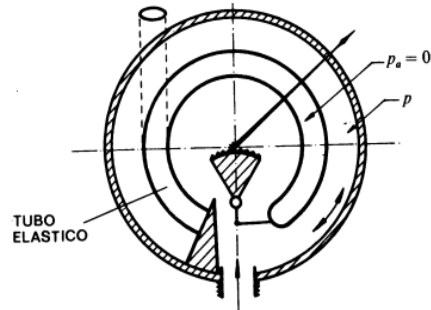


Figura 2.34: Manómetro de tubo de Bourdon para presiones absolutas

Fuente: C. Mataix. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Capítulo 4.

La deformación del tubo elástico transmitida por el sector y piñón a la aguja indicadora, es función de la presión absoluta

- Manómetro de tubo de Bourdon para presiones relativas:

El principio de funcionamiento es el mismo, con la diferencia de que la presión a medir actúa ahora en el interior del tubo de sección elíptica (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 48-62).

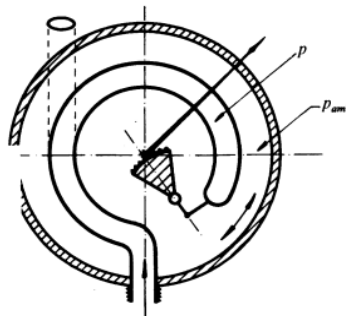


Figura 2.35: Manómetro de tubo de Bourdon para presiones relativas

Fuente: C. Mataix. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Capítulo 4.

En este caso la deformación del tubo elíptico es función de la presión relativa, porque la presión a medir actúa en el interior del tubo la presión atmosférica en el exterior

- Manómetro en U:

El líquido manométrico conviene que tenga viscosidad pequeña y bajo coeficiente de expansión térmica. Mide presiones relativas positivas o negativas. Se escoge como líquido manométrico uno de densidad adecuada a las presiones cuya medición se destina al manómetro. En la figura 2.36 el caso a) indica sobrepresión y el caso b) depresión (Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, págs. 48-62).

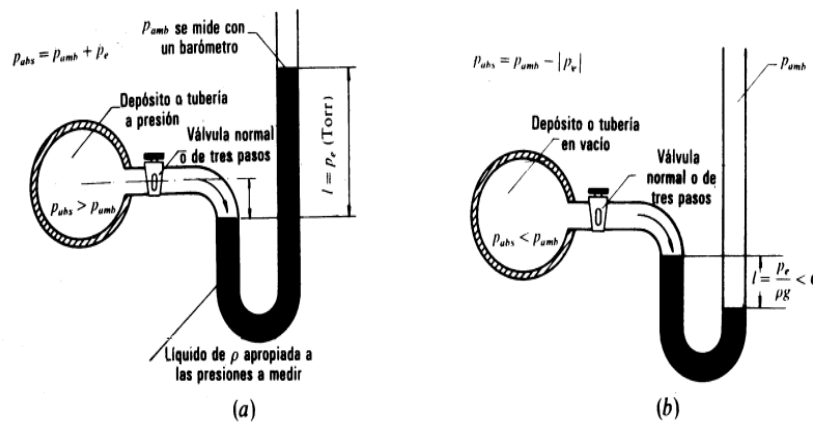


Figura 2.36: Manómetros en U de líquido para presiones relativas

Fuente: C. Mataix. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Capítulo 4.

### 2.5.2 Vacuómetros

El órgano de medida de los vacuómetros está basado en el principio de funcionamiento del muelle Bourdon (Eugène Bourdon, Francia, 1808 – 1884). Un extremo del muelle, hecho con tubos perfilados de aleación especial de cobre, se suelda al perno roscado del vacuómetro, formando con este un solo cuerpo; en cambio, el otro extremo cerrado se deja libre. Al crecer la caída de presión o la presión en la parte interior, tiende a deformarse con respecto a su posición original (efecto Bourdon). El movimiento del extremo libre del muelle determina la medida de la caída de presión-presión. Para una mejor lectura, este

movimiento se amplifica a través de una palanca de conexión y se transmite al índice.

Todo está contenido en una caja resistente, fijada a un racor roscado para la conexión al sistema y con el cuadrante y el índice visibles a través de un disco de protección de plástico transparente. Comercialmente se encuentran, con conexiones radiales o coaxiales, con brida empotrable o para exterior, en seco o con baño de glicerina.

Otros tipos de vacuómetros son los siguientes (IKS PVD Technology, 2018):

- El vacuómetro de punzón de acero detecta de forma instantánea el grado de vacío de las latas y de envases para guardar alimentos en general.
- El vacuómetro de Mcleod logra medir con increíble precisión las presiones que son inferiores a la presión atmosférica.
- Los vacuómetros digitales proporcionan una medida más confiable, aunque siempre debe de ser calibrado para que mantenga su calidad de medición.

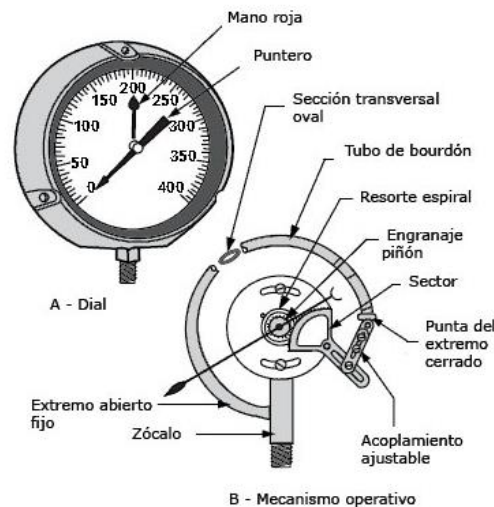


Figura 2.37: Ejemplo vacuómetro efecto Bourdon

Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica34.htm>

El vacuómetro es un instrumento que ha sido creado con el objetivo de poder medir presiones que sea inferiores a la presión atmosférica mientras que el manómetro es un instrumento que se encarga de medir la presión que hay en los fluidos sean estos líquidos o gases y en circuitos cerrados. Mientras que el vacuómetro mide la presión al vacío, el manómetro mide la presión real o absoluta.

### **2.5.3 Medidor de flujo o caudalímetro**

Un caudalímetro es un instrumento de medición utilizado para monitorear un caudal o el gasto volumétrico de un fluido. Normalmente se instalan en línea con la tubería que transporta el flujo y algunos modelos son capaces hasta de medir el gasto másico de un flujo. En la actualidad existen de tipo análogos y digitales, siendo los segundos los más utilizados por su alto nivel de precisión en las mediciones.

Los medidores de caudal digitales se clasifican según por mecanismo de medición en los siguientes 3 tipos (Zarza, 2018):

- **Caudalímetros de inserción:** Este tipo de medidores se conectan directamente con el flujo interno de una tubería a través de una sonda. La velocidad del fluido se determina en base a las señales que sonda sensorial emite como resultado de obstruir el flujo. Asimismo, las sondas pueden variar según su tipo de sensor:
  - **Sondas electromagnéticas:** emiten señales eléctricas inducidas a partir del contacto con el flujo para estimar su velocidad local.
  - **Sondas de turbina:** Determinan la velocidad local del flujo según la velocidad de rotación de la turbina incorporada.

- **Sondas de presión diferencial:** Determinan el caudal circulante en una sección de la tubería a partir de la diferencia de la presión en esa ubicación y una presión de referencia.



*Figura 2.38: Caudalímetro de sonda*

*Fuente: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudalimetro-y-cuantos-tipos-hay>*

- **Caudalímetros Electromagnéticos:** Su principio de funcionamiento se basa en la inducción de una diferencia de potencial que se produce entre los extremos de un conductor cuando éste atraviesa un campo magnético. Aplicando este principio al caudalímetro, el agua jugaría el papel del conductor y al recorrer una distancia entre dos electrodos que se encuentran ubicados en la zona de un campo magnético, se induce una diferencia de potencial entre los electrodos que es proporcional a la velocidad del flujo que atraviesa al caudalímetro. Esta señal es registrada por una unidad de control y a partir de ella se calcula el caudal que pasa por la sección transversal de sensor.



Figura 2.39: Caudalímetro electromagnético

Fuente: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudalimetro-y-cuantos-tipos-hay>

- Caudalímetro de Ultrasonido: El principio de funcionamiento de estos medidores consiste en que la unidad de control determina la variación que experimenta la frecuencia de una señal de sonido cuándo esta se emite dos veces seguidas dentro de una tubería, siendo que la primera vez se emite en el mismo sentido del flujo y la segunda en sentido contrario. La resistencia que el flujo a la segunda emisión es lo que provoca un decremento en su frecuencia, obteniendo como resultado la velocidad del flujo se calcula en base a la diferencia en la frecuencia entre ambas señales.

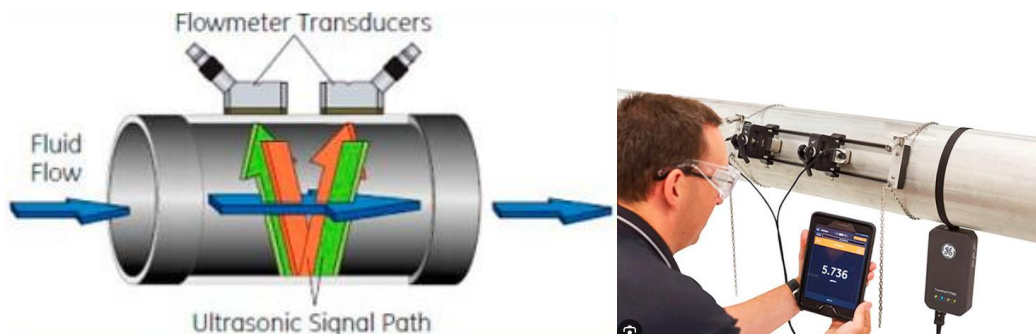


Figura 2.40: Caudalímetro de Ultrasonido

Fuente: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudalimetro-y-cuantos-tipos-hay>

#### **2.5.4 Termómetro**

El termómetro es un instrumento de medida encargado de contabilizar la temperatura. Gracias diferentes escalas y fenómenos físicos. El fenómeno físico más utilizado es el de dilatación, característica que tienen algunos metales al momento de entrar en contacto con el calor.

Las escalas que se utilizan para medir la temperatura son; Celsius, Fahrenheit, Kelvin y Rankine. Los termómetros más utilizados en la actualidad son los digitales, pero en general todos se rigen bajo un mismo funcionamiento.

El principio que rige el termómetro es simple: el dispositivo tiene un extremo sensible, donde se encuentran los sensores (en el caso de un termómetro digital) o la sustancia dilatable (en el caso de los termómetros de mercurio o de alcohol), y que debe ser introducido en el cuerpo o la sustancia cuya temperatura desea medirse. Tras esperar algunos minutos, el calor del cuerpo o la sustancia hará ascender el mercurio o el alcohol hasta un punto equivalente, en la escala registrada en el aparato, al grado de calor medido (Editorial Etece, 2021).

- **Termómetro industrial bimetalico**

Los termómetros bimetalicos funcionan con un sistema de medición en forma de tubo helicoidal o espiral. El sistema de medición del termómetro industrial consta de dos láminas con diferentes coeficientes de dilatación, que están unidas de forma inseparable. Mediante la deformación mecánica de las láminas bimetalicas en los tipos de tubo mencionados, se produce un movimiento de rotación, provocado por los cambios de temperatura. Si un extremo está fijado la del movimiento rotatorio actúa completamente sobre la aguja de indicación. Los termómetros bimetalicos están disponibles en rangos entre  $-70^{\circ}\text{C}$  y  $+600^{\circ}\text{C}$  en clases de exactitud de 1 y 2 conforme a la norma EN 13 190.



Figura 2.41: Modelo TG54 termómetro construido bajo la norma EN13 190

Fuente: <https://rodavigo.net/es/p/termometro-bimetalico-modelo-tg54-tipo-tg54100>

## 2.6 Válvulas de uso común en redes de tuberías

Las válvulas son fundamentales para el diseño de un sistema de tuberías, cumplen la función de cerrar y regular el caudal, se utilizan para aislar elementos, ramas, entre otros usos. Las válvulas de regulación definen el punto de operación. Además de ello cumplen funciones como evitar el retorno del caudal, regular la presión, expulsar aire, etc.

### 2.6.1 Tipos de válvulas

*Válvulas de compuerta:* Están formadas por una compuerta circular o rectangular que se desliza por un plano perpendicular a la tubería. Por lo general son accionadas por un tornillo. Cuando están totalmente abiertas, dejan el conducto prácticamente libre, por lo que apenas tienen pérdidas. Esta característica ha hecho de ellas las válvulas tradicionales de cierre hasta la aparición de las válvulas de mariposa. Se utilizan totalmente abiertas o cerradas: no suelen ser adecuadas para regulación (Banco M., Velarde S, & Fernández F., 1994, págs. 79-85).

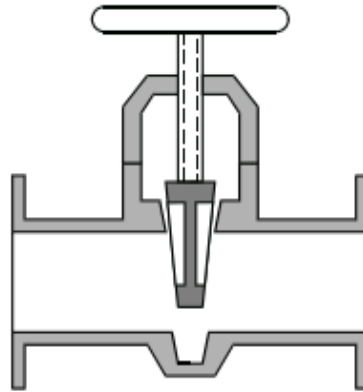


Figura 2.42: Válvula de compuerta

Fuente: Blanco, E. Velarde S. Fernández J. *Sistemas de Bombeo*.

*Válvula de mariposa*: Consisten en un disco interior a la tubería que gira 90° de abierta a cerrada. El eje de giro puede ser central o excéntrico (para que la presión del fluido favorezca el cierre), y los tipos de juntas de estanqueidad son muy variados (Banco M., Velarde S, & Fernández F., 1994, págs. 79-85).

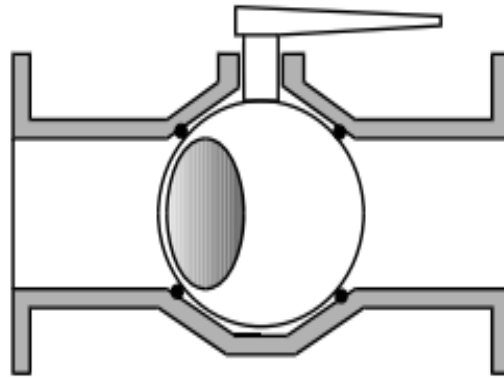


Figura 2.43: Válvula de mariposa

Fuente: Blanco, E. Velarde S. Fernández J. *Sistemas de Bombeo*.

*Válvulas esféricas y cónicas*: Su diseño más habitual es una esfera o tronco de cono que gira respecto a un eje perpendicular a la tubería. Un taladro cilíndrico, de la misma sección que la tubería permite un paso total cuando está

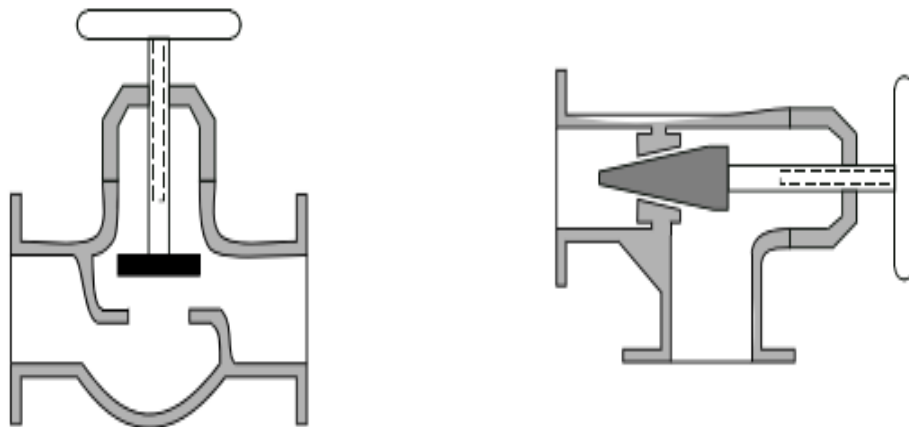
orientado en la dirección axial. El cierre se efectúa con un cuarto de vuelta. Sus características frente a la cavitación son mejores que las de las válvulas de compuerta o mariposa (Banco M., Velarde S, & Fernández F., 1994, págs. 79-85).



*Figura 2.44: Válvula esférica*

*Fuente: Blanco, E. Velarde S. Fernández J. Sistemas de Bombeo.*

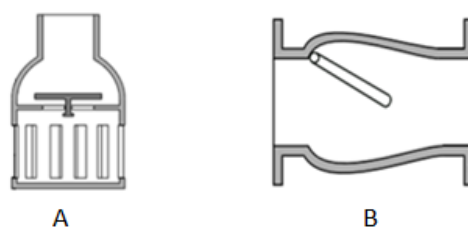
*Válvulas de globo y aguja:* Con un asiento diseñado para evitar la erosión y la cavitación, estas válvulas son especialmente adecuadas para regulación. Su principal inconveniente recae en la gran pérdida de carga que presentan aun estando totalmente abiertas (Banco M., Velarde S, & Fernández F., págs. 79-85).



*Figura 2.45: Válvulas de globo y aguja*

*Fuente: Blanco, E. Velarde S. Fernández J. Sistemas de Bombeo.*

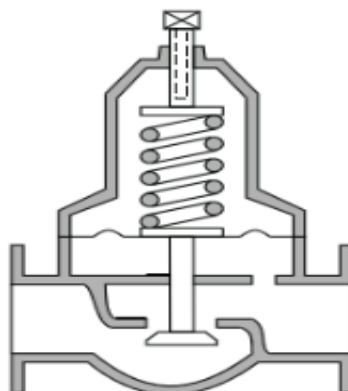
*Válvulas antirretornos:* Se utilizan para evitar el flujo inverso por las tuberías. En la figura 2.46 se muestran dos tipos: La válvula A se conoce como válvula de pie, están integradas con una rejilla filtrante y se utilizan para mantener el cebado de las bombas en instalaciones en succión; la válvula B son válvulas antirretorno en redes de tuberías de impulsión (Banco M., Velarde S, & Fernández F., 1994, págs. 79-85).



*Figura 2.46: Válvulas antirretorno*

*Fuente: Blanco, E. Velarde S. Fernández J. Sistemas de Bombeo.*

*Válvulas reguladoras de presión:* Normalmente son válvulas de membrana en las que el sistema hidráulico de accionamiento se ha ajustado de forma que mantengan una presión constante aguas abajo de la válvula (por supuesto, esta presión es inferior a la de aguas arriba) (Banco M., Velarde S, & Fernández F., 1994, págs. 79-85).



*Figura 2.47: Válvula reguladora de presión*

*Fuente: Blanco, E. Velarde S. Fernández J. Sistemas de Bombeo.*

Los accesorios que hacen faltan son las uniones entre tuberías; es importante considerarlas, pues representan pérdidas de energía en el flujo, algunas uniones que sirven para distribuir la red hidráulica son los siguientes:

- Codos; Ya sea a 90 u otro tipo de grado de inclinación
- Uniones TE
- Reductores de diámetros

Cada elemento considerado un accesorio posee un coeficiente de fricción K, este coeficiente es útil para calcular las pérdidas focalizadas debido al accesorio, las cuales se conocen como pérdidas secundarias. Este valor tiene que ser proporcionado por el fabricante. Al conocer el coeficiente de pérdidas secundarias se tendrá la facilidad de utilizar la siguiente fórmula para conocer las pérdidas (Banco M., Velarde S, & Fernández F., 1994, págs. 79-85).

$$H_s = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.18)$$

Donde:

- $H_s$  es la pérdida en m
- $v$  es la velocidad del flujo en el accesorio
- $K$  es el factor adimensional de pérdidas secundarias
- $g$  es el valor de gravedad

## **2.7 Normativa para ensayos de cavitación**

La norma internacional aplicable para un ensayo de cavitación en bombas es la ISO 9906; la cual además de incluir las especificaciones de dicha prueba, también muestra los requerimientos necesarios para las pruebas de aceptación de rendimiento para bombas rotodinámicas (centrífugas, de flujo mixto o axiales). Durante esta sección se describirán los distintos tipos de bancos de ensayo aprobados por la norma para las pruebas NPSH (o pruebas de cavitación) y algunos lineamientos importantes que se deben tomar en cuenta para la ejecución de éstas.

### **2.7.1 Tipos de bancos de ensayo y características según sus circuitos**

La norma ISO 9906 propone una serie de modelos de instalación que se clasifican según la variable de control que regula el NPSHd de la red del banco de pruebas. Durante esta sección se presentarán las características principales de estos modelos de banco junto con sus esquemas de funcionamiento.

#### **2.7.1.1 Circuito cerrado con control por válvula**

El principio de funcionamiento de los bancos con este tipo de instalación es el mismo que los de circuito cerrado con control presión, con la diferencia de que en estos casos el tanque se encuentra abierto a la atmósfera y el NPSHd de la red del banco se disminuye mediante el decremento del caudal de operación a través de válvulas reguladoras. A continuación, se muestra el ejemplo de un banco de este tipo (ISO 9906:2012):

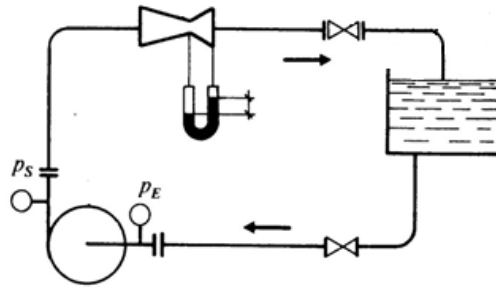


Figura 2.47: Banco de pruebas de circuito cerrado con regulación por válvula

Fuente adaptada de: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Capítulo 25.  
2° Edición

El esquema de Banco de Bombas Centrífugas presentado en la figura anterior es un ejemplo de un banco de circuito cerrado y con regulación por válvula, ya que es una unidad de sobremesa compuesta por una bomba centrífuga, un depósito de agua de alimentación, tuberías de circulación, válvulas de regulación, así como los elementos de control suficientes para los experimentos con bombas: dos manómetros y un sensor de caudal.

Un variador de frecuencia para la bomba, proporciona la posibilidad de regular y medir la velocidad del motor de la bomba, así como la medición del par transferido. La bomba está instalada en un sistema de tuberías que evita el gasto permanente de agua durante el funcionamiento al tratarse de un circuito cerrado.

### 2.7.1.2 Arreglo de circuito cerrado con control de presión y temperatura.

La bomba es instalada en un circuito cerrado, en el cual se altera la presión, nivel o temperatura, el NPSH se varía sin influenciar el H de la bomba, o el caudal hasta que la cavitación ocurra (ISO 9906:2012).

- Arreglos para enfriamiento o calentamiento del líquido en el circuito pueden ser necesarios para mantener la temperatura requerida, y un tanque de separación de gas también puede ser necesario.

- Un circuito de circulación de líquido puede ser necesario para evitar diferencias de temperatura inaceptables en el tanque.
- El tanque de ser de suficiente tamaño y diseñado para prevenir el arrastre de gas el flujo de entrada de la bomba.

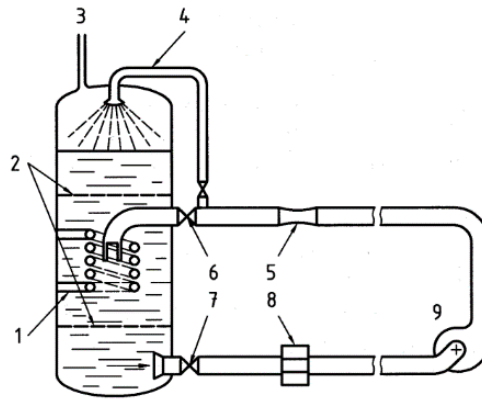


Figura 2.48: Arreglo de circuito cerrado

Fuente: ISO Standard No. 9906:2012

### 2.7.1.3 Tanque abierto con control de nivel

La bomba extra líquido a través de una tubería de succión no obstruida desde un sumidero en el cual el nivel del líquido en la superficie puede ser ajustado (ISO 9906:2012).

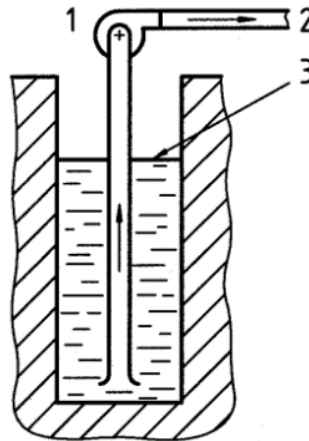


Figura 2.49: Tanque abierto con control de nivel

Fuente: ISO Standard No. 9906:2012

#### 2.7.1.4 Tanque abierto con válvula de regulación

La presión del líquido entrando en la bomba es ajustada a través de una válvula de control instalada en la tubería de entrada al nivel más inferior práctico (ISO 9906:2012).

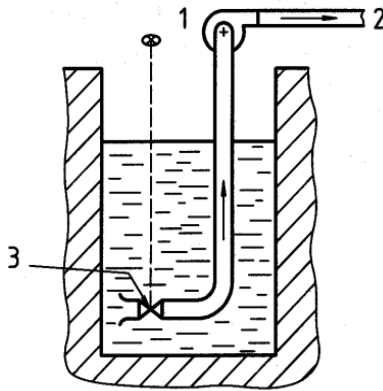


Figura 2.50: Tanque abierto con válvula de regulación

Fuente: ISO Standard No. 9906:2012

#### 2.7.2 Objetivos de las pruebas NPSH.

Como ya se definió anteriormente, el NPSHr es el parámetro utilizado para determinar si una bomba cavitará al ser instalada en un sistema hidráulico determinado. Por lo tanto, los objetivos principales de las pruebas NPSH son los siguientes:

- El primero consiste en verificar el NPSHr de la bomba para confirmar sus especificaciones.
- El segundo es caracterizar los datos de NPSHr que se requieren para realizar los procesos de selección de bombas que involucran los diseños de sistemas hidráulicos.

Cabe destacar que estas pruebas solo tratan con mediciones relacionadas con el rendimiento hidráulico de la bomba (variaciones de cabezal, caudal,

potencia) y no con otros efectos que pueden ser causados por la cavitación, como el ruido, vibraciones y erosiones (ISO 9906, 2012).

### 2.7.3 Condiciones de las pruebas NPSH

En lo que respecta a las pruebas NPSH, las condiciones bajo las cuales se realizan deben garantizar que dichos ensayos puedan realizarse en varias bombas y no solo con una en específico; es por esto que los bancos de ensayo son los equipos más adecuados para estas actividades de laboratorio, ya que el diseño de éstos se realiza tomando en cuenta que se requiere caracterizar diversas bombas cuya potencia nominal se encuentra dentro de un rango preestablecido.

Por la naturaleza de los bancos de ensayo, las mediciones de las pruebas deben realizarse en condiciones estables, entonces se vuelve necesario tomar en cuenta que las velocidades de giro de la bomba ensayada pueden variar entre el 80% y el 120% de la velocidad de rotación nominal. Asimismo, el fluido de trabajo a utilizar durante estas pruebas es “agua fría limpia” (Tabla 2.1), con una temperatura menor de 40 °C, un estado lejano al punto de saturación y un contenido de aire mínimo, puesto que la presencia de aire disuelto puede alterar la provocación de la cavitación y los valores obtenidos de NPSHr resultantes de la prueba (ISO 9906:2012).

*Tabla 2.1: Propiedades del agua fría limpia*

*Fuente: ISO Standard No. 9906:2012*

<b>AGUA FRÍA LIMPIA</b>		
Propiedad	Unidad	Magnitud máxima
Temperatura	°C	40.0
Viscosidad cinemática	$m^2/s$	$1.75 \times 10^{-6}$
Densidad	$kg/m^3$	1050.0
Densidad de partículas libres no disueltas	$kg/m^3$	2.50
Densidad de partículas disueltas	$kg/m^3$	50

## 2.7.4 Tipos de pruebas NPSH

La norma ISO 9906 indica los siguientes tipos de ensayo (ISO 9906:2012):

### 2.7.4.1 Verificación de características garantizadas en un NPSHd especificado

Con este tipo de ensayo se procura comprobar que la bomba ensayada cumpla con las características garantizadas por el fabricante en sus catálogos, esto se realiza verificando si la bomba consigue operar con los rendimientos garantizados bajo una tasa de flujo correspondiente con un NPSHd específico. En otras palabras, lo que se debe hacer en estas pruebas es ajustar el NPSHd del banco de ensayos al valor indicado por el fabricante para determinar si la bomba opera bajo los rendimientos garantizados.

### 2.7.4.2 Determinación del NPSH3

En esta prueba se alteran las condiciones de operación del banco ensayo de manera que el  $NPSH_d$  en la entrada de la bomba ensayada se va disminuyendo progresivamente hasta que su altura neta H se disminuye en un 3% por la presencia de cavitación, por lo tanto, el valor resultante de NPSH para ese instante se denomina NPSH3 y se establece como el  $NPSH_r$  de la bomba. La norma indica que el  $NPSH_d$  en la entrada de la bomba se puede reducir utilizando metodologías que se clasifican según el comportamiento de las tasas de flujo que corren por el banco de pruebas:

- Determinación del NPSH3 para tasas de flujo variables: en los métodos que se incluyen dentro de esta clasificación el decremento del 3% de la altura neta H de la bomba se determina disminuyendo el caudal que corre por la red del sistema, ya sea alterando la abertura de una de las válvulas reguladoras, ya sea la de la entrada o la de la salida de la

bomba o también alterando el nivel del tanque, tal y como se muestra en la tabla 2.2. Básicamente se debe reducir el caudal al mismo tiempo que se monitorea el comportamiento de la altura neta de la bomba ensayada, hasta registrar una reducción del 3% de dicha variable para una tasa de flujo determinada; el  $NPSH_d$  que corresponde a estas circunstancias es el que se denomina NPSH3 y cumplirá con las funciones del  $NPSH_r$  de la bomba. Para obtener la curva de NPSH3 vs Q se deben obtener el NPSH3 de un mínimo de 5 tasas de flujo.

- Determinación del NPSH3 para tasas de flujo constantes: en los métodos que entran en esta clasificación se busca realizar exactamente lo mismo, pero manteniendo constante la tasa de flujo que corre por el sistema, esto se puede realizar alterando simultáneamente la abertura de ambas válvulas reguladoras, también con sistemas que involucran el uso de tanques de reserva presurizados o por regulación de temperatura del flujo (Tabla 2.3); puesto que el decremento del 3% de la altura neta se determina en base a la diferencia de presión entre la salida y la entrada de la bomba ensayada.

En las siguientes tablas 2.2 y 2.3 se presentan los métodos para determinar el NPSH3 clasificados según la modalidad de las tasas de flujo, ya sean variables o constantes (ISO 9906:2012):

Tabla 2.2: Métodos de obtención del NPSH3 con tasas de flujo variables

Fuente adaptada de: ISO Standard No. 9906:2012

<b>MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL NPSH3 CON TASAS DE FLUJO VARIABLES</b>			
<b>Tipo de instalación</b>	<b>Tanque abierto a la atmosfera</b>	<b>Tanque abierto a la atmosfera</b>	<b>Tanque abierto a la atmosfera</b>
<b>Variable independiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Válvula de regulación en entrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Válvula de regulación de salida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nivel del agua</li> </ul>
<b>Constante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Válvula de regulación de salida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Válvula de regulación en entrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Válvulas de regulación de salida y entrada</li> </ul>
<b>Variables dependientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>H</li> <li>Caudal</li> <li>NPSHd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>H</li> <li>Caudal</li> <li>NPSHd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>H</li> <li>Caudal</li> <li>NPSHd</li> <li>Nivel de agua</li> </ul>
<b>Curva de H vs Q</b>			
<b>Curva NPSH vs Q</b>			

Tabla 2.3: Métodos de obtención del NPSH3 con tasas de flujo constantes

Fuente adaptada de: ISO Standard No. 9906:2012

MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL NPSH3 CON TASAS DE FLUJO CONSTANTES				
Tipo de instalación	Tanque abierto	Tanque abierto	Tanque cerrado	Tanque cerrado
Variable independiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>Válvula de regulación en entrada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nivel del agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Presión en el tanque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura (presión de vapor)</li> </ul>
Constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caudal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caudal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caudal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caudal</li> </ul>
Variables dependientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>NPSHd</li> <li>H</li> <li>Válvula de regulación de salida (caudal constante)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NPSHd</li> <li>H total</li> <li>Válvula de regulación de salida (caudal constante)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NPSHd</li> <li>H total</li> <li>Válvula de regulación de salida (caudal constante)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NPSHd,</li> <li>H total,</li> <li>Válvula de regulación de salida (caudal constante)</li> </ul>
Curva característica de H vs Q y NPSH				
Curva NPSH característica vs caudal				

### 2.7.3.3 Verificación de la influencia limitada de la cavitación en el rendimiento de la bomba bajo condiciones especificadas

Este tipo de ensayo se realiza para verificar que el rendimiento hidráulico de la bomba no se vea afectado por la cavitación. Esto se comprueba ajustando las condiciones de operación del banco de ensayo hasta obtener el NPSH previo a la caída del 3% en el H total de la bomba. En otras palabras, este ensayo se utiliza para confirmar las propiedades que el fabricante ha garantizado tras caracterizar la bomba en lo que respecta al  $NPSH_r$  con los ensayos que se explicaron anteriormente.

# **Capítulo III: Diseño del banco de pruebas de cavitación**

### **Capítulo III: Diseño del banco de pruebas de cavitación**

En el presente capítulo se mostrarán todos los procesos involucrados en la formulación de la propuesta de diseño del banco de pruebas de cavitación; éstos se llevarán a cabo según las siguientes etapas:

1. Consideraciones de diseño: En este apartado se presentarán las consideraciones generales que se tomarán en cuenta para el desarrollo de los sistemas del banco de pruebas; entre las cuales destacan la selección del modelo bajo el cual se formulará la propuesta de diseño, la modalidad del ensayo de cavitación, el tipo de bombas y el rango de potencias nominales que se podrán ensayar, etc.
2. Diseño de la red de tuberías: Durante esta etapa se realizarán los cálculos respectivos para poder determinar la geometría de la red, el dimensionamiento de los componentes y la instrumentación más adecuada para el monitoreo de las variables involucradas en los ensayos de cavitación.
3. Diseño de la estructura de soporte: En esta etapa se presentará el diseño de la estructura de soporte, donde los componentes y las sujeciones se dimensionarán en base a las cargas máximas provocadas por la red de tuberías, durante los tiempos de operación.
4. Diseño del sistema eléctrico: A lo largo de esta etapa se dimensionarán los componentes del sistema eléctrico, en base a la potencia nominal máxima del rango preestablecido en la etapa de consideraciones de diseño.
5. Detalles de instalación: En esta esta etapa se abarcarán todos los aspectos no contemplados durante las etapas anteriores de diseño,

tales como adición de componentes o cambios en las dimensiones geométricas del prototipo.

Las etapas mostradas anteriormente se presentarán entre las secciones 3.1 y 3.5.

### **3.1 Consideraciones de diseño**

A lo largo de este apartado se darán a conocer los aspectos preliminares necesarios para iniciar correctamente el diseño del banco de ensayos. Cabe destacar que se tomarán en cuenta factores como el modelo de instalación, sus componentes y el tipo de ensayo. Es importante tener presente que el objetivo de este banco es provocar cavitación en las bombas ensayadas, por lo tanto, el diseño estará encaminado de diversas consideraciones que impulsarán a que este fenómeno ocurra.

#### **3.1.1 Modelo de instalación y su funcionamiento**

En la sección 2.7.1 del marco teórico se presentaron 4 tipos de instalaciones que se pueden utilizar en los bancos de ensayo para cavitación según la ISO 9906:

- Circuito cerrado con control por válvula
- Circuito cerrado con control de presión y temperatura
- Tanque abierto con control de nivel
- Tanque abierto con válvula de regulación

En la siguiente tabla se encuentran resumidas las características de cada uno de los modelos de instalación de los bancos de cavitación:

Tabla 3.1: Características de los modelos de instalación para bancos de ensayos de cavitación

<b>Modelos de instalación para bancos de ensayos de cavitación</b>				
<b>Modelo</b>	<b>Funcionalidad</b>	<b>Diseño</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b>Presupuesto</b>
<b>Circuito cerrado con control por válvula</b>	El NPSH en la entrada de la bomba se ajusta a través de una válvula de control instalada en la tubería de succión. Normalmente el tanque de reserva es abierto a la atmósfera.	El diseño de la red de tuberías se realiza en base al control del caudal que fluirá por el banco de pruebas.	Todos los componentes son fáciles de intervenir, así como la inspección visual se puede hacer sin mayor dificultad, lo cual facilita las tareas de mantenimiento.	El presupuesto de este modelo es el más reducido de entre los cuatro presentados, puesto que sus componentes no son tan sofisticados y son de fácil adquisición.
<b>Circuito cerrado con control de presión y temperatura</b>	El NPSH en la entrada de la bomba se ajusta mediante un sistema de control de presión y temperatura en el tanque de reserva.	Se requiere diseñar un sistema de control de temperatura y presión para el líquido de trabajo almacenado en el tanque de reserva	En este caso al ser el arreglo más complejo, el mantenimiento se complica ya que involucra un plan mantenimiento que incluya todos los componentes y subsistemas, tales como el tanque de reserva presurizado y su sistema de control de presión y temperatura.	El presupuesto de este arreglo es el más grande por sus componentes; además de que el mantenimiento requiere el pago de personal especializado.
<b>Tanque abierto con control de nivel</b>	El NPSH en la entrada de la bomba se regula según se aumenta la altura geodésica entre dicha ubicación y la superficie del líquido en el tanque de reserva.	El diseño de este modelo normalmente utiliza instalaciones de bombas en succión, ya que se requiere controlar la diferencia de cotas entre la superficie de tanque y la entrada de la bomba.	En esta ocasión a diferencia de los demás el mantenimiento se centraliza principalmente en el tanque de reserva, ya que se debe evitar que posea fugas para que la alteración de diferencia de niveles ocurra por la succión de la bomba.	El presupuesto de este modelo es bastante elevado por la construcción del tanque de reserva, ya que debe tener dimensiones significativas para que la diferencia de cotas provoque cavitación en la entrada de la bomba ensayada. Además de implicar una pérdida de recurso hídrico por ser un circuito abierto.
<b>Tanque abierto con válvula de regulación</b>	El NPSH en la entrada de la bomba es reducido a través de una válvula reguladora que se encuentra en la entrada de la tubería de succión.	El diseño de la red de tuberías es similar al del primer modelo, lo que cambia es la ubicación de la válvula reguladora en la tubería de succión.	Para realizar un mantenimiento correcto se tendría que vaciar por completo el tanque y el desacople de la válvula sería impráctico, al igual que la revisión del estado de la tubería.	El costo económico de este arreglo es bastante similar al del primer modelo, pero también conlleva pérdida de recurso hídrico por ser un circuito abierto.

### 3.1.1.1 Selección de modelo de instalación

En base a la información de la tabla 3.1, se plantean las siguientes conclusiones al respecto de cada uno de los modelos presentados:

- A pesar de que el modelo de instalación de “circuito cerrado con control de presión y temperatura” presenta una funcionalidad mayor que la de los demás para caracterizar bombas en lo que respecta a la cavitación, posee la dificultad de que se necesita un tanque presurizado con un sistema de regulación de temperatura y presión para poder llevar a cabo los ensayos; lo cual aumenta significativamente la dificultad de construcción del banco, puesto que requeriría un alto presupuesto para adquirir este componente mediante compra o se necesitaría de alta destreza y acceso a maquinaria especializada para fabricarlo.
- El modelo de “Tanque abierto con control de nivel” involucra dificultades técnicas y de presupuestarias, ya que se necesitaría de un depósito con las dimensiones de un pozo de agua potable para poder disminuir el  $NPSH_d$  en la entrada de la bomba hasta provocar la cavitación; por tal motivo los depósitos de este modelo normalmente son enterrados e implican un estudio de suelos y una planificación para la obra civil. Asimismo, consiste de un circuito abierto, lo cual provocaría un desperdicio considerable de agua, a menos que se posea otro depósito donde se pueda almacenar el agua impulsada por la bomba ensayada.
- En cuanto al modelo de “Tanque abierto con válvula de regulación”, a pesar de que el modo de regulación del  $NPSH_d$  en la entrada de la bomba es similar al del modelo de control por válvula, no se considera práctico ya que la válvula reguladora tendría que estar sumergida en el

tanque de reserva reserva, aparte de implicar un desperdicio del recurso hídrico por ser un circuito abierto.

Por los motivos explicados anteriormente, el prototipo del diseño se basará en el modelo de banco de circuito cerrado con regulación por válvula (mostrado en la sección 2.7.1.1 del marco teórico), debido a las siguientes razones:

- Mayor simplicidad de construcción.
- La mayoría de sus componentes se pueden adquirir en ferreterías convencionales
- La versatilidad para caracterizar los parámetros relacionados con la cavitación en bombas centrífugas es ligeramente similar a la del modelo de “control por presión y temperatura”.

En la siguiente imagen se muestra un esquema preliminar con los componentes que constituirán al prototipo del tipo de banco seleccionado:

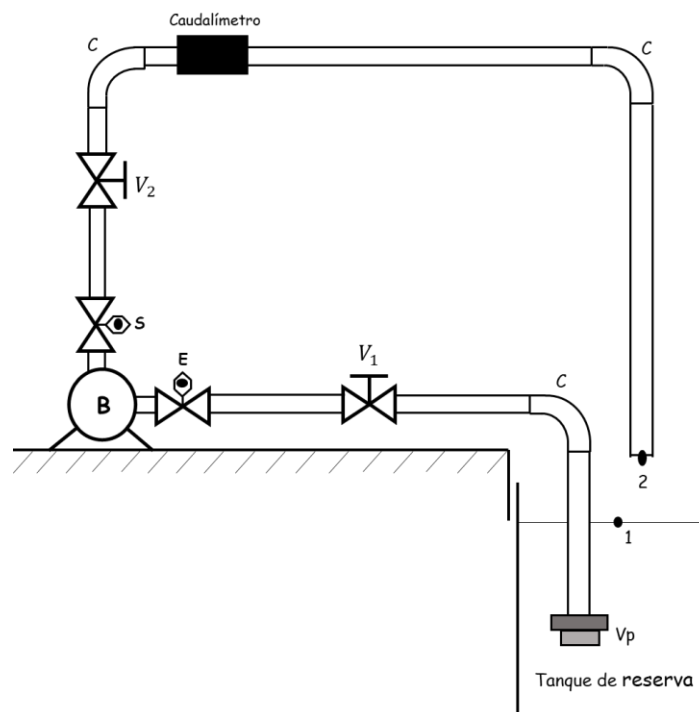


Figura 3.1: Esquema preliminar del banco de cavitación

Fuente propia

Tal y como se observa en la imagen anterior, preliminarmente el banco de cavitación estaría conformado por los siguientes componentes:

- Tanque de reserva: Almacena el fluido de trabajo.
- Caudalímetro: Dispositivo de medición para monitorear el caudal.
- *B*: Bomba ensayada.
- Tuberías.
- *E*: Dispositivo de medición que se utilizará para realizar las lecturas de presión en la entrada de la bomba.
- *S*: Dispositivo de medición que se utilizará para realizar las lecturas de presión en la salida de la bomba.
- *C*: Codos.
- *V*: Válvulas reguladoras de caudal.
- $V_p$ : Válvulas de pie (o de retención)

En la sección 3.1.1.2 se presentan diversas consideraciones que se han tenido en cuenta para los componentes que el banco posee. Asimismo, el ensamble completo del banco se sostendrá sobre una estructura de soporte, cuyo diseño se explica con mayor detalle en la sección 3.4.

### **3.1.1.2 Consideraciones para el diseño del modelo seleccionado**

Para poder desarrollar el diseño del banco se requiere tomar ciertas consideraciones para poder establecer los puntos de partida, en los distintos aspectos que involucra dicha actividad. De manera general, en lo relacionado con la funcionalidad del banco se tomarán los siguientes criterios para el diseño:

- Ya que el banco tendrá un carácter didáctico, las bombas que se podrán ensayar serán de fácil adquisición, por lo cual el rango

permisible de potencias nominales se establecerá en base a la oferta de bombas centrífugas que ofrecen las ferreterías convencionales locales; ya que se pretende que el costo de adquisición de las bombas ensayadas sea accesible para el presupuesto de la Escuela de Ingeniería Mecánica, en caso de que el diseño del banco pase a ser referencia para un proyecto de construcción del prototipo.

- El modelo del banco se habilitará únicamente para ensayar bombas centrífugas cuyo eje se encuentre en posición horizontal; asimismo, la instalación de las bombas ensayadas será en succión para facilitar la provocación de cavitación.
- El desarrollo del diseño del banco comprenderá 3 etapas, siendo la primera el diseño de la red de tuberías, la segunda el diseño del sistema de suministro de energía eléctrica y la tercera el diseño de la estructura de soporte del banco.
- El diseño de la red de tuberías se realizará en base a estimaciones de comportamientos de cavitación en la tubería de succión, puesto que el propósito del banco consiste en caracterizar dicho fenómeno en la entrada de la bomba ensayada; por lo cual, las dimensiones geométricas la red de tuberías dependerá principalmente de los resultados del diseño de la tubería de succión y los lineamientos de instalación que indica la norma ISO 9906. En otras palabras, la tubería de impulsión tendrá el mismo diámetro nominal que la de succión.
- Al mantener constante la presión atmosférica, el fenómeno de cavitación se presenta con mayor facilidad a medida se aumenta la temperatura del fluido de trabajo; por lo cual, el diseño de la red de tuberías se realizará considerando que el agua que correrá por el

banco se encontrará a una temperatura constante de 25°C y no con la temperatura máxima permisible por la ISO 9906 (tabla 2.1), ya que la dificultad del banco para provocar cavitación se aumenta a medida se disminuye la temperatura del agua de trabajo, teniendo en consideración también que la temperatura media en San Salvador para el año 2023 fue de alrededor de 25°C. (Figura AIII.1, Anexo III)

- En cuanto al diseño del sistema de suministro de energía eléctrica, éste se llevará a cabo tomando en cuenta las conexiones disponibles del local donde se instalará el banco, el cual será el taller industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador. Asimismo, deberá tener la capacidad para soportar el suministro energético de una bomba cuya potencia nominal sea la mayor permisible.
- La estructura de soporte del banco estará compuesta de piezas metálicas que serán diseñadas en base a los puntos críticos que soporten mayores cargas de peso.

Por otra parte, en lo que respecta a los componentes mostrados en la figura 3.1, se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones para poder desarrollar el diseño del banco:

- Se utilizarán válvulas de globo como válvulas reguladoras, ya que estos dispositivos son los más adecuados para cumplir la función de regular el caudal que fluye por el banco, debido a que utilizan el desplazamiento lineal de un elemento de cierre para regular el paso del flujo; lo cual permite tener control del porcentaje de abertura de la válvula. Además, las pérdidas que produce estas válvulas son propicias para impulsar el fenómeno de cavitación.

- En base al modelo de instalación seleccionado, se opta por instalar una válvula de pie en la entrada de la tubería de succión, ya que su mecanismo de retención sirve específicamente para impedir que el cebado de la bomba se pierda, pueden operar sumergidas y poseen un mecanismo de filtrado para evitar que residuos mayores ingresen a la red e interrumpan con el funcionamiento de la bomba ensayada.

### **3.1.1.3 Ensayo de cavitación a realizar**

Para explicar el funcionamiento del modelo seleccionado en la sección 3.1.1.1, se considera necesario describir el ensayo que se ejecutará con el prototipo resultante, puesto que los componentes preliminares del banco que se mostraron en la figura 3.1 se han determinado en base al procedimiento que se debe llevar a cabo para hacer ensayos que caractericen bombas en cuanto a lo referente al fenómeno de cavitación. Por lo tanto, El diseño de este banco de prueba sigue el objetivo de habilitarlo para realizar ensayos en donde se determina el NPSH3 con tasas de flujo variables, considerando los lineamientos de la ISO 9906. Para fines prácticos la prueba se denominará “Ensayo NPSH3” y su principio teórico se explica con mayor detalle en la sección 2.8.4.2 del marco teórico.

Básicamente lo que se realizará en esta prueba será disminuir el caudal del sistema para reducir el NPSHd en la entrada de la bomba ensayada, hasta que se registre una caída en la altura neta H de la bomba que equivalga al 3% del valor que debería tener bajo condiciones libres de cavitación. El NPSHd que corresponda a estas condiciones se denomina NPSH3 y cumple con las funciones del NPSHr, es decir, es el NPSH que corresponde con la presencia de cavitación en la entrada de la bomba.

Por otra parte, la metodología del ensayo NPSH3 se realizará según las recomendaciones que la ISO 9906 indica en su sección 5.7 de “Condiciones de prueba”, entre éstas se encuentran las siguientes:

- Se deben tomar como mínimo de 5 puntos de observación que dependerán directamente de las tasas de flujo ensayadas.
- Las tasas de flujo ensayadas deben garantizar que la eficiencia de operación de la bomba se encuentre del rango del 50% y el máximo porcentaje.

De modo que el proceso general del ensayo NPSH3 con tasas de flujo variables se muestra en la gráfica de la siguiente figura:

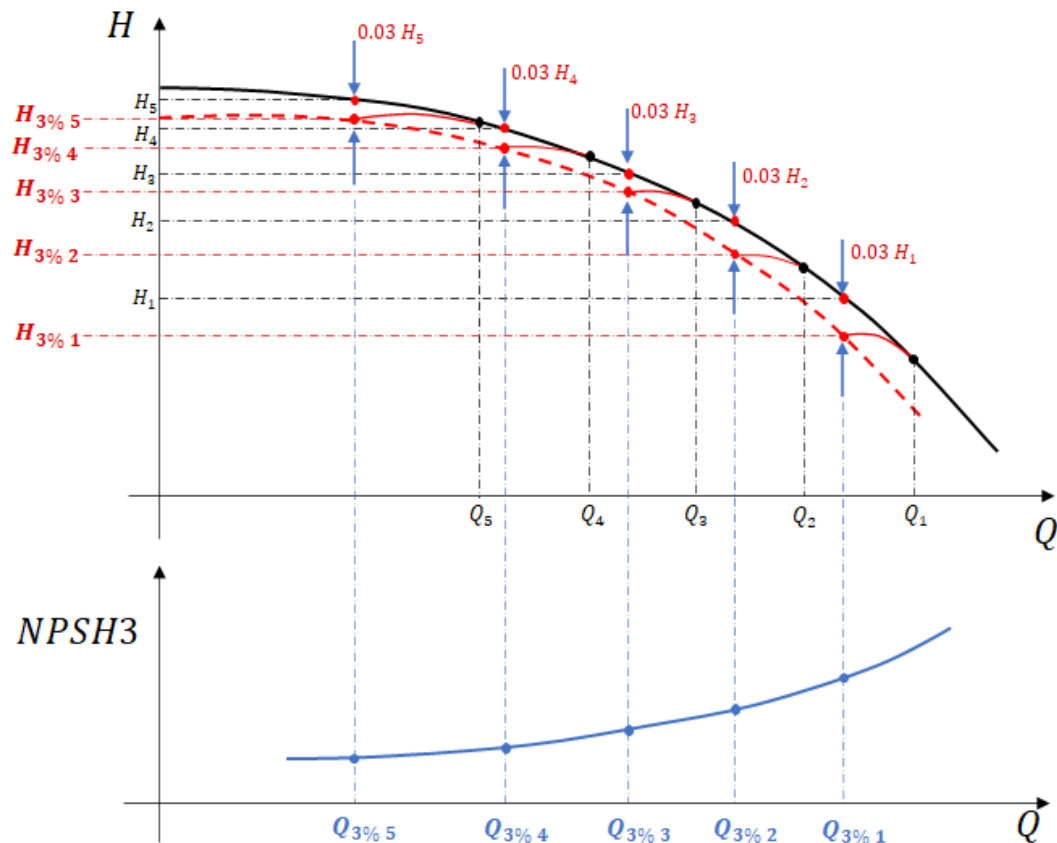


Figura 3.2: Gráficas NPSH3 vs Q resultantes del Ensayo NPSH3

Fuente propia

Es necesario explicar los términos presentados en la figura 3.2 para detallar lo que se llevará a cabo durante los ensayos; denominando con “n” al número del punto de observación, las variables de la gráfica anterior representan lo siguiente

- La curva característica de la bomba se marca la línea continua de color negro.
- La curva característica con el decremento del 3% se marca con la línea discontinua de color rojo.
- La curva NPSH3 vs Q se marca con la línea continua azul.
- $Q_n$ : Caudal inicial del punto de observación.
- $Q_{3\% n}$ : Caudal al cual ocurre el decremento del 3% en la altura neta.
- $H_n$ : Altura neta de la bomba cuando opera con el caudal  $Q_{3\% n}$  sin cavitación
- $H_{3\% n}$ : Altura neta de la bomba bajo condiciones de cavitación; difiere con  $H_n$  en un porcentaje de 3%
- $0.03 H_n$ : Diferencia entre  $H_n$  y  $H_{3\% n}$ ; señalizada en la figura 2.2 con las flechas de color azul.

Considerando el modelo seleccionado y lo que se muestra en la figura 3.2, para cada punto de observación el caudal inicial  $Q_n$  será estrangulado mediante las válvulas reguladoras hasta alcanzar el caudal  $Q_{3\% n}$ , con el cual la bomba opera bajo condiciones de cavitación y presenta la altura útil  $H_{3\% n}$ . Si la bomba operase sin cavitación con el caudal  $Q_{3\% n}$ , la altura útil que presentaría sería la de  $H_n$ ; sin embargo, la presencia de cavitación es la causante de que ocurra el decremento que equivale al 3% de  $H_n$ . Por lo tanto, el criterio para garantizar que la cavitación estará presente en la entrada de la bomba consiste en confirmar, experimentalmente, que la altura útil resultante del estrangulamiento difiera en un

3% del valor que debería tener, si la bomba estuviese operando con el mismo caudal en condiciones libres de cavitación.

Teniendo presentes las tres indicaciones anteriores y retomando el esquema del banco mostrado en la figura 3.2, los pasos a seguir para realizar los ensayos NPSH3 serán los siguientes:

1. Determinar la curva característica ( $H_n$  vs  $Q$ ) de la bomba ensayada con los datos de presión en sus ductos de entrada y salida, los cuales se obtienen al operarla con diversos porcentajes de abertura de la válvula reguladora  $V_2$  de la tubería de impulsión.
2. Establecer los porcentajes de abertura de la válvula reguladora  $V_2$  con los que se obtendrán las tasas de flujo iniciales  $Q_n$ . Los puntos de observación se registrarán según el porcentaje de abertura de dicha válvula.
3. Iniciar la operación de la bomba en el banco con la válvula  $V_1$  completamente abierta y ajustando la abertura de la válvula  $V_2$  al porcentaje que corresponde para el primer punto de observación, de manera que fluya el caudal  $Q_1$  por el banco.
4. Reducir gradualmente la abertura de la válvula  $V_1$  para estrangular el flujo al mismo tiempo que se debe tomar registro de las distintas presiones en la entrada y salida de la bomba.
5. Por cada disminución de la abertura de  $V_1$  se debe registrar el caudal resultante y calcular la altura neta con la diferencia de presiones, hasta alcanzar el caudal  $Q_{3\%1}$  con el que la bomba presentará la altura neta  $H_{3\%1}$ , la cual difiere en un 3% de la altura neta  $H_1$  que la bomba debería presentar si operase con el mismo caudal, pero en condiciones libres de cavitación.

6. Una vez se ha determinado el  $Q_{3\%1}$  tomar registro de la presión en la entrada de la bomba y calcular el NPSH3 para dicho caudal.
7. Ajustar nuevamente la válvula  $V_1$  para abrirla por completo y pasar al segundo caudal  $Q_2$  para repetir el mismo procedimiento.
8. Ensayar todos los 5 puntos de observación restantes y luego graficar la curva NPSH3 vs Q con los resultados registrados.

El anexo I del presente documento contiene información detallada sobre la guía de laboratorio del ensayo NPSH3; asimismo, se presenta el desarrollo de una aplicación que servirá para asistir a los laboratoristas al momento de realizar cálculos repetitivos y, también, se explican diversos procesos de laboratorio para comprobar que las propiedades físicas del agua utilizada durante el ensayo se mantengan dentro de los estándares establecidos por la ISO 9906

### **3.2 Diseño de la red de tuberías del banco**

El banco de ensayos tiene por objetivo caracterizar una bomba determinada en cuanto al comportamiento de la altura útil que ésta pueda ofrecer y la definición de la curva NPSH3 vs Q, la cual se utiliza para definir las condiciones de operación que propiciarían la cavitación en la entrada de dicha bomba; para tal efecto, el diseño de la red de tuberías consistirá en determinar el diámetro que producirá las pérdidas necesarias para provocar la cavitación en la entrada de la bomba, bajo ciertas condiciones de operación.

Cabe destacar que los resultados de los cálculos involucrados no serán definitivos, puesto que se realizarán tomando como referencia a una familia de bombas específica, lo cual en si no afectará a la capacidad del banco para definir las condiciones que propician la cavitación en cualquier bomba, puesto que lo que determina la presencia de este fenómeno es el decremento del 3% en la

altura útil para un caudal en específico. Por lo cual, además del diámetro de la tubería y la selección de los componentes más pertinentes, también se incluirá entre los resultados del diseño una estimación del rango permitido de caudales que se podrán ensayar en el banco para poder caracterizar a la bomba en lo referente a la curva NPSH3 vs Q.

El procedimiento lógico del diseño de la red de tuberías sigue los pasos que se describen a continuación:

1. Seleccionar la familia de bombas, el caudal y el NPSHr que servirán como referencia para los cálculos y estimaciones.
2. Determinar preliminarmente la longitud de la tubería de succión.
3. Determinar un diámetro preliminar para la red de tuberías garantizando un rango de caudales que puedan operar sin cavitación, ya que se requiere obtener su curva característica antes de graficar la curva NPSH3 vs Q.
4. Comprobar que el diámetro preliminar del banco pueda operar sin cavitación al impulsar los caudales que se encuentren dentro del rango seleccionado previamente; En base a los resultados, seleccionar el diámetro definitivo de la red de tuberías.
5. Establecer la geometría definitiva de la red de tuberías y seleccionar los componentes más pertinentes.

El desarrollo de los pasos descritos anteriormente se presenta en todo el contenido que se comprende entre las secciones 3.2.1 y 3.2.5.

### **3.2.1 Selección de la familia de bombas, el caudal y el NPSHr que servirán como referencia para el diseño del Banco de Ensayos.**

Como ya se había mencionado anteriormente, los cálculos involucrados dentro del diseño se realizarán tomando como referencia a una familia de bombas. Ésta se seleccionará considerando que el banco será utilizado para fines didácticos y que las bombas ensayadas serán de adquisición simple. Después de investigar la oferta en ferreterías convencionales locales, se observó que la potencia nominal de las bombas centrífugas ofertadas no sobrepasa los 7 hp; por lo cual, se selecciona a la familia de bombas centrífugas A1.5 X 1-7, de la Serie AG de la marca Franklin Electric, ya que en esta se incluyen bombas de hasta 7.5 hp de potencia nominal, tal y como se muestra en la figura 3.3 que contiene las curvas características de dicha familia.

En cuanto a la selección del caudal y el NPSHr de referencia, se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- La norma ISO 9906 establece que las tasas de flujo ensayadas deben garantizar que la bomba opere entre el 50% y el máximo de su eficiencia. En la figura 3.3 se muestra el rango aproximado de caudales que cumplen con esta condición, el cual va desde 40 gpm hasta 110 gpm.

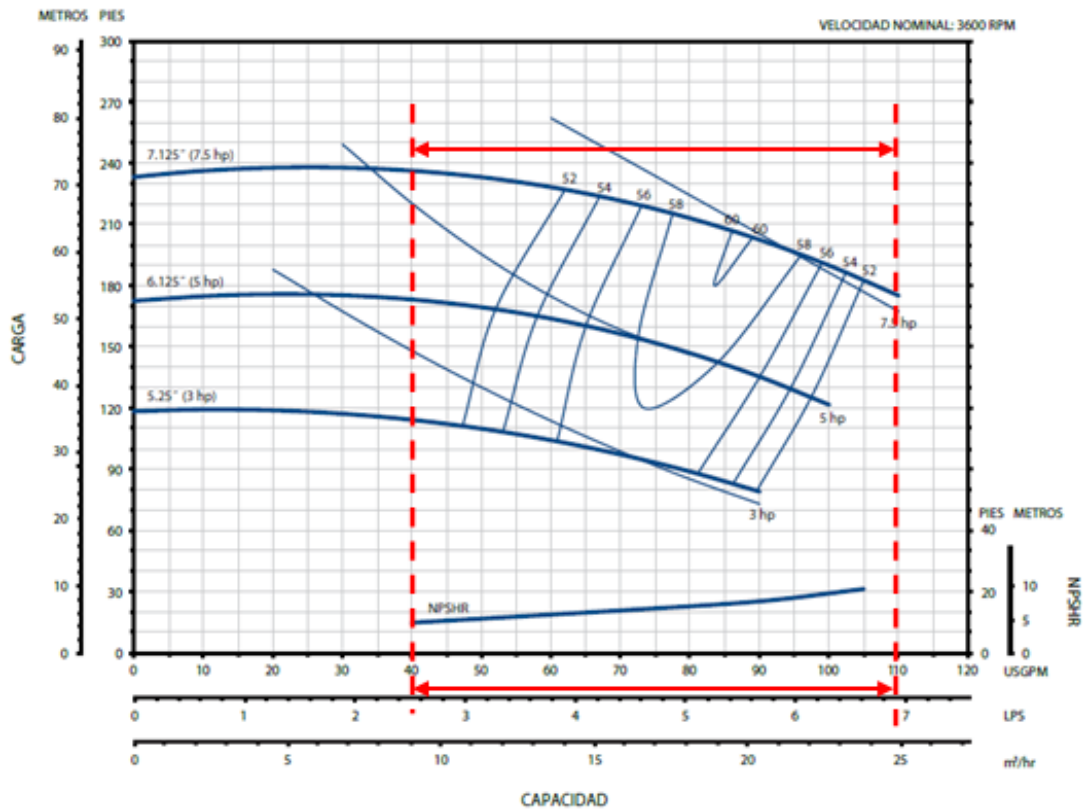


Figura 3.3: Curvas características de familia de bombas A1.5 X 1-7

Fuente: Franklin Electric. Catálogo Bombas Centrífugas: Serie AG.

- Tal y como se menciona en la sección 3.1.1.2, se requiere que el banco tenga la capacidad para determinar la curva característica de la bomba ensayada antes de determinar la curva NPSH3 vs Q; por lo tanto, el caudal que servirá como referencia será aquel que provoque las condiciones críticas de operación; es decir, donde ocurran las mayores presiones de succión sin entrar a condiciones de cavitación, lo cual ocurre al operar con la válvula  $V_1$  (figura 3.1) completamente abierta y el mayor caudal del rango permitido.

Tomando en cuenta las dos consideraciones anteriores, los límites de caudales que se presentan en la figura 3.3 y que no hay lectura de NPSHr para 100 gpm, se selecciona un caudal de referencia de 105 gpm, el cual presenta un

NPSHr de 9.5 m, para procurar que el caudal que presente el decremento del 3% se encuentre dentro del rango permitido.

En la siguiente imagen se muestran con líneas de color rojo la lectura de NPSHr para el caudal seleccionado:

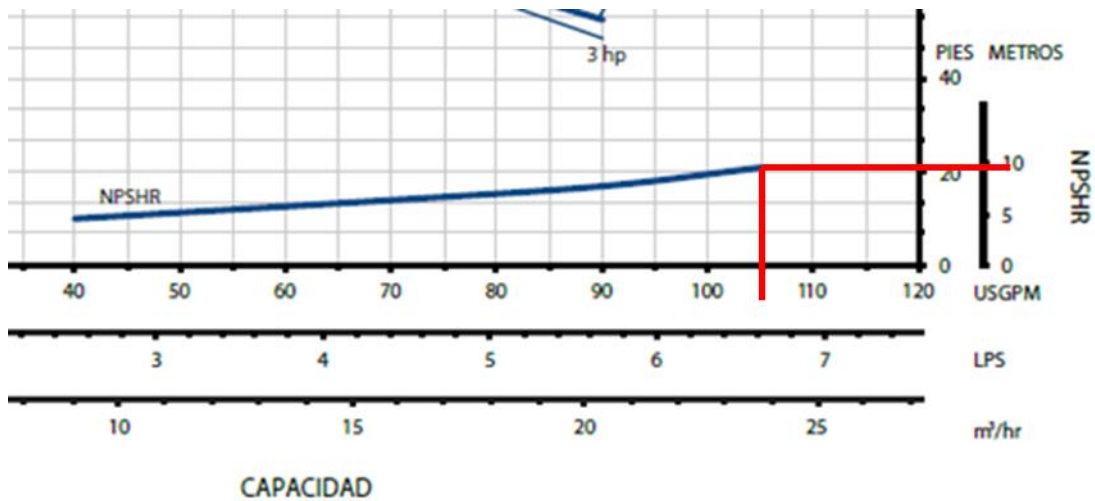


Figura 3.4: Lectura de NPSHr para 105 gpm. Curva NPSHr vs Q de familia de bombas A1.5 X 1-7

Fuente adaptada de: Franklin Electric. Catálogo Bombas Centrífugas: Serie AG.

### 3.2.2 Longitud preliminar de la tubería de succión

En la figura 3.5 se muestran las medidas preliminares que tendrá la tubería de succión; dichas longitudes se determinaron bajo los siguientes criterios:

- A las tuberías que se encuentran corrientes abajo y corrientes arriba de la válvula  $V_1$  se les ha designado una longitud de 20 centímetros por cuestiones de estética, también para obtener espacio suficiente para instalar la válvula  $V_1$  y el medidor de presión en la entrada de la bomba.
- La distancia geodésica entre la superficie del tanque y la línea de corriente de la entrada en la bomba se ha designado de 30 cm. Esto se ha determinado considerando las dimensiones de las bombas de la

familia A1.5 X 1-7 que se ha tomado como referencia para el diseño (Tabla AIII.1, Anexo III) y también considerando los cambios bomba conforme se realicen distintos ensayos de cavitación.

- La longitud  $S$  del tramo de la tubería que estará sumergida por debajo de la superficie del tanque se determinará preliminarmente bajo el criterio de “sumergencia”. La distancia resultante de proceso se volverá confirmar una vez que se haya determinado el diámetro de la tubería.

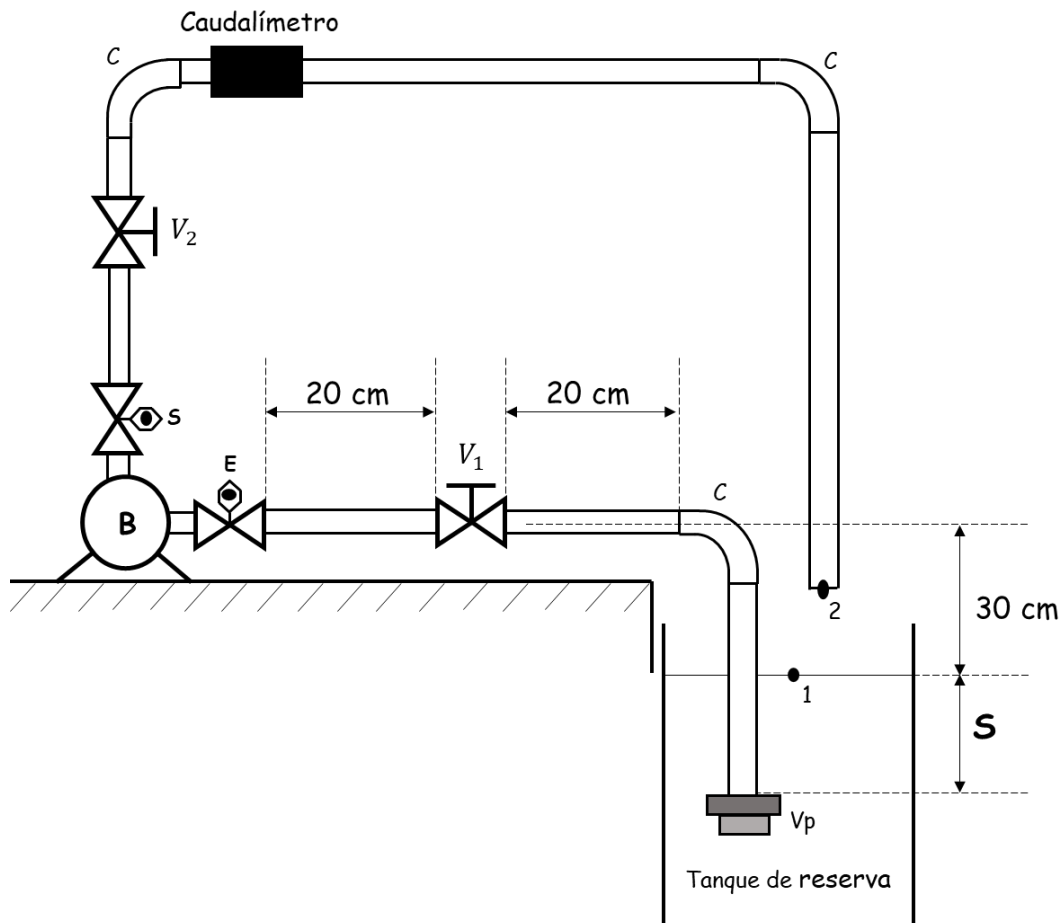


Figura 3.5: Medidas preliminares de la tubería de succión

Fuente propia

### 3.2.2.1 Sumergencia preliminar de la tubería de succión

La sumergencia es la altura de líquido necesaria, sobre la sección de entrada del tubo de aspiración para evitar la formación de remolinos o vórtices; es fundamental evitar esto para procurar que los resultados del ensayo no se vean afectados por variables no controladas. Para abolir este fenómeno se calcula la sumergencia requerida (Monge R, 2018):

$$S = \frac{v^2}{2g} + 0,5 \quad (3.1)$$

Dónde:

- $S$ : Sumergencia (m).
- $v$ : Velocidad del flujo en la entrada de la tubería (m/s)
- $g$ : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Sin embargo, se necesitaría conocer el diámetro de la tubería para poder determinar la velocidad de flujo a partir del caudal de referencia de 50 gpm. Por lo tanto, se optará por determinar una sumergencia preliminar utilizando la velocidad máxima para el flujo en tuberías de succión que recomienda el manual de sistemas de bombeo del departamento de energía de la Universidad de Oviedo (Tabla AIII.2, Anexo III), la cual posee una magnitud de 1.50 m/s. Por lo tanto, la sumergencia preliminar se define bajo la siguiente igualdad:

$$S = \frac{v^2}{2g} + 0,5 = \frac{1,50}{2 \cdot 9.81} + 0.50 \text{ m}$$

$$S = 0.58 \text{ m}$$

Por lo tanto, la entrada de la tubería tendrá que ubicarse a un mínimo de 0.58 m por debajo del nivel superior del agua en el tanque. Para tomar un margen

de seguridad, se utilizará una altura de 0.65 m, con lo cual se obtiene la siguiente longitud preliminar para la tubería de succión:

$$L = 20 \text{ cm} + 20 \text{ cm} + 0.30 \text{ cm} + 65 \text{ cm}$$

$$L = 125 \text{ cm} = 1.35 \text{ m}$$

### 3.2.3 Cálculo del diámetro preliminar de la tubería de succión

Teniendo en cuenta lo que se planteó en la sección 3.2.1, es importante reafirmar que el diámetro de tubería que se requiere determinar es aquel que permita que el banco opere sin cavitación dentro del rango de caudales permitidos, es decir, aquellos que provoquen que la eficiencia de la bomba ensayada se encuentre entre el 50% y su máximo porcentaje; puesto que se requiere determinar la curva característica de la bomba ensayada antes de realizar los procesos para graficar la curva NPSH3 vs Q.

Por lo tanto, el procedimiento lógico para calcular el diámetro preliminar de la tubería de succión consiste de dos pasos:

1. Tomando en cuenta el esquema del banco que se presenta en la figura 3.5, determinar el diámetro que provocará cavitación aplicando una serie de procesos matemáticos iterativos con las siguientes ecuaciones:
  - Ecuación que define al NPSH
  - Ecuación de pérdidas totales entre la superficie del tanque (posición 1) y la entrada de la bomba (E).
  - Ecuación del número de Reynolds.
  - Ecuación de Colebrook simplificada para determinar factores de pérdidas.

2. Posteriormente, seleccionar el diámetro inmediato superior para evitar que la cavitación se presente en la entrada de la bomba bajo las condiciones necesarias para determinar la curva característica.

En las secciones 3.2.3.1 y 3.2.3.2 se explica con detalle el desarrollo de los pasos descritos anteriormente.

### 3.2.3.1 Cálculo de diámetro que provocará cavitación en el banco.

El proceso para determinar el diámetro que provocará la cavitación se inicia recordando que en la sección 3.2.1 se seleccionaron los siguientes datos de referencia para dar inicio a los cálculos necesarios:

$$Q_{ref} = 105 \text{ GPM} = 6.624 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

$$NPSH_{r_{ref}} = 9.5 \text{ m}$$

Entonces, utilizando la ecuación 2.13, que es la segunda forma de definir el NPSH, y teniendo en cuenta el esquema preliminar del banco que se presenta en la figura 2.5, se obtiene la siguiente expresión:

$$NPSH_r = \frac{P_1 - P_v}{\rho g} - Z_{1-E} - H_{r_{1-E}} \quad (3.2)$$

Donde:

- La posición de la superficie del tanque de reserva se denomina con el número 1 y la entrada de la bomba con la letra E.
- $P_1$ : Presión en la superficie del tanque.
- $P_v$ : Presión de vapor del agua.
- $Z_{1-E}$ : Diferencia de altura geométrica entre la entrada de succión en la bomba y la superficie del tanque.
- $H_{r_{1-E}}$ : Pérdidas primarias y secundarias en la tubería de succión.

Considerando las propiedades del agua a 25 °C y que la altura geométrica desde la superficie del nivel de agua del tanque a la entrada de la bomba es de 0.30 m:

$$P_1 = 101.325 \text{ kPa} \quad P_v = 3.170 \text{ kPa}$$

$$\rho = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad Z_E = 0.30 \text{ m}$$

Sustituyendo en la ecuación 2.2

$$9.5 \text{ m} = \frac{(101.325 - 3.17) \cdot 10^3}{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - 0.30 \text{ m} - H_{r\ s-1}$$

Resolviendo para  $H_{r\ 1-E}$ :

$$H_{r\ 1-E} = 0.2357 \text{ m}$$

Asimismo, las pérdidas en la succión se pueden expresar de la siguiente manera:

$$H_{r\ 1-E} = H_{f\ 1-E} + H_s$$

$$H_{r\ 1-E} = f \left( \frac{v_E^2}{2g} \right) \left( \frac{L}{D} \right) + \left( \frac{v_E^2}{2g} \right) \left( \sum K \right)$$

La carga de velocidad se puede expresar también cómo:

$$\frac{v_E^2}{2g} = \frac{(Q/A)^2}{2g} = \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g}$$

Entonces:

$$H_{r\ 1-E} = H_{f\ 1-E} + H_s$$

$$H_{r\ 1-E} = \left( \frac{8Q_{ref}^2}{\pi^2 D^4 g} \right) * \left( f * \frac{L}{D} + \sum K \right) \quad (3.3)$$

Donde:

- $L$ : Longitud de la tubería de succión

- $D$ : Diámetro de la tubería

Es importante tomar en cuenta que la tubería de succión posee una válvula de pie ( $V_p$ ), un codo a  $90^\circ$  y una válvula de globo ( $V_1$ ) para regular el caudal; por lo cual la ecuación 3.3 quedaría en los siguientes términos:

$$H_{r\ 1-E} = H_{f\ 1-E} + H_s = \left( \frac{8Q_{ref}^2}{\pi^2 D^4 g} \right) * \left( f * \frac{L}{D} + K_{V_p} + K_{codo} + K_{V_1} \right) \quad (3.4)$$

Con respecto a los factores  $K$  de pérdidas en accesorios, se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El factor  $K$  de la válvula de pie se tomará a partir de la tabla de valores representativos que se encuentran especificados en la Tabla 11-6 del libro “Mecánica de Fluidos y Máquinas hidráulicas”, del autor Claudio Mataix (Tabla AIII.3, ANEXO III). Ya que los procesos iterativos para determinar el diámetro se iniciarán asumiendo un diámetro de 50 mm, se considerará un valor de  $K_{V_p} = 10$ ; esto se mantendrá de esta manera mientras el diámetro que resulte de las iteraciones no disminuya o no supere los 65 mm.
- El factor de pérdidas de la válvula de globo  $V_1$  se obtiene a partir de la tabla 6.2 del libro “Mecánica de fluidos” del autor Victor L. Streeter (Tabla AIII.4, Anexo III), la cual contiene coeficientes representativos para diversos accesorios. Dado que el diámetro de la tubería se está calculando para condiciones críticas libres de cavitación, se tomará el valor de  $K_{V_1} = 10$ , el cual corresponde a una abertura total de la válvula.
- El factor  $K$  de codo se obtiene a partir de los valores especificados en la tabla 8-4 que se encuentran en el libro “Mecánica de Fluidos: Fundamentos y aplicaciones”, del autor Yunus A. Cengel (Tabla AIII.5,

Anexo III). Por lo tanto, para este caso el factor del codo tomará un valor de  $K_{codo} = 0.9$ , valor representativo para los codos roscados.

Sustituyendo los valores conocidos, la ecuación 3.5 quedaría en los siguientes términos:

$$0.2357 = \left[ \frac{8 * \left( 6.624 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} \right)^2}{\pi^2 * D^4 * 9.81 \frac{m}{s^2}} \right] * \left( f * \frac{1.35 m}{D} + 10 + 0.9 + 10 \right)$$

$$0.2357 m = \frac{3.63 \times 10^{-6}}{D^4} \times \left( f * \frac{1.35 m}{D} + 20.09 \right) \quad (3.5)$$

Como ya fue mencionado anteriormente, tanto el factor  $f$  de pérdidas primarias como el diámetro de tubería  $D$  se determinan utilizando métodos iterativos con la ecuación anterior que define las pérdidas, el número de Reynolds y la ecuación simplificada de Colebrook:

- Número de Reynolds:

$$R_e = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{QD\rho}{A\mu} = \frac{4Q\rho}{\pi D\mu} = \frac{4Q}{\pi Dv} = \frac{4 * \left( 6.624 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} \right)}{\pi * D * \left( 8.937 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s} \right)}$$

$$R_e = \frac{9437.1}{D} \quad (3.6)$$

- Ecuación simplificada de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[ \left( \frac{\epsilon}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right]$$

La rugosidad relativa será nula ( $\epsilon = 0$ ), ya que las tuberías son de PVC (diagrama de moody, Figura AIII.3, Anexo III); entonces, despejando el factor  $f$ :

$$f = \left[ \frac{1}{-1.8 \log \left[ \frac{6.9}{Re} \right]} \right]^2 \quad (3.7)$$

Como ya se había mencionado en las consideraciones de los factores de pérdida en los accesorios, los procesos iterativos con las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7 se iniciarán asumiendo arbitrariamente un diámetro de 50 mm (5 cm). Asimismo, las iteraciones necesarias se realizarán con el auxilio de una hoja de cálculo. En la tabla 3.2 se muestran los resultados de las iteraciones:

Tabla 3.2: Resultados de procesos iterativos para determinar el diámetro de la tubería

Iteraciones para calcular el diámetro de tubería					
Iteración	D (mm)	Re	F	$\sum K_{\text{accesorios}}$	$D_{\text{result}}$ (mm)
1	50	188634	0.0157	20.09	132.8
2	132.8	71021.84	0.0192	17.4	128.31
3	128.31	73507.13	0.0190	17.4	128.31

En la tabla 3.2 se observa que la sumatoria de los factores de pérdidas y accesorios aumentó a partir de la segunda iteración; esto se debió a que el factor  $K_{Vp}$  de la válvula de pie disminuyó a un valor de  $K_{Vp} = 6.5$ , ya que el diámetro resultante de la primera iteración fue menor de 50 mm. Por lo tanto, en base a los resultados se concluye con que el diámetro crítico para iniciar la cavitación en la tubería debería poseer una magnitud de 128.31 mm.

### 3.2.3.2 Selección de diámetro nominal preliminar

Tomando en cuenta el diámetro crítico determinado en la tabla 3.2 e inspeccionando en las medidas de tuberías de PVC que ofrece el catálogo de la empresa Amanco, se tomarán como referencia los diámetros de las tuberías cuyo radio dimensional estándar (SDR) posea un valor de 17, pues este grupo de tuberías son las que presentan menores dimensiones y presiones de ruptura más altas (Tabla AIII.8, Anexo III); se selecciona preliminarmente la tubería con un diámetro nominal de 6 plg ( 150 mm) que presenta un diámetro medio interior de

148.46 mm, siendo este valor el inmediato superior al resultado en los cálculos de la sección anterior.

Sin embargo, a pesar de que el diámetro nominal de 6 in cumple con los requisitos, se considera que sus dimensiones son excesivas para la finalidad didáctica con la que se está diseñando el banco; por lo cual se optará por evaluar si se puede utilizar una tubería con un diámetro nominal inferior.

El proceso para realizar esta evaluación comprende los siguientes pasos:

1. Estimar la presión en la entrada de la bomba, aplicando los principios de Bernoulli entre esta ubicación y la superficie del tanque, evaluando un caudal de 105 GPM y un diámetro nominal de 4 in ( $D_{int} = 100.84 \text{ mm}$ ).
2. Aplicar la ecuación 2.12 para determinar el NPSHd con la presión estimada en la entrada de la bomba.
3. Comprobar que el NPSHd obtenido sea mayor que el NPSHr registrado para 105 GPM, para garantizar que el banco opere sin cavitación dentro del rango de caudales permitido.

Por lo tanto, antes de iniciar los cálculos se debe considerar lo siguiente:

- La válvula de globo en la tubería de succión se considera completamente abierta, por lo tanto, los factores de pérdidas en accesorios se obtienen de las mismas fuentes bibliográficas y tomarán los siguientes valores:

$$K_{V_1} = 10 \quad K_{V_p} = 7.0 \quad K_{codo} = 0.9$$

- Se utilizará una hoja de cálculo para facilitar las operaciones lógicas y matemáticas necesarias para determinar si diámetro nominal de 4 in

que permitirá que el banco opere sin cavitación con un caudal de 105 GPM.

- Las especificaciones del diámetro evaluado se obtendrán del catálogo de la empresa Amanco (Tabla AIII.8, Anexo III), en donde se ofrecen tuberías normadas con diversas dimensiones.

La comprobación inicia por definir las ecuaciones que se utilizarán durante los procesos matemáticos; por lo tanto, tomando en cuenta el esquema de la figura 3.5, se procede a aplicar Bernoulli entre la superficie del tanque y la entrada de la bomba para definir la ecuación de la presión en la entrada de la bomba:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} + Z_E + H_{r1-E}$$

$$P_E = - \left[ \left( \frac{8 Q_E^2}{\pi^2 D^4 g} \right) + Z_E + H_{r1-E} \right] * \rho g$$

$$P_E = - \left[ \left( \frac{8 Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \left( 1 + f * \frac{L}{D} + K_{codo} + K_{v1} + K_{vp} \right) + Z_E \right] * \rho g \quad (3.8)$$

$$P_E = - \left[ \left( \frac{8 Q_E^2}{\pi^2 D^4 (9.81)} \right) \left( 1 + f * \frac{1.35}{D} + K_{codo} + K_{v1} + K_{vp} \right) + 0.30 \right] * 9780.57 \quad (3.9)$$

Considerando las propiedades del agua a 25°C, el número de Reynolds se define en función del caudal en la entrada de la bomba y el diámetro preliminar:

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi D\mu} = \frac{4Q}{\pi D\nu} = \frac{4 * Q_E}{\pi * D * \left( 8.937 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s} \right)} \quad (3.10)$$

El factor de fricción se vuelve a definir con la ecuación 3.7, que se obtiene a partir de la ecuación de Colebrook simplificada:

$$f = \left[ \frac{1}{-1.8 \log \left[ \frac{6.9}{Re} \right]} \right]^2$$

El NPSHd en la entrada de la bomba se obtiene con la presión  $P_E$  y la ecuación 2.12 que muestra la definición original de este parámetro. Cabe destacar que la presión  $P_E$  es relativa, por lo cual se le debe adicionar la presión atmosférica, ya que la magnitud de la presión de vapor es absoluta:

$$NPSH_d = \frac{P_E + P_{atm}}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{(P_E + P_{atm} - P_v) \cdot 10^3 \text{ Pa}}{\rho g} + \frac{8Q_E^2}{\pi^2 D^4 g}$$

$$NPSH_d = \frac{(P_E + 101.325 - 3.17) \cdot 10^3 \text{ Pa}}{991 \cdot 9.81} + \frac{8Q_E^2}{\pi^2 D^4 g}$$

$$NPSH_d = \frac{(P_E + 98.155) \cdot 10^3 \text{ Pa}}{9780.57} + \frac{8(Q_E)^2}{\pi^2 D^4 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} \quad (3.11)$$

En la tabla 3.3 se muestra el resultado de la comprobación:

Tabla 3.3: Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 105 GPM

<b>Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 105 GPM</b>	
<b><math>Q</math> (GPM)</b>	105
$Q$ ( $m^3/s$ )	0.006624
<b><math>NPSH_r</math> (m)</b>	9.5
<b><math>D_{nom}</math> (in)</b>	4
$D_{int}$ (mm)	100.84
$Re$	93591.27
$f$	0.0181
$K_{codo}$	0.9
$K_{V1}$	10
$K_{Vp}$	7
$P_E$ (kPa)	-9.50
<b><math>NPSH_d</math> (m)</b>	9.10
<b>CONDICIÓN</b>	<b>CAVITACIÓN</b>

Con los resultados de la tabla 3.3, se comprueba que el banco no sería capaz de operar sin cavitación al impulsar un flujo de 105 GPM con una tubería de 4 in; por lo tanto, se opta por disminuir el caudal máximo permisible a 100 GPM y comprobar nuevamente si con éste se conseguirían condiciones libres de cavitación.

En la figura 3.6 se muestra la lectura de NPSHr que se tomará como referencia para el caudal máximo de 100 GPM

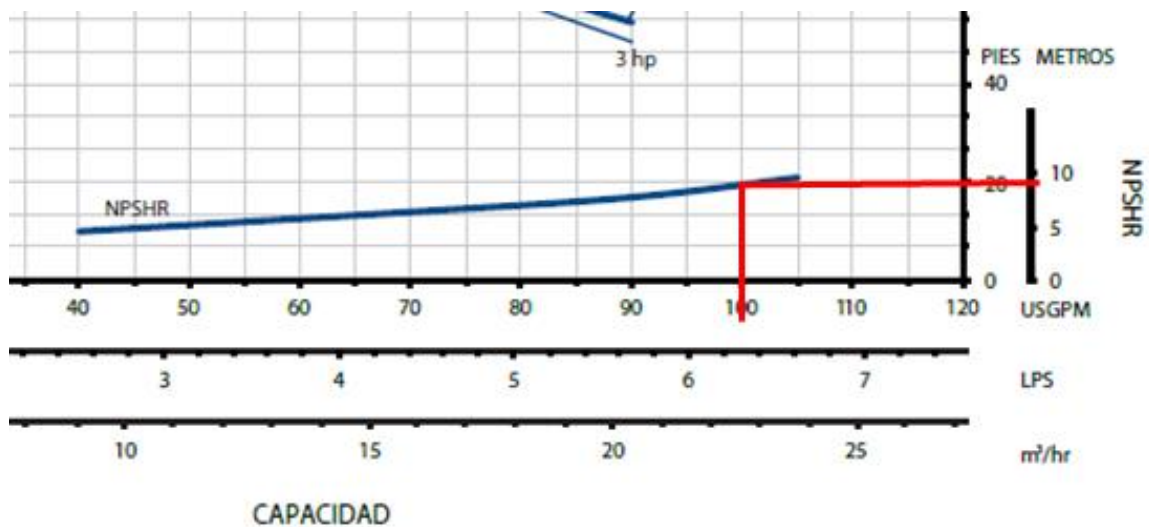


Figura 3.6: Lectura de NPSHr para 100 GPM

Fuente adaptada de: Franklin Electric. Catálogo Bombas Centrífugas: Serie AG

$$Q_E = 100 \text{ GPM} = 6.309 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$NPSHr = 9.0 \text{ m}$$

Aplicando las mismas ecuaciones para la comprobación, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3.4:

Tabla 3.4: Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 100 GPM

<b>Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 100 GPM</b>	
<b><math>Q</math> (GPM)</b>	100
$Q$ ( $m^3/s$ )	0.006309
<b><math>NPSH_r</math> (m)</b>	9
<b><math>D_{nom}</math> (in)</b>	4
$D_{int}$ (mm)	100.84
$Re$	89134.54
$f$	0.0183
$K_{codo}$	0.9
$K_{V_1}$	10
$K_{V_p}$	7.0
$P_E$ (kPa)	-8.89
<b><math>NPSH_d</math> (m)</b>	9.16
<b>CONDICIÓN</b>	<b>NO CAVITA</b>

Según los resultados de la tabla 3.4, una tubería de PVC con diámetro nominal de 4 in ( $D_{int} = 100.84$  mm) permite que el banco opere sin cavitación con un caudal máximo de 100 GPM.

Sin embargo, al investigar la oferta de válvulas de globo en ferreterías locales, se observó que el diámetro nominal máximo disponible es de 2 in ( $d_{int} = 53.21$  mm), por lo cual se opta por utilizar reductores de sección para poder realizar la instalación de estos accesorios; esto implica comprobar que estos componentes adicionales no provoquen cavitación en la entrada de la bomba cuando el banco opere con la válvula  $V_1$  completamente abierta.

Para determinar el factor de pérdida del reductor de sección se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El factor de pérdida del reductor se obtendrá de la gráfica 11-5 del libro de “Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas” de Claudio Mataix (Figura AIII.1, Anexo III).
- Las lecturas del factor de pérdida de los reductores se muestran en la figura 3.8 y se determina a partir de la relación entre el diámetro interno de la sección mayor ( $D_{int}$ ) y el de la sección menor ( $d_{int}$ ). Asimismo, el tipo de contracción del reductor se considerará “brusca” ( $\alpha = 180^\circ$  - figura 3.7) para evaluar las pérdidas bajo condiciones críticas.
- Se considera que el reductor que se instalará en la salida de la válvula V1 para regresar la sección a un diámetro nominal de 4 in no provoca pérdidas energéticas.
- Las magnitudes de los diámetros internos de las secciones se obtienen a partir del catálogo de Amanco (Tabla AIII.8, Anexo III).

En la figura 3.7 se muestra un esquema general de los reductores de sección:

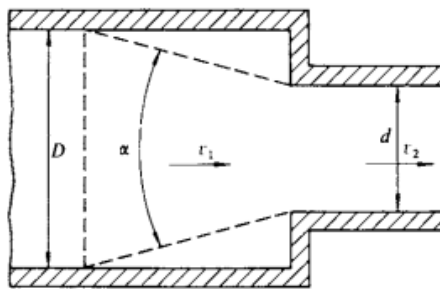


Figura 3.7: Esquema de reductores de sección

Fuente: C. Mataix. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2° Edición

El proceso para determinar el factor de pérdida inicia por calcular la relación de diámetros internos:

$$\frac{D_{int\ 4\ in}}{d_{int\ 2\ in}} = \frac{100.84\ mm}{53.21\ mm} = 1.86$$

En la figura 3.8 se muestran las lecturas de los factores de pérdida para los reductores de sección al considerar una contracción brusca ( $\alpha = 180^\circ$ ):

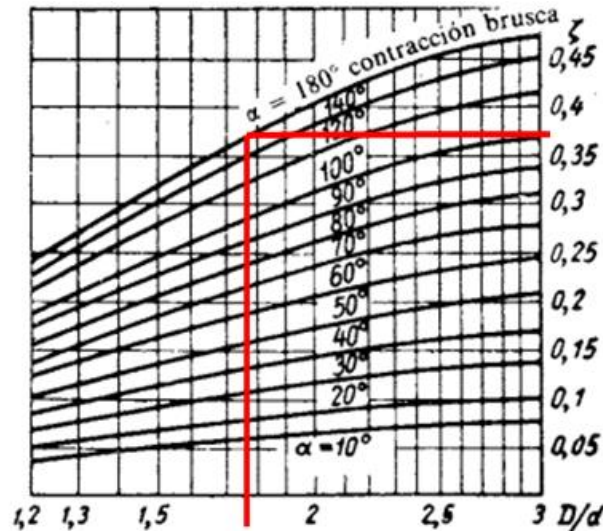


Figura 3.8: Lecturas de factores de pérdida para reductores de sección

Fuente adaptada de: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Capítulo 11.

En la figura 3.8 se muestran la lectura del factor de pérdida para los reductores de sección:

$$K_{4-2\ in} = 0.37$$

Por lo tanto, la ecuación 3.9, que determina la presión en la entrada de la bomba, tomará los siguientes términos durante la nueva evaluación de condiciones libres de cavitación para el diámetro preliminar:

$$P_E = - \left[ \left( \frac{8 Q_E^2}{\pi^2 D^4 (9.81)} \right) \left( 1 + f * \frac{1.35}{D} + K_{codo} + K_{V1} + K_{4-2\ in} + K_{Vp} \right) + 0.30 \right] * 9780.57 \quad (3.12)$$

En la tabla 3.5 se muestra el resultado de la nueva evaluación de condiciones libres de cavitación para el diámetro preliminar:

Tabla 3.5: Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 100 GPM

<b>Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 100 GPM</b>	
$Q_E$ (gpm)	100
$Q_E$ (m <sup>3</sup> /s)	0.006309
$NPSH_r$ (m)	9
$D_{nom}$ (in)	4
$D_{int}$ (mm)	100.84
$Re$	89134.54
$f$	0.0183
$K_{codo}$	0.9
$K_{V_1}$	10
$K_{V_p}$	7.0
$K_{4-2in}$	0.37
$P_E$ (kPa)	-9.00
$NPSH_d$ (m)	9.15
<b>CONDICIÓN</b>	<b>NO CAVITA</b>

En base a los resultados de la tabla 3.5, se estima que con una tubería de 4 in no se provocará cavitación en la entrada de la bomba cuando el banco opere dentro del rango de caudales de  $40 \text{ GPM} \leq Q_E \leq 100 \text{ GPM}$ , con la válvula de globo en la tubería de succión completamente abierta; lo cual lo habilita para poder determinar la curva característica de la bomba ensayada.

### **3.2.4 Comprobación estados de cavitación para el diámetro de la red de tuberías**

Antes de establecer el diámetro de 4 in como el diámetro nominal definitivo de la red de tuberías del banco, es necesario comprobar que el banco tenga la capacidad tanto para operar sin cavitación dentro del rango de caudales permitidos ( $40 \text{ GPM} \leq Q_E \leq 100 \text{ GPM}$ ); ya que se requiere que tenga capacidad para obtener la curva característica de la bomba ensayada para dichos caudales; una vez comprobada la ausencia de cavitación, se procede a postular dicho diámetro nominal como el definitivo para la red de tuberías.

Asimismo, es necesario observar el comportamiento que el banco hipotéticamente podría presentar a medida se va disminuyendo el caudal durante la evaluación puntos de observación de los ensayos de cavitación; esto se realiza comparando los valores de NPSHd en la entrada del banco para diversos caudales con las lecturas de NPSHr para los mismos, suponiendo que a medida que se disminuye el caudal evaluado, el valor del factor K de la válvula V1 irá aumentando, puesto que su abertura decrece gradualmente para reducir el caudal que fluye por el banco.

Por lo tanto, este procedimiento se realizará siguiendo los siguientes pasos:

1. Determinar las lecturas de NPSHr para los caudales del rango permitido.
2. Comprobar que el banco pueda operar libre de condiciones de cavitación para todos los caudales del rango permitido, con la válvula  $V_1$  completamente abierta.
3. Estimar el comportamiento del NPSHd en la entrada de la bomba a medida se disminuye el caudal, aumentando gradualmente el

valor del factor K de la válvula V1 en la succión, hasta que el NPSH de dicha ubicación sea menor al NPSHr registrado. Cabe destacar que los valores del factor de la válvula V1 serán arbitrarios, debido a la falta de información bibliográfica sobre valores representativos para distintas aberturas en válvulas de globo.

El desarrollo de los pasos descritos anteriormente se muestra con mayor detalle entre las secciones 3.2.4.1 y 3.2.4.3.

### 3.2.4.1 Lecturas de NPSHr para el rango de caudales permitido

Tal y como se determinó en la sección 3.2.3.2, el rango de caudales permitidos es  $40 \text{ GPM} \leq Q_E \leq 100 \text{ GPM}$ , tal y como se muestra en la figura 3.9:

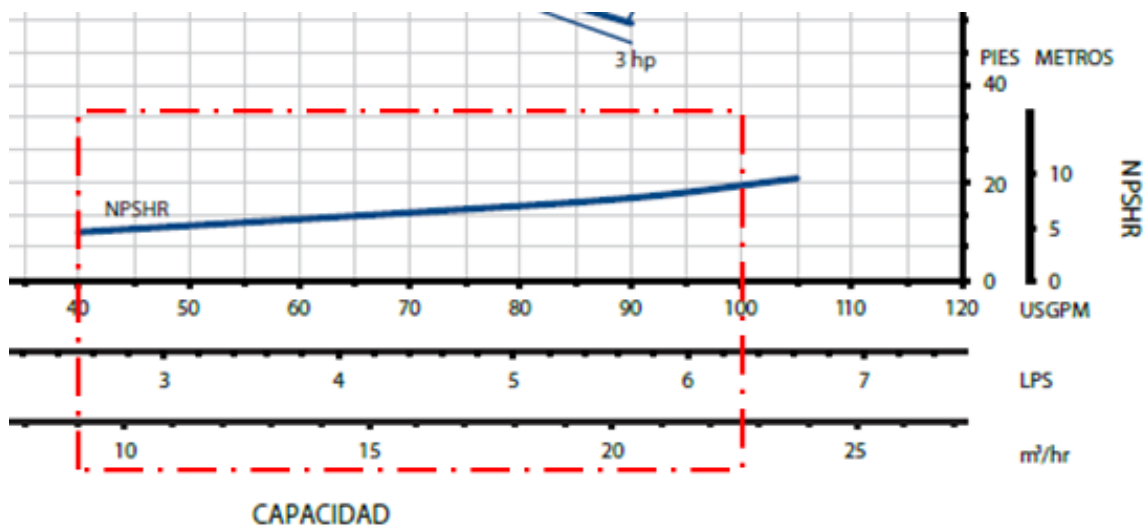


Figura 3.9: Rango de caudales permisibles para pruebas de cavitación

Fuente adaptada de: Franklin Electric. Bombas Centrífugas: Serie AG acoplada a motor.

En la figura 3.9 se muestra la curva NPSHr vs Q de la familia de bombas que se ha utilizado como referencia durante los procesos de diseño de la tubería; Dado que se pretende comprobar los estados de cavitación para cada uno de los caudales permitidos, se deben realizar lecturas de NPSHs en dicha curva; sin embargo, es bastante complicado encontrar por simple inspección la magnitud

de NPSHr para cada caudal que se encuentra dentro del rango permitido, por lo tanto, se opta por dividir el rango de caudales en varios intervalos que poseerán un valor representativo de NPSHr, el cual se otorgará en base a las lecturas que se puedan realizar en la figura 3.9.

En la tabla 3.6 se definen los intervalos y sus valores representativos de NPSHr:

*Tabla 3.6: Lecturas en la curva de NPSHr de familia de bombas de la serie AG- Franklin Electric*

<b>Lecturas en la curva NPSHr vs Q</b>			
Caudal (GPM)	NPSHr (m)	Caudal (GPM)	NPSHr (m)
40	4.5	71-75	6.8
41-45	4.7	76-80	7.0
46-50	5.0	81-85	7.3
51-55	5.5	86-90	7.5
56-60	6.0	91-95	8.0
61-65	6.3	96-100	9.0
66-70	6.5		

### **3.2.4.2 Comprobación de ausencia de cavitación con válvula $V_1$ completamente abierta**

Se procede a comprobar si el banco podrá operar con el rango de caudales permitidos sin cavitación cuando la válvula  $V_1$  en la tubería de succión se encuentre completamente abierta; recordando que esto es requerido para determinar la curva característica de la bomba.

Para realizar este proceso se deben seguir los siguientes pasos:

1. Determinar la presión en la entrada de la bomba con la ecuación 3.12, considerando que la válvula  $V_1$  se encuentra completamente abierta ( $K_{V_1} = 21.07$ ):

$$P_E = - \left[ \left( \frac{8 Q_E^2}{\pi^2 D^4 (9.81)} \right) \left( 1 + f * \frac{1.35}{D} + K_{codo} + K_{V_1} + K_{4-2 in} + K_{vp} \right) + 0.30 \right] * 9780.57$$

2. Calcular el NPSHd con la ecuación 3.11:

$$NPSH_d = \frac{(P_E + 98.155) \cdot 10^3 Pa}{9780.57} + \frac{8(Q_E)^2}{\pi^2 D^4 \left( 9.81 \frac{m}{s^2} \right)}$$

3. Comparar si el NPSHd resultante es mayor que el NPSHr que de la tabla 3.6.

Se utiliza una hoja de cálculo para facilitar los procesos matemáticos; los resultados se muestran en la siguiente página.

Tabla 3.7: Comprobación de condiciones libres de cavitación con válvula  $V_1$  completamente

Comprobación de condiciones libres de cavitación con válvula V1 completamente abierta											
$D_{nom}$ (in)	4	$D_{int}$ (mm)	100.84	$f$	$K_{codo}$	$K_{V_1}$	$K_{A-2 in}$	$K_{V_p}$	$P_E$ (kPa)	$NPSH_d$ (m)	CONDICIÓN
$Q$ GPM	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$NPSH_r$ (m)	$Re$								
100	0.006309	9.00	89134.54	0.0183	0.9	10	0.37	7	-9.00	9.15	NO CAVITA
99	0.006246	9.00	88243.20	0.0183	0.9	10	0.37	7	-8.88	9.16	NO CAVITA
98	0.006183	9.00	87351.85	0.0183	0.9	10	0.37	7	-8.76	9.17	NO CAVITA
97	0.006120	9.00	86460.51	0.0184	0.9	10	0.37	7	-8.65	9.18	NO CAVITA
96	0.006057	9.00	85569.16	0.0184	0.9	10	0.37	7	-8.53	9.19	NO CAVITA
95	0.005994	8.00	84677.82	0.0185	0.9	10	0.37	7	-8.41	9.20	NO CAVITA
94	0.005930	8.00	83786.47	0.0185	0.9	10	0.37	7	-8.30	9.22	NO CAVITA
93	0.005867	8.00	82895.13	0.0185	0.9	10	0.37	7	-8.19	9.23	NO CAVITA
92	0.005804	8.00	82003.78	0.0186	0.9	10	0.37	7	-8.07	9.24	NO CAVITA
91	0.005741	8.00	81112.44	0.0186	0.9	10	0.37	7	-7.96	9.25	NO CAVITA
90	0.005678	7.50	80221.09	0.0187	0.9	10	0.37	7	-7.85	9.26	NO CAVITA
89	0.005615	7.50	79329.74	0.0187	0.9	10	0.37	7	-7.74	9.27	NO CAVITA
88	0.005552	7.50	78438.40	0.0188	0.9	10	0.37	7	-7.64	9.28	NO CAVITA
87	0.005489	7.50	77547.05	0.0188	0.9	10	0.37	7	-7.53	9.29	NO CAVITA
86	0.005426	7.50	76655.71	0.0189	0.9	10	0.37	7	-7.43	9.30	NO CAVITA
85	0.005363	7.30	75764.36	0.0189	0.9	10	0.37	7	-7.32	9.31	NO CAVITA
84	0.005300	7.30	74873.02	0.0190	0.9	10	0.37	7	-7.22	9.32	NO CAVITA
83	0.005236	7.30	73981.67	0.0190	0.9	10	0.37	7	-7.12	9.33	NO CAVITA
82	0.005173	7.30	73090.33	0.0191	0.9	10	0.37	7	-7.02	9.34	NO CAVITA
81	0.005110	7.30	72198.98	0.0191	0.9	10	0.37	7	-6.92	9.35	NO CAVITA
80	0.005047	7.00	71307.64	0.0192	0.9	10	0.37	7	-6.82	9.36	NO CAVITA
79	0.004984	7.00	70416.29	0.0192	0.9	10	0.37	7	-6.73	9.37	NO CAVITA
78	0.004921	7.00	69524.94	0.0193	0.9	10	0.37	7	-6.63	9.38	NO CAVITA
77	0.004858	7.00	68633.60	0.0193	0.9	10	0.37	7	-6.54	9.39	NO CAVITA
76	0.004795	7.00	67742.25	0.0194	0.9	10	0.37	7	-6.44	9.40	NO CAVITA
75	0.004732	6.80	66850.91	0.0194	0.9	10	0.37	7	-6.35	9.40	NO CAVITA
74	0.004669	6.80	65959.56	0.0195	0.9	10	0.37	7	-6.26	9.41	NO CAVITA
73	0.004606	6.80	65068.22	0.0195	0.9	10	0.37	7	-6.17	9.42	NO CAVITA
72	0.004542	6.80	64176.87	0.0196	0.9	10	0.37	7	-6.08	9.43	NO CAVITA
71	0.004479	6.80	63285.53	0.0197	0.9	10	0.37	7	-6.00	9.44	NO CAVITA
70	0.004416	6.50	62394.18	0.0197	0.9	10	0.37	7	-5.91	9.45	NO CAVITA
69	0.004353	6.50	61502.84	0.0198	0.9	10	0.37	7	-5.83	9.46	NO CAVITA
68	0.004290	6.50	60611.49	0.0198	0.9	10	0.37	7	-5.74	9.46	NO CAVITA
67	0.004227	6.50	59720.15	0.0199	0.9	10	0.37	7	-5.66	9.47	NO CAVITA
66	0.004164	6.50	58828.80	0.0200	0.9	10	0.37	7	-5.58	9.48	NO CAVITA
65	0.004101	6.30	57937.45	0.0200	0.9	10	0.37	7	-5.50	9.49	NO CAVITA

64	0.004038	6.30	57046.11	0.0201	0.9	10	0.37	7	-5.42	9.49	NO CAVITA
63	0.003975	6.30	56154.76	0.0202	0.9	10	0.37	7	-5.35	9.50	NO CAVITA
62	0.003912	6.30	55263.42	0.0203	0.9	10	0.37	7	-5.27	9.51	NO CAVITA
61	0.003848	6.30	54372.07	0.0203	0.9	10	0.37	7	-5.20	9.52	NO CAVITA
60	0.003785	6.00	53480.73	0.0204	0.9	10	0.37	7	-5.12	9.52	NO CAVITA
59	0.003722	6.00	52589.38	0.0205	0.9	10	0.37	7	-5.05	9.53	NO CAVITA
58	0.003659	6.00	51698.04	0.0206	0.9	10	0.37	7	-4.98	9.54	NO CAVITA
57	0.003596	6.00	50806.69	0.0206	0.9	10	0.37	7	-4.91	9.54	NO CAVITA
56	0.003533	6.00	49915.35	0.0207	0.9	10	0.37	7	-4.84	9.55	NO CAVITA
55	0.003470	5.50	49024.00	0.0208	0.9	10	0.37	7	-4.77	9.56	NO CAVITA
54	0.003407	5.50	48132.65	0.0209	0.9	10	0.37	7	-4.71	9.56	NO CAVITA
53	0.003344	5.50	47241.31	0.0210	0.9	10	0.37	7	-4.64	9.57	NO CAVITA
52	0.003281	5.50	46349.96	0.0211	0.9	10	0.37	7	-4.58	9.58	NO CAVITA
51	0.003218	5.50	45458.62	0.0212	0.9	10	0.37	7	-4.52	9.58	NO CAVITA
50	0.003155	5.00	44567.27	0.0213	0.9	10	0.37	7	-4.45	9.59	NO CAVITA
49	0.003091	5.00	43675.93	0.0214	0.9	10	0.37	7	-4.39	9.59	NO CAVITA
48	0.003028	5.00	42784.58	0.0215	0.9	10	0.37	7	-4.34	9.60	NO CAVITA
47	0.002965	5.00	41893.24	0.0216	0.9	10	0.37	7	-4.28	9.61	NO CAVITA
46	0.002902	5.00	41001.89	0.0217	0.9	10	0.37	7	-4.22	9.61	NO CAVITA
45	0.002839	4.70	40110.55	0.0218	0.9	10	0.37	7	-4.17	9.62	NO CAVITA
44	0.002776	4.70	39219.20	0.0219	0.9	10	0.37	7	-4.11	9.62	NO CAVITA
43	0.002713	4.70	38327.85	0.0220	0.9	10	0.37	7	-4.06	9.63	NO CAVITA
42	0.002650	4.70	37436.51	0.0221	0.9	10	0.37	7	-4.01	9.63	NO CAVITA
41	0.002587	4.70	36545.16	0.0223	0.9	10	0.37	7	-3.96	9.64	NO CAVITA
40	0.002524	4.50	35653.82	0.0224	0.9	10	0.37	7	-3.91	9.64	NO CAVITA

Según los resultados de la tabla 3.7, se estima que el diámetro de 4 in permitirá que el banco opere sin cavitación dentro de rango de caudales permisible ( $40 \text{ GPM} \leq Q_E \leq 100 \text{ GPM}$ ) con la válvula  $V_1$  completamente abierta; por lo cual, se utilizarán tuberías de PVC con este diámetro nominal para montar la red del banco de ensayos. Por otra parte, se observa que el NPSHd en la entrada de la bomba aumenta a medida se disminuye el caudal cuando la abertura de la válvula se mantiene constante; esto significa que durante los ensayos la válvula  $V_1$  se deberá cerrar cada vez más para alcanzar las condiciones de cavitación, conforme se evalúen caudales menores. Esto se comprobará en la siguiente sección.

### 3.2.4.3 Estimación del comportamiento del NPSHd en la entrada de la bomba bajo condiciones de cavitación

Para estimar el comportamiento del NPSHd en la entrada de la bomba ensayada, bajo condiciones de cavitación, se deberá aumentar arbitrariamente el valor del factor K de la válvula V1 hasta alcanzar un valor que sea menor que la lectura de NPSHr de la tabla 3.6. Al igual que en la sección anterior, en este caso también se utilizará una hoja de cálculo para desarrollar los procesos matemáticos necesarios:

Tabla 3.8: Comprobación de condiciones de cavitación con válvula V<sub>1</sub> con distintas aberturas

Comportamiento del NPSHd del banco bajo condiciones de cavitación											
$D_{nom}$ (in)	4	$D_{int}$ (mm)	100.84	$f$	$K_{codo}$	$K_{V_1}$	$K_{4-2 in}$	$K_{V_P}$	$P_E$ (kPa)	$NPSH_d$ (m)	CONDICIÓN
$Q$ GPM	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$NPSH_r$ (m)	$Re$								
100	0.006309	9.00	89134.54	0.0183	0.9	15	0.37	7	-10.56	8.99	CAVITACIÓN
99	0.006246	9.00	88243.20	0.0183	0.9	16	0.37	7	-10.71	8.97	CAVITACIÓN
98	0.006183	9.00	87351.85	0.0183	0.9	17	0.37	7	-10.86	8.96	CAVITACIÓN
97	0.006120	9.00	86460.51	0.0184	0.9	18	0.37	7	-10.99	8.94	CAVITACIÓN
96	0.006057	9.00	85569.16	0.0184	0.9	19	0.37	7	-11.11	8.93	CAVITACIÓN
95	0.005994	8.00	84677.82	0.0185	0.9	52	0.37	7	-20.21	8.00	CAVITACIÓN
94	0.005930	8.00	83786.47	0.0185	0.9	54	0.37	7	-20.39	7.98	CAVITACIÓN
93	0.005867	8.00	82895.13	0.0185	0.9	55	0.37	7	-20.29	7.99	CAVITACIÓN
92	0.005804	8.00	82003.78	0.0186	0.9	57	0.37	7	-20.45	7.97	CAVITACIÓN
91	0.005741	8.00	81112.44	0.0186	0.9	58	0.37	7	-20.33	7.98	CAVITACIÓN
90	0.005678	7.50	80221.09	0.0187	0.9	79	0.37	7	-25.24	7.48	CAVITACIÓN
89	0.005615	7.50	79329.74	0.0187	0.9	81	0.37	7	-25.24	7.48	CAVITACIÓN
88	0.005552	7.50	78438.40	0.0188	0.9	83	0.37	7	-25.22	7.48	CAVITACIÓN
87	0.005489	7.50	77547.05	0.0188	0.9	85	0.37	7	-25.19	7.48	CAVITACIÓN
86	0.005426	7.50	76655.71	0.0189	0.9	87	0.37	7	-25.14	7.49	CAVITACIÓN
85	0.005363	7.30	75764.36	0.0189	0.9	98	0.37	7	-27.10	7.29	CAVITACIÓN
84	0.005300	7.30	74873.02	0.0190	0.9	101	0.37	7	-27.19	7.28	CAVITACIÓN
83	0.005236	7.30	73981.67	0.0190	0.9	103	0.37	7	-27.05	7.29	CAVITACIÓN
82	0.005173	7.30	73090.33	0.0191	0.9	106	0.37	7	-27.10	7.29	CAVITACIÓN
81	0.005110	7.30	72198.98	0.0191	0.9	109	0.37	7	-27.13	7.28	CAVITACIÓN
80	0.005047	7.00	71307.64	0.0192	0.9	127	0.37	7	-30.12	6.98	CAVITACIÓN
79	0.004984	7.00	70416.29	0.0192	0.9	130	0.37	7	-30.02	6.99	CAVITACIÓN
78	0.004921	7.00	69524.94	0.0193	0.9	134	0.37	7	-30.10	6.98	CAVITACIÓN
77	0.004858	7.00	68633.60	0.0193	0.9	137	0.37	7	-29.96	6.99	CAVITACIÓN
76	0.004795	7.00	67742.25	0.0194	0.9	141	0.37	7	-29.98	6.99	CAVITACIÓN

75	0.004732	6.80	66850.91	0.0194	0.9	156	0.37	7	-31.90	6.79	CAVITACIÓN
74	0.004669	6.80	65959.56	0.0195	0.9	161	0.37	7	-31.98	6.78	CAVITACIÓN
73	0.004606	6.80	65068.22	0.0195	0.9	165	0.37	7	-31.87	6.79	CAVITACIÓN
72	0.004542	6.80	64176.87	0.0196	0.9	170	0.37	7	-31.89	6.79	CAVITACIÓN
71	0.004479	6.80	63285.53	0.0197	0.9	175	0.37	7	-31.87	6.79	CAVITACIÓN
70	0.004416	6.50	62394.18	0.0197	0.9	200	0.37	7	-34.87	6.49	CAVITACIÓN
69	0.004353	6.50	61502.84	0.0198	0.9	206	0.37	7	-34.86	6.49	CAVITACIÓN
68	0.004290	6.50	60611.49	0.0198	0.9	212	0.37	7	-34.80	6.49	CAVITACIÓN
67	0.004227	6.50	59720.15	0.0199	0.9	219	0.37	7	-34.85	6.49	CAVITACIÓN
66	0.004164	6.50	58828.80	0.0200	0.9	226	0.37	7	-34.85	6.49	CAVITACIÓN
65	0.004101	6.30	57937.45	0.0200	0.9	248	0.37	7	-36.78	6.29	CAVITACIÓN
64	0.004038	6.30	57046.11	0.0201	0.9	256	0.37	7	-36.77	6.29	CAVITACIÓN
63	0.003975	6.30	56154.76	0.0202	0.9	265	0.37	7	-36.83	6.28	CAVITACIÓN
62	0.003912	6.30	55263.42	0.0203	0.9	273	0.37	7	-36.72	6.29	CAVITACIÓN
61	0.003848	6.30	54372.07	0.0203	0.9	283	0.37	7	-36.80	6.29	CAVITACIÓN
60	0.003785	6.00	53480.73	0.0204	0.9	319	0.37	7	-39.73	5.99	CAVITACIÓN
59	0.003722	6.00	52589.38	0.0205	0.9	330	0.37	7	-39.70	5.99	CAVITACIÓN
58	0.003659	6.00	51698.04	0.0206	0.9	342	0.37	7	-39.72	5.99	CAVITACIÓN
57	0.003596	6.00	50806.69	0.0206	0.9	354	0.37	7	-39.68	5.99	CAVITACIÓN
56	0.003533	6.00	49915.35	0.0207	0.9	367	0.37	7	-39.67	5.99	CAVITACIÓN
55	0.003470	5.50	49024.00	0.0208	0.9	433	0.37	7	-44.58	5.49	CAVITACIÓN
54	0.003407	5.50	48132.65	0.0209	0.9	449	0.37	7	-44.53	5.49	CAVITACIÓN
53	0.003344	5.50	47241.31	0.0210	0.9	467	0.37	7	-44.58	5.49	CAVITACIÓN
52	0.003281	5.50	46349.96	0.0211	0.9	485	0.37	7	-44.53	5.49	CAVITACIÓN
51	0.003218	5.50	45458.62	0.0212	0.9	505	0.37	7	-44.57	5.49	CAVITACIÓN
50	0.003155	5.00	44567.27	0.0213	0.9	588	0.37	7	-49.41	4.99	CAVITACIÓN
49	0.003091	5.00	43675.93	0.0214	0.9	613	0.37	7	-49.43	4.99	CAVITACIÓN
48	0.003028	5.00	42784.58	0.0215	0.9	639	0.37	7	-49.42	4.99	CAVITACIÓN
47	0.002965	5.00	41893.24	0.0216	0.9	667	0.37	7	-49.43	4.99	CAVITACIÓN
46	0.002902	5.00	41001.89	0.0217	0.9	696	0.37	7	-49.38	4.99	CAVITACIÓN
45	0.002839	4.70	40110.55	0.0218	0.9	775	0.37	7	-52.36	4.69	CAVITACIÓN
44	0.002776	4.70	39219.20	0.0219	0.9	811	0.37	7	-52.35	4.69	CAVITACIÓN
43	0.002713	4.70	38327.85	0.0220	0.9	850	0.37	7	-52.38	4.69	CAVITACIÓN
42	0.002650	4.70	37436.51	0.0221	0.9	890	0.37	7	-52.30	4.69	CAVITACIÓN
41	0.002587	4.70	36545.16	0.0223	0.9	935	0.37	7	-52.33	4.69	CAVITACIÓN
40	0.002524	4.50	35653.82	0.0224	0.9	1022	0.37	7	-54.28	4.49	CAVITACIÓN

En base a los resultados de la tabla 3.7, se observa que el NPSHd presenta el comportamiento de la gráfica de la figura 3.10, cuando la abertura de la válvula V1 se mantiene constante:

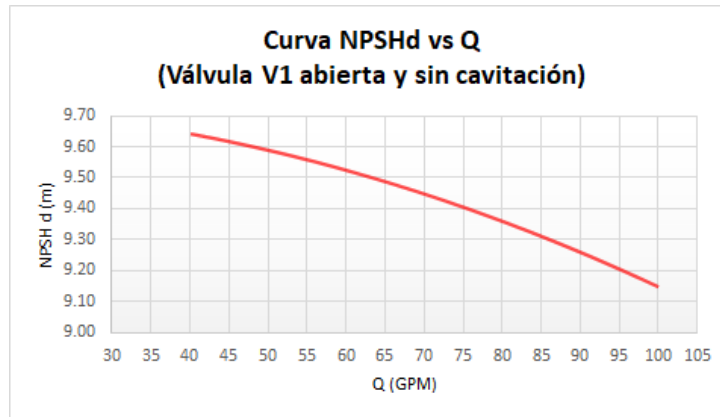


Figura 3.10: Curva NPSHd vs Q con válvula V1 abierta y sin cavitación

La tendencia del NPSHd en la gráfica de la figura 3.10 se debe a que las pérdidas son mayores a medida se ensayan caudales mayores manteniendo la abertura de la válvula constante. Por el contrario, cuando se procura provocar la cavitación con el banco, los valores de NPSHd presentan el comportamiento que se muestra en la figura 3.11, la cual se construyó con los resultados de la tabla 3.8:

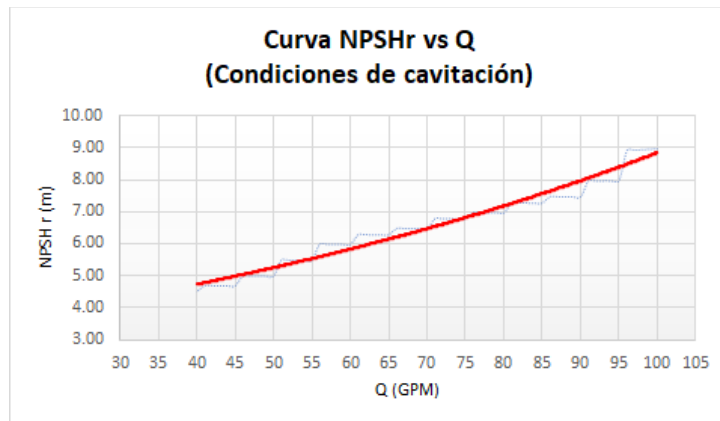


Figura: 3.11: Curva NPSHr vs Q bajo condiciones de cavitación

El comportamiento del NPSHr en la figura 3.10 confirma que a medida que el caudal inicial sea menor durante los ensayos, mayor tendrá que ser la reducción de la abertura de la válvula V1 para alcanzar las condiciones de cavitación del NPSH3, ya que el decremento en las pérdidas primarias debe ser compensado con el aumento en las pérdidas secundarias.

### **3.2.5 Selección de componentes y estimación de las dimensiones de las tuberías**

Durante las secciones anteriores se determinó el diámetro oficial de las tuberías del banco, sin embargo, todavía falta seleccionar todos los accesorios que se utilizarán para el montaje, pues durante las estimaciones del diseño solo se tomaron factores de pérdidas que las fuentes bibliográficas consideran como representativos para cada tipo de accesorio.

Asimismo, falta seleccionar los dispositivos de medición que se utilizarán para monitorear las variables involucradas en los ensayos de cavitación. Por lo tanto, durante esta sección se seleccionarán los componentes más pertinentes y se establecerán las dimensiones definitivas de la red de tuberías del banco; para tal efecto, los procedimientos requeridos se realizarán según los siguientes pasos:

1. Determinar la sumergencia de la tubería de succión utilizando el caudal máximo del rango de caudales permisibles.
2. Establecer la forma cómo se instalarán los componentes de la red de tuberías.
3. Seleccionar los componentes de la red de tuberías (tubería, accesorios y dispositivos de medición).
4. Determinar el tipo de tanque de reserva que se utilizará y seleccionar su modelo en base a las condiciones de operación del banco.
5. Estimar las dimensiones aproximadas de las tuberías de succión e impulsión en base a los criterios de instalación que establece la norma ISO-9906, la sumergencia definitiva y las dimensiones de las instalaciones de los componentes utilizados.

Cada uno de los pasos se desarrollarán entre las secciones 3.2.5.1 y 3.2.5.4. Cabe destacar que las especificaciones de los diámetros nominales que se mencionarán se encuentran en la Tabla AIII.8, del Anexo III. Estas medidas son regidas bajo la norma ASTM D-2241 y se han obtenido del catálogo de Amanco.

### 3.2.5.1 Cálculo de la sumergencia definitiva del banco

Como ya se mencionó en la sección 3.2.2.1, la sumergencia es la distancia que una tubería de succión debería estar sumergida por debajo de nivel de la superficie de la reserva para evitar que ocurra el fenómeno de vórtice en la entrada de dicha tubería; para el caso del banco, dicho fenómeno podría alterar los datos obtenidos durante las pruebas de cavitación. Entonces, durante esa sección se determinó una sumergencia preliminar que se utilizó para los cálculos del diámetro de la tubería del banco; dicha sumergencia no se consideró definitiva porque se calculó en base a las velocidades de flujo máximas recomendadas por el manual de sistemas de bombeo del departamento de energía de la Universidad de Oviedo (Tabla AIII.2, Anexo III).

En esta sección se calculará la sumergencia definitiva utilizando el caudal máximo permisible de 100 *GPM* ( $0.006309 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y el diámetro interno de la tubería de 4 in ( $D_{int} = 100.84 \text{ mm}$ ). Partiendo de la ecuación 2.1 que define a la sumergencia y utilizando el caudal máximo permisible, resulta la expresión:

$$S = \frac{v^2}{2g} + 0,5$$

$$S = \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} + 0.5$$

$$S = \frac{8Q_{max}^2}{\pi^2 D_{int \ 4 \ in}^4 g} + 0.5 \quad (3.13)$$

Sustituyendo los valores conocidos, se obtiene el siguiente resultado:

$$S = \frac{8 * (0.006309 \text{ m}^3/\text{s})^2}{\pi^2 * (0.10084 \text{ m})^2 * (9.81 \text{ m}/\text{s}^2)} + 0.5$$

$$S = 0.5003 \text{ m} \cong 50 \text{ cm}$$

Anteriormente, en la sección 3.2.2.1 la sumergencia preliminar resultó con una magnitud de 58 cm y, para establecer un margen de seguridad, se utilizó una magnitud de 65 cm durante los cálculos del diseño de la tubería. En este caso la sumergencia calculada con el caudal máximo permisible ha resultado ser menor que la preliminar:

$$S < S_{preliminar} \rightarrow \rightarrow \rightarrow 50 \text{ cm} < 58 \text{ cm}$$

Entonces se opta por continuar utilizando una sumergencia de 65 cm para mantener el margen de seguridad y evitar el fenómeno del vórtice en la entrada de la tubería:

$$S_{def} = 65 \text{ cm}$$

Por lo tanto, la longitud total de la tubería de succión se sigue manteniendo con una magnitud es 1.25 m.


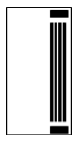

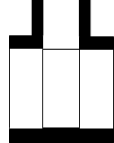

### 3.2.5.2 Instalación de los componentes de la red de tuberías.

Antes de seleccionar los componentes de la red de tuberías, se debe establecer la ubicación más conveniente para los accesorios de control de flujo y los diversos dispositivos de medición; por lo cual, en esta sección se detallarán cada uno de estos aspectos.

Cabe destacar que la mayoría de las instalaciones involucran el uso de adaptadores de rosca, reductores de sección y uniones de diversos tipos; por lo cual estos componentes se representarán en los esquemas de las instalaciones con las figuras que se muestran en la tabla 3.9:

Tabla 3.9: Figuras representativas de los componentes de la red de tuberías

Fuente propia

Figuras representativas de los componentes de la red de tuberías					
Componente	Adaptador macho	Adaptador hembra	Reductor de sección	Unión TE	Unión Universal
Figura representativa					

Por lo tanto, tomando en cuenta el funcionamiento del banco y los componentes que se presentan en la figura 3.1, en las siguientes secciones se describirán con detalle las siguientes instalaciones:

- Instalación de las válvulas reguladoras
- Instalación de la válvula de Pie
- Instalación de los dispositivos medidores de presión
- Instalación de la válvula desairadora
- Instalación del medidor de caudal
- Instalación de la tubería de descarga

### A. Instalación de las válvulas reguladoras de caudal

En la sección 3.2.3.2 se estableció que se utilizarían válvulas de globo de 2 in de diámetro nominal y se optó por usar reductores de sección para la instalación de estos accesorios; en base a los productos disponibles en el catálogo de la empresa Amanco (Figura AIII.8, Anexo III), se tomarán las siguientes consideraciones:

Se utilizarán reductores de sección de 4 a 2 in para el acople entre las tuberías y las válvulas.

Debido a que las válvulas de globo normalmente son roscadas, se requerirán de adaptadores macho de 2 in para la conexión entre la válvula y los reductores.

Las tuberías deben regresar a un diámetro nominal de 4 in corrientes debajo de las válvulas, por lo cual se deberán instalar reductores de la misma medida en la salida de las válvulas.

En la tabla 3.10 se muestran los componentes de las instalaciones en cuestión:

*Tabla 3.10: Componentes de las instalaciones de las válvulas reguladoras*

<b>Componentes de las instalaciones de las válvulas reguladoras</b>	
Componente	Cantidad
Reductor de sección 4-2 in	2
Adaptador macho 2 in	2
Válvula de globo 2 in	1

En consecuencia, en base a las dimensiones de los reductores y de las válvulas de globo (Figura AV.1, Anexo IV), se estima que las instalaciones de las válvulas de globo tendrán una longitud aproximada de 25 cm, tal y como se muestra en la figura 3.12:

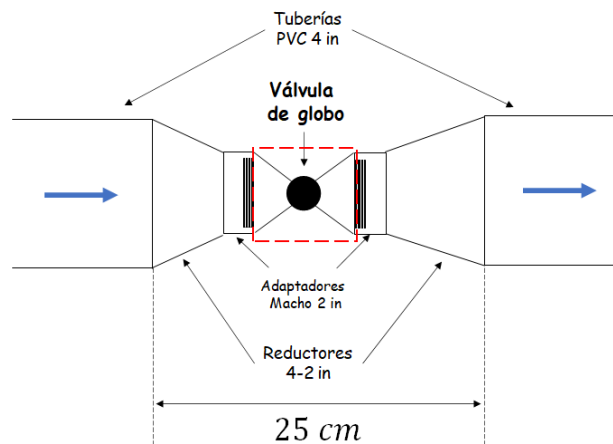


Figura 3.12: Esquema de la instalación de las válvulas de globo

Fuente propia

## B. Instalación de la válvula de pie

La instalación de la válvula de pie se realizará en base a los siguientes lineamientos:

- Si se instala una válvula de pie que posea un diámetro nominal de 4 in, la adquisición de este accesorio con esa medida será dificultosa por su falta de disponibilidad en las ferreterías convencionales locales, lo cual implicaría una búsqueda de proveedores externos para poder importar dicho elemento, además de que los costos económicos del banco se pueden elevar significativamente; en consecuencia, se opta por instalar una válvula de 2 in, ya que es la de mayores dimensiones que se ofrece en las ferreterías locales. Además, se tendrá que utilizar un reductor de sección para acoplar este accesorio a la red de tuberías.
- De manera similar a las válvulas de globo, la válvula de pie se acoplará a la tubería de succión a través un reductor de sección que realice el cambio de 4 in a 2 in; lo cual implicará que se deberá comprobar nuevamente que el banco pueda operar sin condiciones de cavitación

con la válvula  $V_1$  completamente abierta en la tubería de succión, puesto que la instalación de una válvula de pie de menor tamaño aumenta las pérdidas.

- Cabe destacar que se tendrá que instalar un adaptador macho de 2 in para realizar el acoplamiento entre el reductor y la válvula de pie.

Entonces primeramente se debe comprobar si el banco de ensayos podrá operar sin cavitación en la tubería de succión con la válvula  $V_1$  completamente abierta. Para tal efecto, este proceso se realizará tomando en cuentas las siguientes consideraciones:

- La comprobación de cavitación se llevará a cabo con el mismo procedimiento que se siguió en la 3.2.3.2:
  - Calcular la presión en la entrada de la bomba con la ecuación 3.12 para el caudal máximo permisible (100 GPM), considerando que ahora se utilizarán dos reductores de 4 a 2 in y una válvula de pie de 2 in.

$$P_E = - \left[ \left( \frac{8 Q_E^2}{\pi^2 D^4 (9.81)} \right) \left( 1 + f * \frac{1.35}{D} + K_{codo} + K_{v1} + 2K_{4-2 in} + K_{vp 2 in} \right) + 0.30 \right] * 9780.57$$

- Calcular el NPSHd en la entrada de la bomba con la ecuación 3.11

$$NPSH_d = \frac{(P_E + 98.155) \cdot 10^3 Pa}{9780.57} + \frac{8(Q_E)^2}{\pi^2 D^4 \left( 9.81 \frac{m}{s^2} \right)}$$

- Comparar el NPSHd con la lectura de NPSHr de la tabla que corresponde al caudal máximo.

- El factor de pérdida de la válvula de pie tomará un valor de  $K_{vp\ 2\ in} = 10$  según la tabla 11-6 del libro “Mecanica de Fluidos y Máquinas hidráulicas”, del autor Claudio Mataix (Tabla AIII.3, Anexo III).
- El factor de pérdida de los reductores  $K_{4-2\ in}$  se mantendrá con el mismo valor porque solo se ha agregado un reductor más de la misma medida.

Los resultados de la comprobación de cavitación se muestran en la tabla 3.11:

Tabla 3.11: Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de succión con 100 GPM y válvula de pie de 2 in

<b>Comprobación de condiciones libres de cavitación para una tubería de 4 in con 100 GPM y válvula de pie de 2 in</b>	
$Q_E$ (gpm)	100
$Q_E$ (m <sup>3</sup> /s)	0.006309
$NPSH_r$ (m)	9.0
$D\ nom$ (in)	4
$D\ int$ (mm)	100.84
$Re$	89134.54
$f$	0.0183
$K_{codo}$	0.9
$K_{V_1}$	10
$K_{V_p\ 2\ in}$	10
$2 * K_{4-2in}$	0.74
$P_E$ (kPa)	-10.05
$NPSH_d$ (m)	9.08
<b>CONDICIÓN</b>	<b>NO CAVITA</b>

En base a las dimensiones mostradas en el esquema de las válvulas de pie que se encuentran en la figura AIV.2 (Anexo IV) y a las distancias adicionales que se producen por el acoplamiento del reductor con el adaptador macho, se estima que el ensamble de todos los componentes de la instalación de la válvula de pie tendrá las siguientes dimensiones:

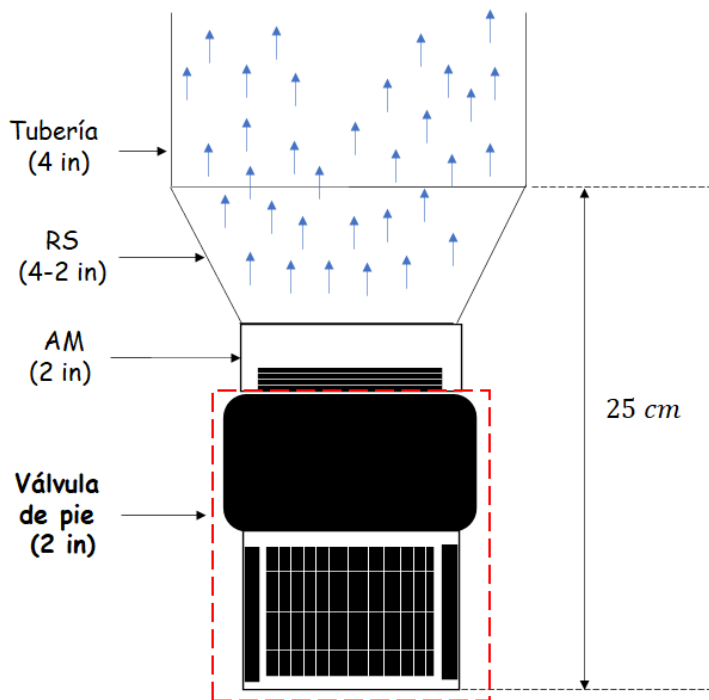


Figura 3.13: Instalación de la válvula de pie

Fuente propia

Donde:

- RS: Reductor de sección de 6 in a 2 in
- AM: Adaptador macho de 2 in

### C. Instalación de los medidores de presión

Con respecto a los medidores de presión, se deben tomar en cuenta los siguientes lineamientos establecidos por la ISO 9906, en la sección A.4 de título “Bomba probada en una instalación estandarizada”, perteneciente al Anexo A de “Arreglos de prueba”:

- El dispositivo de medición de presión en la entrada de la bomba se debe instalar a una distancia de dos veces el diámetro interno ( $2D_{int\ E/A}$ ) del ducto de entrada de la bomba; lo mismo aplica para la instalación de la medición de presión en la salida de la bomba.
- Tanto en la entrada como en la salida de la bomba, la sección transversal del ducto sobre el cual se instalará el medidor de presión debe tener el mismo diámetro que la entrada o salida de la bomba.

Para tener una mayor comprensión de estos lineamientos, la ISO-9906 ofrece el esquema de la figura 14 de la instalación de una bomba en un banco de prueba (ISO 990, 2012):

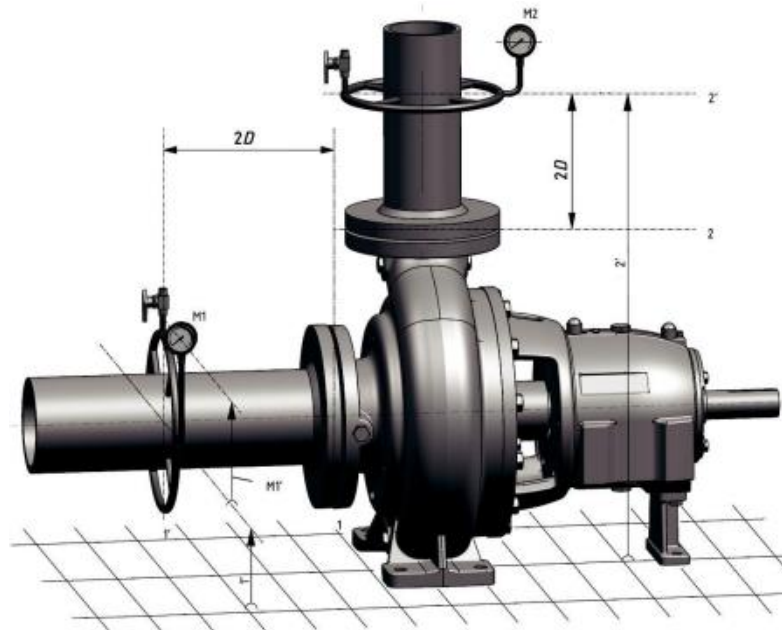


Figura 3.14: Esquema de instalación de una bomba en un banco de prueba

Fuente: Fuente: ISO Standard No. 9906:2012

Donde:

- M1: Medidor en la entrada de la bomba
- M2: Medidor en la salida de la bomba

Al verificar las medidas de las bombas de la familia de referencia (Tabla AIII.1, Anexo III) e investigar las especificaciones de la mayoría de bombas centrífugas que se ofrecen en ferreterías convencionales locales, se encuentra que los diámetros nominales de los ductos de entrada y de salida varían entre 1 y 2 pulgadas; por lo cual, las instalaciones de los medidores de presión tendrán los siguientes componentes:

- Reductores de sección.
- Unión TE
- Unión universal
- Dispositivo de medición.
- Tramos de tuberías.

Tal y como se muestra en la figura 3.15:

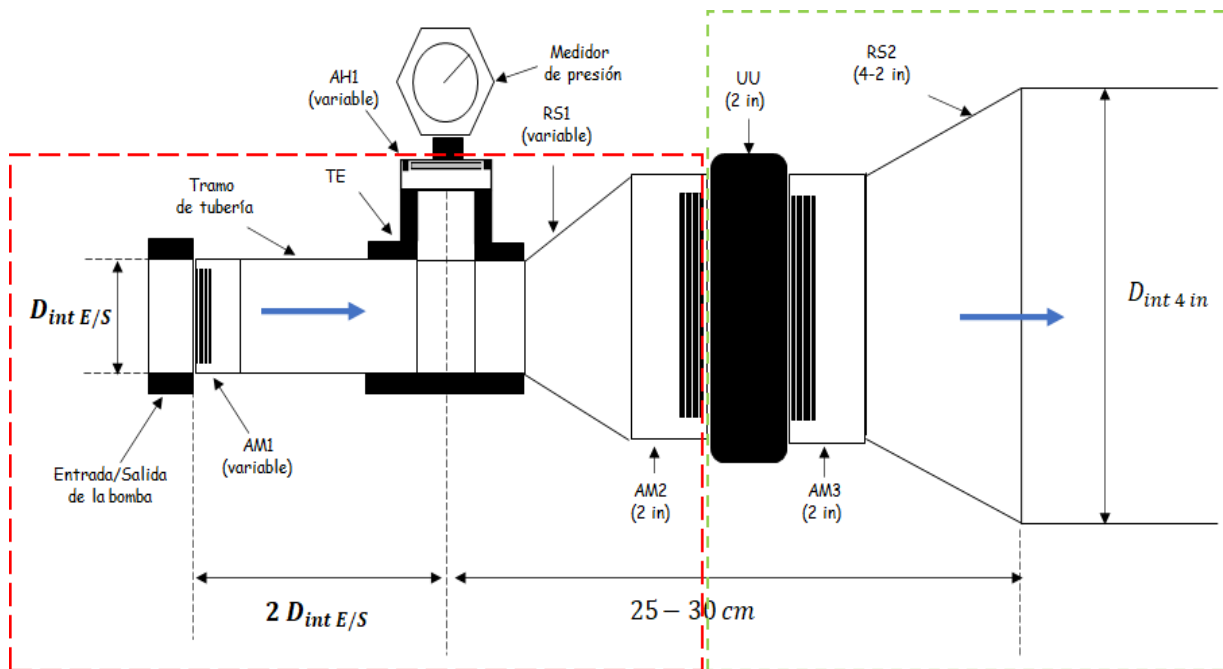


Figura 3.15: Esquema de la instalación de los medidores de presión.

Fuente propia

Donde:

- RS1 y RS2: son reductores de sección.
- Las dimensiones del reductor RS2 se establecieron según los criterios que se utilizaron al determinar el diámetro de la tubería en la sección 3.2.3.2.
- Las dimensiones del reductor RS1 dependerán del diámetro nominal de la entrada/salida de la bomba ensayada.
- AM1, AM2 y AM3: son adaptadores machos que permiten acoplamiento con rosca entre tuberías.
- AH1: Es un adaptador hembra que permite el acople con rosca que permite conectar el medidor de presión.
- TE: es una unión TE.
- UU: es una unión universal.
- $D_{int E/S}$ : Diámetro interno de la entrada/salida de la bomba ensayada.
- $D_{in 4 in}$ : Diámetro interno de la tubería de 4 in que tendrá la red de tuberías del banco, el cual tiene un valor de 100.84 mm.
- $2 D_{int E/S}$ : Distancia reglamentaria que debe existir entre el medidor de presión y la entrada /salida de la bomba ensayada.
- Los componentes externos a los medidores se han agrupado en dos ensambles, ya que algunos tendrán que variar conforme se ensayen distintas bombas:
  - El ensamble 1, señalado con el marco rojo, poseerá componentes que estarán sometidos a cambios porque sus dimensiones dependerán del diámetro nominal de la

entrada/salida de la bomba ensayada, por lo cual se considera como un ensamble desmontable.

- El ensamble 2, rodeado con el marco verde, estará conformado por componentes que no estarán sujetos a cambios.
- El uso de adaptadores se vuelve necesario porque se procurará que todos los reductores sean de campana cementada, es decir, con acoples lisos.
- Se estima que la distancia entre el medidor y el extremo de mayor diámetro del reductor RS2 varíe entre 25 y 30 cm; esta distancia se determina según la geometría de los accesorios utilizados en la instalación.

En cuanto al ensamble 1 (figura 3.16), se tomarán las siguientes consideraciones:

- Ya que los diámetros nominales de las bombas que se ensayarán rondan entre 1 y 2 in, se deben ensamblar 4 arreglos distintos, cuyas especificaciones se encuentran detalladas en la tabla 3.12 y que variarán según la geometría de la bomba ensayada.
- Tal y como lo indica la norma ISO-9906, el adaptador AM1 y el tramo de tubería poseerán el mismo diámetro nominal que la entrada/salida de la bomba. Asimismo, el adaptador AM2 se mantendrá constante para todos los ensayos.
- La longitud que existe entre el medidor y el acople de la unión TE con el tramo de tubería se considera despreciable. Por lo cual, la distancia  $2D_{int E/S}$  se definirá según la longitud del tramo de tubería entre la unión T y la entrada/salida de la bomba ensayada.

Tabla 3.12: Dimensiones de los componentes de instalaciones de los medidores de presión

Dimensiones geométricas de los componentes del ensamble No.1 de las instalaciones de los medidores de presión				
No.	$D_{nom\ E/S}$	$D_{int\ E/S}$ (mm)	$2\ D_{int\ E/S}$ (mm)	Reductor
1	1	29.48	58.96	2-1in
2	1 ¼	37.18	74.36	2-1 ¼ in
3	1 ½	42.58	85.16	2-1 ½ in
4	2	53.21	106.42	--

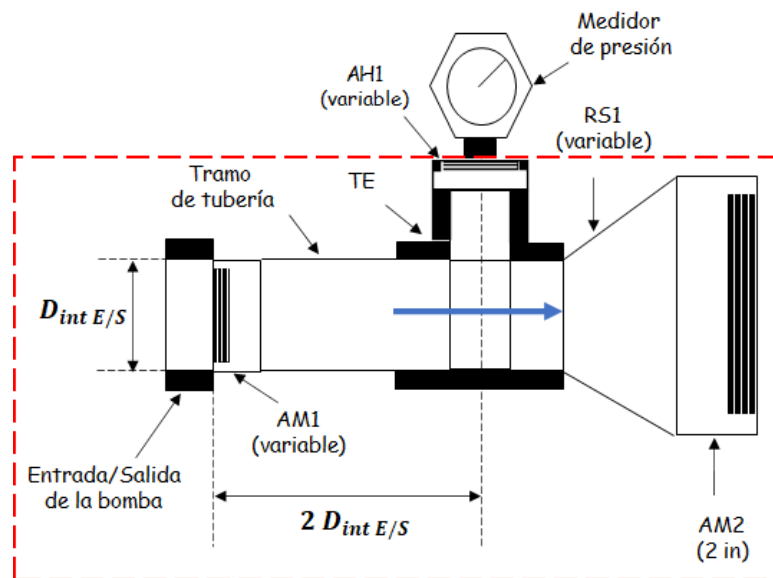


Figura 3.16: Ensamble no.1 de las instalaciones de los medidores de presión

Fuente propia

Con respecto al ensamble no. 2 (figura 3.17), el montaje de sus componentes se ha regido bajo los siguientes criterios:

- Los componentes de este ensamble se mantendrán constantes para todos los ensayos que quieran llevar a cabo con el banco de pruebas.
- El acople entre el adaptador hembra AH2 y el adaptador macho AM3 permitirá el cambio del ensamble no.1 cuando se requiera ensayar distintas bombas.

- Se adicionó una unión universal (UU) roscada para disminuir la dificultad que implica cambiar el arreglo del Ensamble 1 cuando se va a realizar un ensayo con una bomba de diámetro nominal distinto en su entrada/salida; ya que una de las funciones principales de las uniones universales roscadas es facilitar el desmontaje de tuberías en sistemas hidráulicos al momento de realizar cambios de piezas o tareas de mantenimiento.

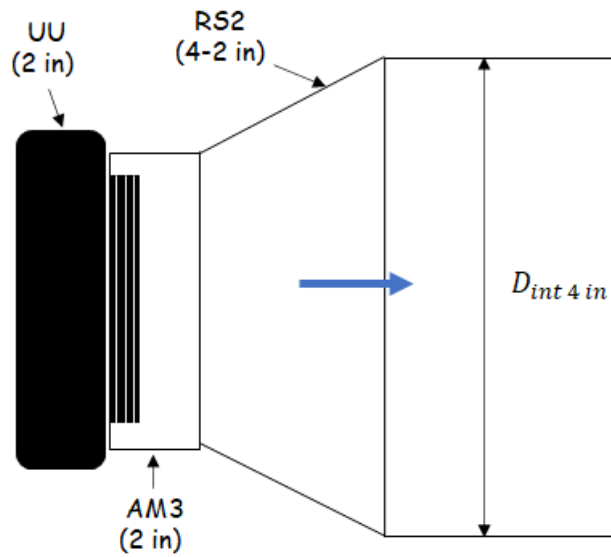


Figura 3.17: Ensamble no.2 de las instalaciones de los medidores de presión

Fuente propia

#### **D. Instalación de la válvula desairadora**

El ingreso de aire a un sistema de hidráulico reduce significativamente su efectividad, ya que transportar un flujo con pequeños espacios de aire implica un mayor consumo energético, debido a que este fluido gaseoso es de naturaleza compresible; por lo cual, las pérdidas energéticas que implica la presencia del aire dentro de un flujo resultan en un decremento significativo en la capacidad de carga de cualquier estación de bombeo.

En el estudio “Air problems in pipelines” (Problemas de aire en redes de tuberías), organizado por la institución HR Wallingford de Reino Unido, se menciona que una de las principales causas del ingreso de aire a un sistema de bombeo es el diseño incorrecto de las tuberías de succión, debido a los vórtices que se producen por un mal cálculo de la sumergencia en las reservas. En nuestro caso, a pesar de que en la sección 3.2.5.1 se determinó la sumergencia definitiva que garantizará que dicho fenómeno no se presente, se opta por instalar una válvula de desaire dentro del banco, para garantizar que el interior de la red de tuberías se encuentre libre de espacios con aire durante los tiempos de operación.

En el capítulo 7 del estudio mencionado anteriormente la HR Wallingford recomienda los siguientes lineamientos de instalación para las válvulas de desaire en sistemas hidráulicos en general:

- Las válvulas de desaire se deben instalar en los puntos de mayor altura geodésica con respecto a un nivel de referencia, para aglomerar los espacios de aire que se están desplazando a través de la red de tuberías. Esto ayudará a expulsar el aire de las tuberías del sistema cuando se estén llenando, así como evitará las presiones relativas negativas cuando se estén vaciando.

- En relación con las bombas, las válvulas de desaire no se deben instalar en las tuberías de succión, sino que solamente en la red de impulsión. Asimismo, se deben instalar corrientes arriba de cualquier medidor de caudal para garantizar que las magnitudes de flujo registradas no se vean alteradas por espacios de aire.
- En el caso de los sifones, se puede instalar una válvula de desaire en la salida de estos dispositivos para preservar su cebado cuando se generen presiones de vacío corrientes debajo del sifón. Actualmente esta aplicación es usualmente implementada en instalaciones de sistemas hidráulicos residenciales.

Por otra parte, la empresa mexicana VAMEX, especializada en la fabricación de válvulas, afirma en uno de sus catálogos que una de las funciones principales de las válvulas desairadoras consisten en lo siguiente:

- Expulsar el aire contenido en la red de impulsión al inicio del bombeo para aumentar la eficiencia del sistema hidráulico durante los tiempos de arranque.
- Permitir el ingreso de aire al sistema cuando la red de impulsión se está vaciando después de los tiempos de bombeo; esto evitará la formación de presiones de vacío que dañen las tuberías.

Tomando en cuenta los lineamientos anteriores y considerando el esquema de la figura 3.5, la instalación de la válvula desairadora se realizará en la tubería de impulsión, corriente arriba del medidor de presión en la salida de la bomba, tal y como se muestra en el siguiente esquema:

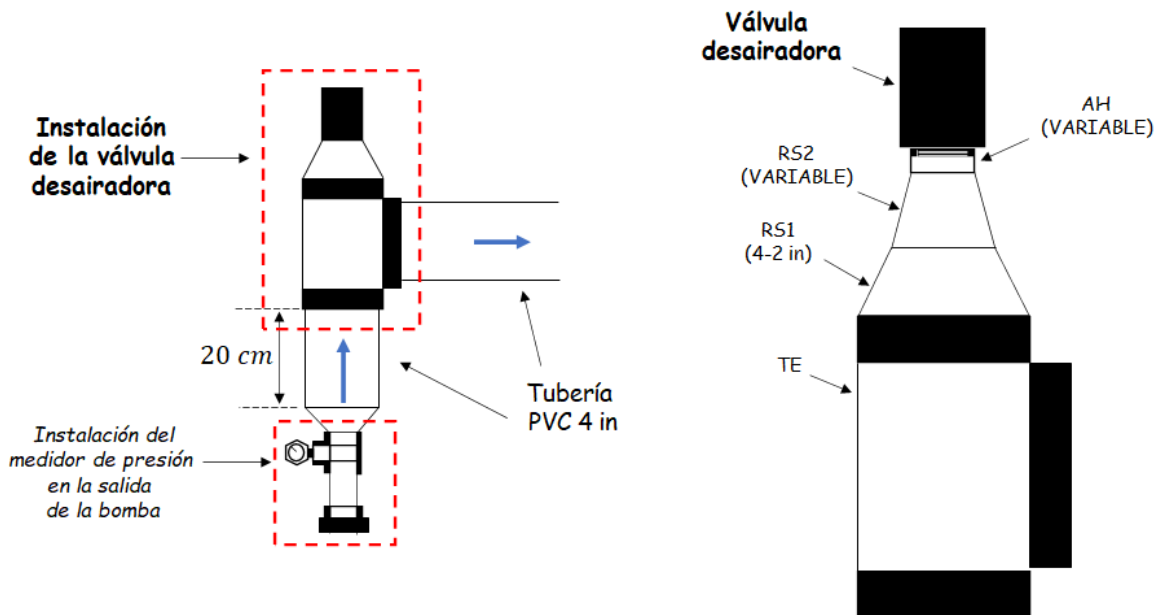


Figura 3.18: Instalación de la válvula desairadora.

Fuente propia

Donde:

- El esquema del lado izquierdo muestra la ubicación de la instalación en la red de tuberías del banco y el de la derecha los detalles sobre los componentes.
- RS: reductor de sección.
- AH: Adaptador de rosca hembra.
- Entre los dos reductores, el RS1 deberá reducir el diámetro nominal de 4 a 2 in. La reducción del RS2 se considera como variable porque depende de la medida del acople roscado de la válvula de desaire que se seleccione.
- Inicialmente se ha considerado utilizar un adaptador hembra.

## E. Instalación del medidor de caudal

Las características de la instalación del caudalímetro se rigen bajo las recomendaciones que la empresa Bermad, distribuidora multinacional de productos y servicios de abastecimiento de agua, recomienda en la sección 4.3 (“Condiciones de instalación”) del manual instructivo de uno de sus modelos de caudalímetros (MUT7000) para ductos cerrados; entre las cuales se pueden mencionar las siguientes (BERMAD, 2010):

- El segmento de tubería donde se instalará el sensor del caudalímetro siempre debe encontrarse completamente lleno de líquido.
- Si el sistema posee una bomba hidráulica, el sensor se debe instalar corrientes debajo de dicha bomba para evitar que las mediciones sean alteradas por espacios vacíos; los cuales son más propensos en las tuberías de succión (Figura 3.19).

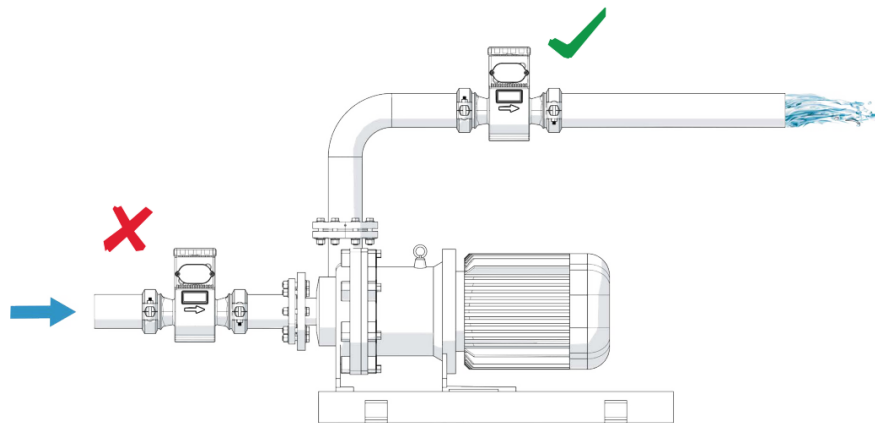


Figura 3.19: Recomendaciones para la instalación de un caudalímetro

Fuente: BERMAD. Electromagnetic Flow Meter MUT7000. Instruction manual

- Se recomienda instalar el medidor en tuberías donde el flujo se desplace con dirección vertical ascendente, ya que esto garantiza que la medición no sea afectada por espacios vacíos o cavitaciones (Figura 3.20).

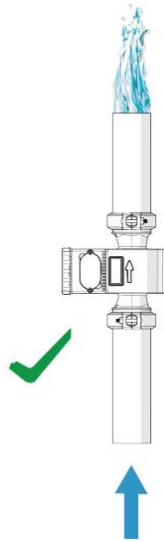


Figura 3.20: Recomendaciones para la instalación de un caudalímetro

Fuente: BERMAD. Electromagnetic Flow Meter MUT7000. Instruction manual

- Se recomienda instalar las válvulas controladoras de flujo corrientes debajo del sensor, ya que las mediciones se pueden ver afectadas por las turbulencias que se producen cuando se altera la abertura de dichas válvulas (Figura 3.21).

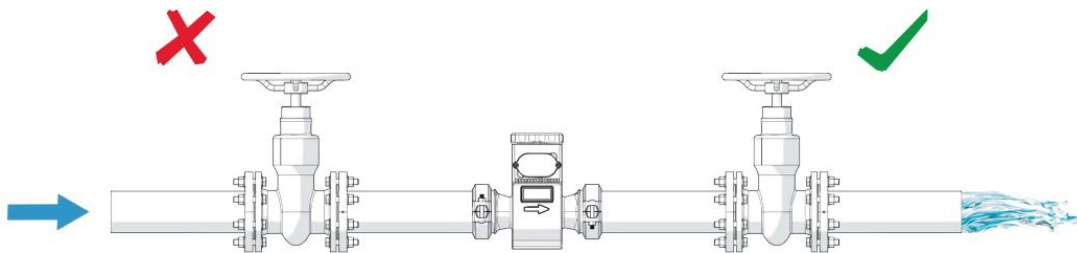


Figura 3.21: Recomendaciones para la instalación de un caudalímetro

Fuente: BERMAD. Electromagnetic Flow Meter MUT7000. Instruction manual

- Retomando la segunda recomendación (figura 3.20), también se debe evitar instalar el sensor en tuberías con salidas a la atmósfera, pues esto también podría alterar las mediciones de caudal porque no se garantiza que el segmento de tubería del sensor se encuentre completamente lleno (Figura 3.22).

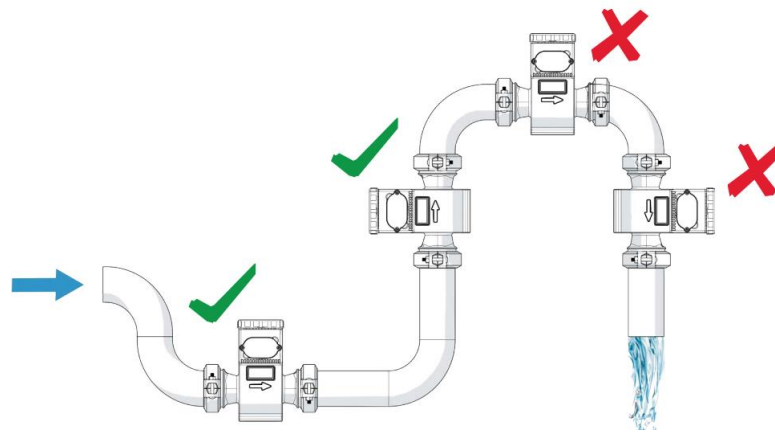


Figura 3.22: Recomendaciones para la instalación de un caudalímetro

Fuente: BERMAD. Electromagnetic Flow Meter MUT7000. Instruction manual

Por lo tanto, la instalación del caudalímetro se realizará como se muestra en el siguiente esquema:

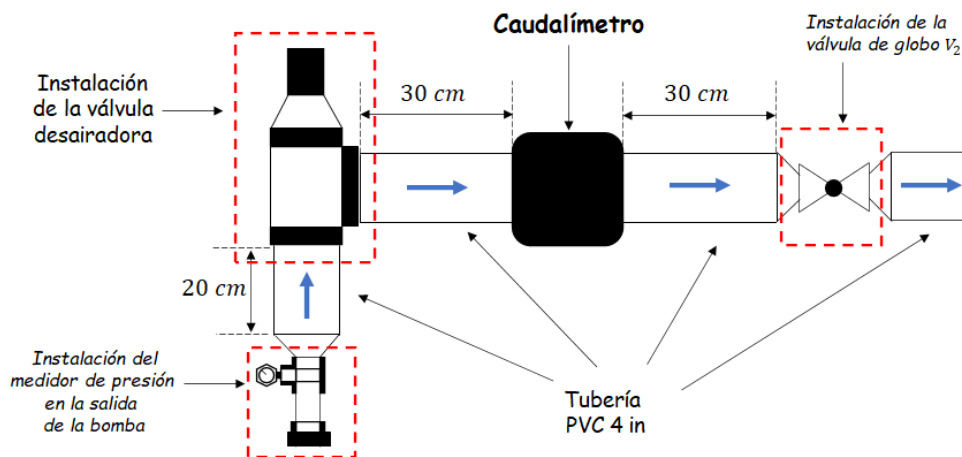


Figura 3.23: Instalación del caudalímetro en la tubería de impulsión.

Fuente propia

En donde se han tomado las siguientes consideraciones para la ubicación de los distintos componentes:

- A diferencia del esquema de la figura 3.5, se opta por instalar la tubería de impulsión de esta manera para que la válvula  $V_2$  se mantenga al alcance de los laboratoristas que utilizarán el banco para los ensayos de cavitación.

- Se instalará el caudalímetro en la tubería de impulsión para evitar que las mediciones se vean alteradas por la presencia de cavitación.
- El caudalímetro se instalará entre el medidor de presión en la salida de la bomba y la válvula de globo  $V_2$  para garantizar que el sector de la tubería que contiene el sensor se encuentre completamente lleno de líquido; asimismo, para evitar que las mediciones de caudal se vean alteradas por las turbulencias que se producen al variar la abertura de la válvula  $V_2$ .
- La distancia entre el caudalímetro y el medidor de presión en la salida de la bomba se determinó aplicando el mismo principio que la norma ISO-9906 utiliza para establecer la distancia entre la salida de la bomba y el medidor de presión; en otras palabras, la distancia de 30 cm entre ambos componentes es mayor al doble del diámetro interno de la tubería de impulsión ( $D_{int\ 4in} = 100.54\ mm$ ). La instalación se realizará así para evitar que las mediciones de caudal sean afectadas por el cambio de sección entre la el medidor de presión y la tubería de impulsión.

## F. Instalación de la tubería de descarga

En el esquema preliminar de la figura 3.5 se muestra que la salida de la tubería de descarga estará abierta a la atmósfera; sin embargo, esto puede provocar problemas en el funcionamiento del banco, puesto que el choque del caudal con la superficie del tanque podría ocasionar derramamientos de agua sobre componentes externos que deben abstenerse de humedad, tales como los del sistema eléctrico.

Para dar solución a este problema se presentan diversos métodos en la siguiente tabla:

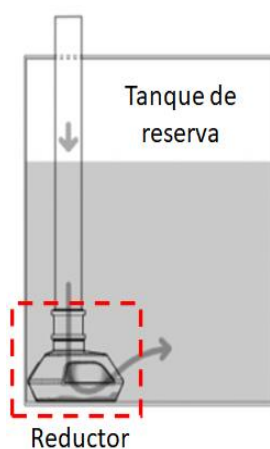
*Tabla 3.13: Métodos de reducción de turbulencias en salida de tuberías de descarga*

*Fuente: Asesoría externa*

<b>Métodos de reducción de turbulencias en salida de tuberías de descarga</b>			
<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Tubería de descarga con agujeros	Se debe tapar la salida de la tubería de descarga y perforar agujeros en diversas ubicaciones del segmento que estará sumergido; esto dará como resultado que el flujo se distribuya y que las turbulencias en la descarga se reduzcan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costo económico reducido.</li> <li>▪ Adquisición inmediata de componentes en ferreterías locales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se aumenta el riesgo de ruptura en la tubería de descarga por la presencia de los agujeros y el incremento de presión por la tapa de la salida.</li> </ul>
Conjunto de tubos en la salida de la tubería de descarga	Se debe instalar varias tuberías de menor tamaño en interior del segmento de la salida de la tubería de descarga para reducir las turbulencias y ordenar el flujo; este método normalmente es utilizado en las fuentes decorativas de flujo laminar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costo económico reducido.</li> <li>▪ Adquisición inmediata de componentes en ferreterías locales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Con este método se reducen las turbulencias, pero no se disminuye la velocidad de flujo en la salida.</li> </ul>
Reductor de turbulencia	Instalar un reductor de turbulencias en la salida de la tubería de descarga; estos dispositivos amortiguan el flujo en esta ubicación y reducen su velocidad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El uso de esto dispositivos garantiza una reducción significativa en la velocidad de flujo en la salida de la descarga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mayor costo económico</li> <li>▪ Adquisición complicada por la falta de oferta en ferreterías locales</li> </ul>

Considerando la información presentada en la tabla 3.13, se opta por utilizar el tercer método, el cual implica sumergir la salida de la tubería de succión por debajo de la superficie del tanque e instalar un reductor de turbulencia en el final de la tubería; al respecto de estos dispositivos se pueden mencionar las siguientes características:

- Estos dispositivos se utilizan comúnmente en tuberías de abastecimiento para tanques de reserva.
- Su función principal es reducir la velocidad del flujo en la descarga para evitar que los sedimentos del fondo se mezclen con el agua almacenada.
- Normalmente se instalan en el fondo de los tanques de reserva (figura 3.24)



*Figura 3.24: Instalación de un reductor de turbulencia en un tanque de reserva*

*Fuente adaptada de: <https://mabawater.com/producto/reductor-de-turbulencia-axolot-4%E2%80%B3/>*

Por lo tanto, en base a lo descrito anteriormente, la tubería de descarga se instalará tal y como se muestra en el siguiente esquema:

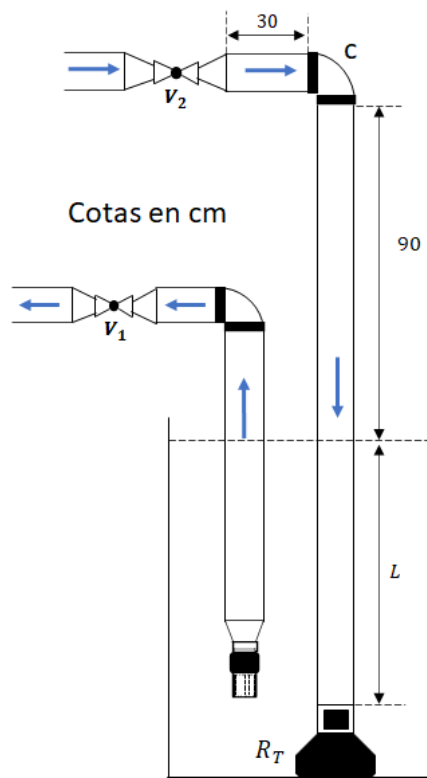


Figura 3.25: Instalación de la tubería de descarga

Fuente propia

Dónde:

- La longitud de 90 cm se estimó en base al esquema de la instalación del caudalímetro (figura 2.23) y la diferencia de altura geodésica que se ha preestablecido entre la superficie del tanque y la entrada de la bomba.
- $R_T$ : se refiere al reductor de turbulencia que se instalará en el fondo del tanque.
- La distancia sumergida  $L$  dependerá directamente de la profundidad del tanque que se seleccione para la red de tuberías.

### 3.2.5.3 Selección de los componentes de la red de tuberías

Considerando las instalaciones de los se opta por dividir la selección de los componentes de la red de tuberías en 4 etapas, para guardar el orden en la presentación de las especificaciones sobre los componentes:

1. Selección de la tubería y los codos.
2. Selección de los componentes de las instalaciones de las válvulas.
3. Selección de los componentes de las instalaciones de los medidores de presión.
4. Selección de los componentes de la instalación de la válvula desairadora.
5. Selección del caudalímetro.

### G. Selección de las tuberías y los codos

En lo que respecta a la tubería y a los codos, se posee la siguiente información:

- En la sección 3.2.4 se determinó que las tuberías serían de diámetro nominal de 4 in.
- En base al esquema de instalaciones del caudalímetro (figura 3.23) y a la longitud de la tubería de succión que se determinó en la sección 3.2.5.1, se estima que la sumatoria de las longitudes de los tramos de tubería de 4 in no superará los 6 m.
- Según la tabla 2.8, para el caudal mínimo permisible (40 GPM) la presión de vacío máxima que podría presentarse en la tubería de succión, bajo condiciones de cavitación, sería de  $-54.9 \text{ kPa} = -7.96 \text{ PSI}$ .

Por lo tanto, en la tabla 3.14 se muestra la información de los componentes que se han seleccionado en base a los datos presentados anteriormente, los cuales se obtuvieron del catálogo de componentes para tuberías de Amanco (Figuras AIV.4 y AIV.5; Anexo IV):

Tabla 3.14: Selección de tubería y codos

Selección de tubería y codos				
Producto	Marca	Código	Unidades	Especificaciones
Tubería	AMANCO	SDR 17-914882	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diámetro nominal: 4 in</li> <li>▪ Material: PVC (Agua potable)</li> <li>▪ Longitud: 6 m</li> <li>▪ Presión máxima: 250 PSI</li> <li>▪ Norma ASTM D2241</li> </ul>
Codo 90°	AMANCO	SCH40-909882	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diámetro nominal: 6 in</li> <li>▪ Material: PVC (Agua potable)</li> <li>▪ Campana cementada</li> <li>▪ Radio corto</li> <li>▪ Norma ASTM D2466</li> </ul>

#### H. Selección de componentes de las instalaciones de las válvulas

En las figuras 3.12 y 3.13 se muestran correspondientemente las instalaciones de las válvulas de globo y de la válvula de pie; a partir de estos esquemas se obtienen los siguientes requerimientos para la selección de los componentes de dichas instalaciones:

- La válvula de pie debe tener un diámetro nominal de 2 in.
- Las válvulas reguladoras de caudal serán válvulas de globo y deben tener un diámetro nominal de 2 in.
- La instalación de la válvula de pie requerirá:
  - 1 reductor de sección de 4-2 in.

- 1 adaptador macho de 2 in.
- La instalación de cada válvula de globo requerirá:
  - 2 reductores de 4-2 in.
  - 2 adaptadores macho de 2 in.

Entonces, en la tabla 3.15 se presentan las especificaciones de los componentes que se han seleccionado en base a los requerimientos descritos anteriormente, para armar los arreglos de las válvulas del banco, mostrados en las figuras 3.12 y 3.13 (Figuras AIV.1, AIV.2 y AIV.4; Anexo IV)

*Tabla 3.15: Selección de los componentes de las instalaciones de las válvulas*

<b>Selección de componentes de las instalaciones de las válvulas</b>				
Componentes	Marca	Código	Unidades	Especificaciones
Válvula de pie	SIMMONS	# 7407	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: fundición de bronce.</li> <li>▪ Roscada NPT</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> </ul>
Válvula de globo	RED WHITE	# 211B	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: fundición de bronce.</li> <li>▪ Roscada NPT</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> </ul>
Reductor 4-2 in	AMANCO	SCH40-913098	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (Agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 6-2 in</li> <li>▪ Norma ASTM D2466</li> </ul>
Adaptador NPT macho 2 in	AMANCO	SCH40-909169	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (Agua potable)</li> <li>▪ Roscado NPT</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 in</li> <li>▪ Norma ASTM D2466</li> </ul>

## I. Selección de los componentes de las instalaciones de los medidores de presión.

De manera general, en los ensayos de cavitación en bombas rotodinámicas se requiere tomar lecturas de presión tanto en la entrada como en la salida de la bomba; en consecuencia, en la tubería de impulsión se toman lecturas de presiones mayores a la presión atmosférica y, en la tubería de succión, se registran lecturas con presiones menores a la de la atmósfera. En consecuencia, el medidor de presión que se utilizará en la tubería de impulsión será un manómetro, es decir, un aparato diseñado para medir presiones relativas positivas; por el contrario, el dispositivo que se instalará en la tubería de succión que será un vacuómetro, ya que estos son especiales para medir presiones relativas negativas o de succión.

Cabe destacar que para ambos casos se requiere evitar al máximo los errores de medición atribuidos al factor humano, por lo tanto, solamente se utilizarán medidores digitales. En las tablas 3.16 y 3.17 se muestran las especificaciones de los dispositivos seleccionados:

*Tabla 3.16: Selección del manómetro para la tubería de impulsión*

Selección del manómetro para la tubería de impulsión	
Marca	veto
Código	C8307681
Rango de presiones	0-24.13 MPa / 0-3500 PSI
Fuente energética	2 baterías AA
Conexión	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ NPT macho</li> <li>▪ Diámetro nominal: ½ in</li> </ul>




Tabla 3.17: Selección del vacuómetro para la tubería de succión

Selección del vacuómetro para la tubería de succión	
Marca	veto
Código	C8307509
Rango de presiones	-101.325 - 0 kPa / -1 - 0 atm
Fuente energética	2 baterías AA
Conexión	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ NPT macho</li> <li>▪ Diámetro nominal: ½ in</li> </ul>

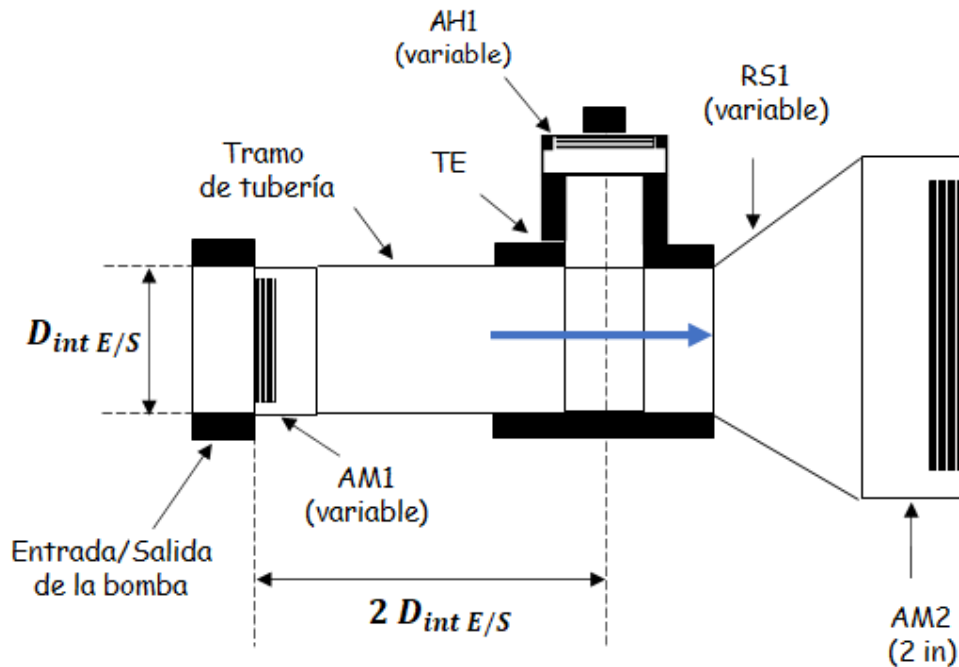


En cuanto a los demás componentes de la instalación de los medidores de presión (figura 3.15), en el literal C de la sección 3.2.5.2 se dividieron en dos grupos, denominando al primero como “Ensamble 1” (Marco rojo) y al segundo “Ensamble 2” (Marco verde). En lo relacionado con el Ensamble 1 (Figura 3.16), se sabe que las dimensiones de este conjunto de componentes variarán según el diámetro nominal de la bomba ensayada, mientras que las del Ensamble 2 (Figura 3.17) se mantendrán constantes en todos los ensayos. Por lo tanto, para esta instalación los componentes restantes se seleccionarán por separado.

Acerca del Ensamble 1 se tendrán presentes los siguientes criterios:

- El Ensamble 1 se podrá armar con cuatro arreglos, los cuales se encuentran detallados en la tabla 3.12 y cada uno depende del diámetro nominal de la entrada de la bomba ensayada; por lo cual, los componentes seleccionados para cada uno de los arreglos se detallarán en las tablas 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21.
- Las dimensiones de los componentes de cada arreglo dependen del diámetro nominal de la entrada/salida de la bomba ensayada, ya que la ISO 9906 establece que la sección del punto de medición el mismo diámetro que la entrada/salida.

- El acoplamiento entre el medidor y la unión TE requerirá una reducción de sección, puesto que los medidores de presión que se han seleccionado poseen una conexión NPT macho cuyo diámetro nominal es de ½ de pulgada. Por lo cual, se utilizarán uniones TE reductoras y adaptadores hembra para acoplar los medidores.
- Retomando esquema del Ensamble 1 de la figura 3.16:



- Retomando el contenido de la tabla 3.12:

Dimensiones geométricas de los componentes del Ensamble 1 de las instalaciones de los medidores de presión				
No.	$D_{nom E/S}$	$D_{int E/S}$ (mm)	$2 D_{int E/S}$ (mm)	Reductor
1	1	29.48	58.96	2-1in
2	1 ¼	37.18	74.36	2-1 ¼ in
3	1 ½	42.58	85.16	2-1 ½ in
4	2	53.21	106.42	--

Las especificaciones de los componentes seleccionados para cada arreglo se muestran en las siguientes tablas (Figuras AIV.4 y AIV.5; Anexo IV):

Tabla 3.18: Componentes del arreglo no.4 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión

<b>Componentes del arreglo no.1 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión</b>				
$D_{nom\ E/S}$ (in)		1		
Designación (Figura 3.16)	Componente	Marca	Código	Especificaciones
AM1	Adaptador	AMANCO	SCH40-909165	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
AM2	Adaptador	AMANCO	SCH40-909168	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
AH1	Adaptador	AMANCO	SHC40-909106	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: ½ in</li> <li>▪ Conexión: NPT hembra</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
RS1	Reductor de sección	AMANCO	SHC40-913138	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 2 – 1 in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
TE	Unión TE reductora	AMANCO	SHC40-914492	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 1 – 1/2 in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
Tramo de tubería	Tubería	AMANCO	SDR26-915176	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (Agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 in</li> <li>▪ Longitud: 1 m</li> <li>▪ Presión máxima: 160 PSI</li> <li>▪ Norma ASTM D2241</li> </ul>

Tabla 3.19: Componentes del arreglo no.2 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión

<b>Componentes del arreglo no.2 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión</b>				
$D_{nom\ E/S}$ (in)		1 ¼		
Designación (Figura 3.16)	Componente	Marca	Código	Especificaciones
AM1	Adaptador	AMANCO	SCH40-909166	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 ¼ in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
AM2	Adaptador	AMANCO	SCH40-909168	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
AH1	Adaptador	AMANCO	SHC40-909106	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1/2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT hembra</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
RS1	Reductor de sección	AMANCO	SHC40-913140	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 2 – 1 ¼ in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
TE	Unión TE reductora	AMANCO	SHC40-914497	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 1 ¼ – 1/2 in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
Tramo de tubería	Tubería	AMANCO	SDR26-915189	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (Agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 ¼ in</li> <li>▪ Longitud: 1 m</li> <li>▪ Presión máxima: 160 PSI</li> <li>▪ Norma ASTM D2241</li> </ul>

Tabla 3.20: Componentes del arreglo no.3 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión

<b>Componentes del arreglo no.3 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión</b>				
$D_{nom\ E/S}$ (in)		1 ½		
Designación (Figura 3.16)	Componente	Marca	Código	Especificaciones
AM1	Adaptador	AMANCO	SCH40-909167	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1½ in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
AM2	Adaptador	AMANCO	SCH40-909168	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
AH1	Adaptador	AMANCO	SHC40-909106	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1/2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT hembra</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
RS1	Reductor de sección	AMANCO	SHC40-913142	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 2 – 1½ in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
TE	Unión TE reductora	AMANCO	SHC40-914501	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 1½ – 1/2 in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
Tramo de tubería	Tubería	AMANCO	SDR26-915194	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (Agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 ½ in</li> <li>▪ Longitud: 1 m</li> <li>▪ Presión máxima: 160 PSI</li> <li>▪ Norma ASTM D2241</li> </ul>

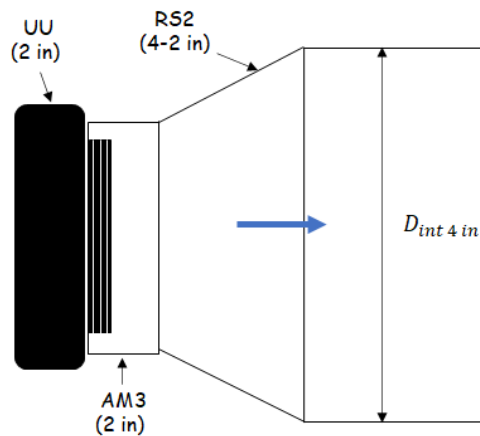
Tabla 3.21: Componentes del arreglo no.4 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión.

<b>Componentes del arreglo no.4 del Ensamble 1 de la instalación de los medidores de presión</b>				
$D_{nom\ E/S}$ (in)		2		
Designación (Figura 3.16)	Componente	Marca	Código	Especificaciones
AM1	Adaptador	AMANCO	SCH40-909168	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
AM2	Adaptador	AMANCO	SCH40-909168	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
AH1	Adaptador	AMANCO	SHC40-909106	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: ½ in</li> <li>▪ Conexión: NPT hembra</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
RS1	Reductor de sección	--	--	--
TE	Unión Te reductora	AMANCO	SHC40-914508	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 2 – ½ in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
Tramo de tubería	Tubería	AMANCO	SDR64-914931	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (Agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Longitud: 1 m</li> <li>▪ Presión máxima: 63 PSI</li> <li>▪ Norma ASTM D2241</li> </ul>

En cuanto al arreglo no.4, cuyos componentes se especifican en la tabla 3.21, es importante afirmar que no requerirá un reductor RS1, ya que la entrada/salida de la bomba posee un diámetro nominal de 2 in, por lo tanto, comparte el diámetro con la entrada lisa del adaptador macho AM2; por tal motivo, para este caso la TE reductora se conectará directamente con este elemento.

Por otra parte, la selección de los componentes del Ensamble 2 se realizará teniendo presentes las siguientes consideraciones:

- Los componentes del Ensamble 2 se mantendrán constantes para todos los ensayos.
- El objetivo principal del Ensamble 2 es facilitar el desmontaje del Ensamble 1 para poder desinstalar la bomba ensayada sin la necesidad de desarmar el banco completo.
- Retomando esquema del Ensamble 2 de la figura 3.17:



En la siguiente tabla se presentan las especificaciones de los componentes seleccionados para el Ensamble 2 de la instalación de los medidores de presión (Figura AIV.5, Anexo IV):

Tabla 3.22: Componentes del Ensamble 2 de la instalación de los medidores de presión

Componentes del Ensamble 2 de la instalación de los medidores de presión				
Designación (Figura 79)	Componente	Marca	Código	Especificaciones
AM3	Adaptador	AMANCO	SCH40-909168	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>

RS2	Reductor de sección	AMANCO	SHC40-913098	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 4 – 2 in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
UU	Unión Universal	AMANCO	SHC40-914492	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Conexión: rosca NPT</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>

#### **J. Selección de los componentes de la instalación de la válvula desairadora.**

Tal y como se mencionó en el Literal D de la sección 3.2.5.2, según el catálogo de la empresa VAMEX, las válvulas desairadoras se seleccionan en base al diámetro nominal del acople de la válvula y al diámetro del ducto de venteo por el cual se expulsa e ingresa aire de la válvula desairadora, para esto se deben considerar los siguientes caudales de aire:

- El caudal de aire que se debe expulsar de la red de impulsión, en el momento en que se inicia el bombeo, para aumentar su rendimiento de sistema durante el arranque del tiempo de operación.
- El caudal de aire que se debe ingresar a la red de impulsión cuando el bombeo se detiene para evitar la proliferación de presiones de vacío, las cuales pueden dañar las tuberías del sistema.
- La caudal de aire que se debe purgar durante los tiempos de operación, el cual se debe calcular en base al caudal máximo de agua que fluya por la red y a la presión correspondiente a estas condiciones.

Según el catálogo de VAMEX, el diámetro nominal del acople se selecciona en base a al caudal de aire que se debe expulsar (salida) y al que se debe

ingresar (entrada) a la red de impulsión, tanto al principio como al final del bombeo del sistema. En lo que respecta al caudal de salida, este se asume aproximadamente similar al caudal de agua inicial, por lo cual, el caudal de salida de aire crítico debe ser igual al caudal máximo permisible para el cual se ha diseñado el banco, es decir,  $Q_{max} = 100 \text{ GPM}$ . Aplicando el factor de conversión, se obtiene lo siguiente:

$$Q_{salida \text{ de aire}} = 100 \text{ GPM} = 464.61 \text{ l/min} = 16.04 \text{ ft}^3/\text{min}$$

El catálogo de VAMEX indica que con el resultado se debe elegir el diámetro de la válvula desairadora, trazando una constante sobre el valor del caudal en la gráfica de expulsión de aire de la figura 3.26. Considerando que no se debe exceder una diferencia de presión de 2 PSI entre la red y el interior de la válvula. Por otra parte, en cuando al caudal de entrada de aire, éste se determina en utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{entrada \text{ de aire}} = 0.0472 * C * \sqrt{S * D_{int}^5} \quad (3.13)$$

Donde

- $C$ : Coeficiente de Checy, aplicar:
  - $C = 110$  / hierro
  - $C = 120$  / concreto
  - $C = 130$  / acero
  - $C = 190$  / PVC
- $S$ : Pendiente de la tubería anterior / posterior a la instalación de la válvula, se debe seleccionar la de mayor magnitud.
- $D_{int}$ : Diámetro interior de la tubería anterior / posterior de la instalación de la válvula; unidades en pulgadas.

Retomando el esquema de la instalación de la válvula desairadora de la figura 3.18, se observa que las variables de la ecuación 3.13 toman las siguientes magnitudes:

- $C = 190 / \text{PVC}$
- $S = 1$
- $D_{int} = 100.84 \text{ mm} \cong 4.0 \text{ in}$

Sustituyendo:

$$Q_{\text{entrada de aire}} = 0.0472 * 190 * \sqrt{1 * 4.0^5}$$

$$Q_{\text{entrada de aire}} = 286.98 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Al igual que con el resultado del caudal de salida, el catálogo de VAMEX indica que con el caudal de entrada resultante se debe buscar en la gráfica de la figura 3.26 el diámetro nominal de la válvula desairadora sin exceder una diferencia de presión de 5 PSI entre la red y el interior de la válvula, tal y como se muestra en la figura 3.26 (VAMEX, 2020):

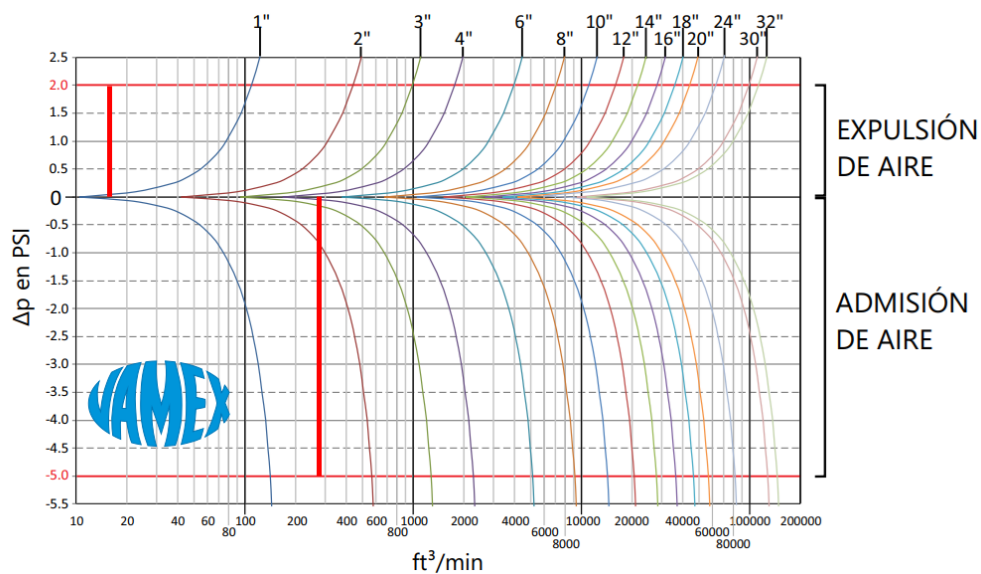


Figura: 3.26: Gráfica de selección de diámetros nominales de válvulas desairadoras de marca VAMEX

Fuente adaptada de: VAMEX. Catálogo de válvulas de expulsión de aire.

En base a lo que se ha graficado en la figura 3.26, se observa que el diámetro nominal de la válvula debería tener un mínimo de 2 in para poder expulsar e ingresar aire a la red de impulsión, durante el inicio y el fin de los tiempos de operación. Por lo tanto, según el catálogo de VAMEX, las válvulas que cumplen con esta condición son las de modelo “E20”. Sin embargo, todavía es necesario seleccionar el diámetro del venteo de la válvula, el cual se determina a partir del caudal de salida de aire durante los tiempos de operación; el cual surge a partir del aire que se encuentra disuelto en el agua que fluye por el banco. El catálogo de VAMEX afirma que un 2% de la composición de cualquier muestra de agua corresponde al aire disuelto; por lo tanto, aplicado un factor de conversión, el caudal crítico de salida de aire durante operación se calcula con la siguiente fórmula (VAMEX, 2020):

$$Q_{op. salida} = 2.12 * 2\% * Q_{max} \quad (3.14)$$

Donde:

- $Q_{op. salida}$ : en  $ft^3/min$
- $Q_{max} = 100 \text{ GPM} = 7.57 \text{ l/s}$

Sustituyendo:

$$Q_{op. salida} = 2.12 * 2\% * 7.57 = 0.321 \text{ ft}^3/min$$

Asimismo, el catálogo de VAMEX indica que para seleccionar el diámetro de venteo, se debe determinar la presión en la red cuando circula el caudal de operación para el cual se ha determinado el caudal de salida de aire; en nuestro caso, sería con los 100 GPM que corresponden al caudal máximo permisible. Esta presión de operación se calcula utilizando el concepto de altura neta y la ecuación de Bernoulli entre la entrada y salida de la bomba:

$$H_{100 \text{ gpm}} = \frac{P_{S \text{ 100 gpm}} - P_E}{\rho g}$$

Despejando la Presión en la salida de la bomba, se obtiene la siguiente igualdad:

$$P_{S\ 100\ gpm} = H_{max}\rho g + P_E \quad (3.15)$$

Considerando las propiedades físicas para el agua a 25°C y la presión en la entrada de la bomba resultante para el caudal de 100 GPM en la tabla 3.5, se obtienen los siguientes resultados:

- $P_E = -9\ kPa$
- $\rho = 997\ kg/m^3$
- $g = 9.81\ m/s^2$

Observando el catálogo de bombas de Franklin Electric, se registra que la bomba de referencia presenta siguiente altura neta para 100 GPM:

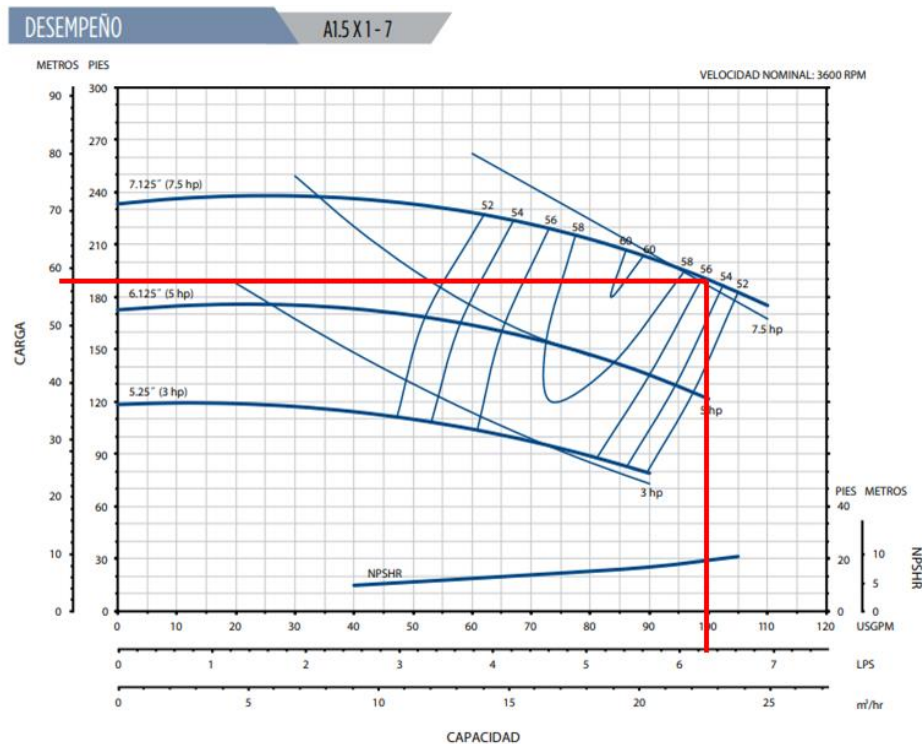


Figura 3.27: Lectura de altura neta para 100 GPM, de bomba de 7 hp, con modelo A1.5 X 1-7.

Fuente: Franklin Electric. Catálogo Bombas Centrífugas: Serie AG acoplada a motor.

A partir de la lectura de la figura 3.27 se observa que para 100 GPM se registra una altura neta de  $H_{neta} = 68 \text{ m}$ , por lo tanto, sustituyendo lo valores en la ecuación 3.15, se obtienen la siguiente presión de trabajo para dicho caudal:

$$P_{S \ 100 \ gpm} = (68 \text{ m}) \left( 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) - (9000 \text{ Pa})$$

$$P_{S \ max} = 656.08 \text{ kPa} = 6.56 \text{ bar} \cong 95.16 \text{ PSI}$$

Asumiendo que la presión en la salida de la bomba se mantiene constante hasta la ubicación de la válvula desairadora, la presión en la red de impulsión sería de 95.16 PSI. Entonces, con los datos de la presión y el caudal de aire que se debe expulsar durante los tiempos de operación, el catálogo de VAMEX indica que el diámetro del venteo de una válvula de modelo E20 se selecciona según el punto de intersección de ambos datos en la gráfica de la figura 3.28:

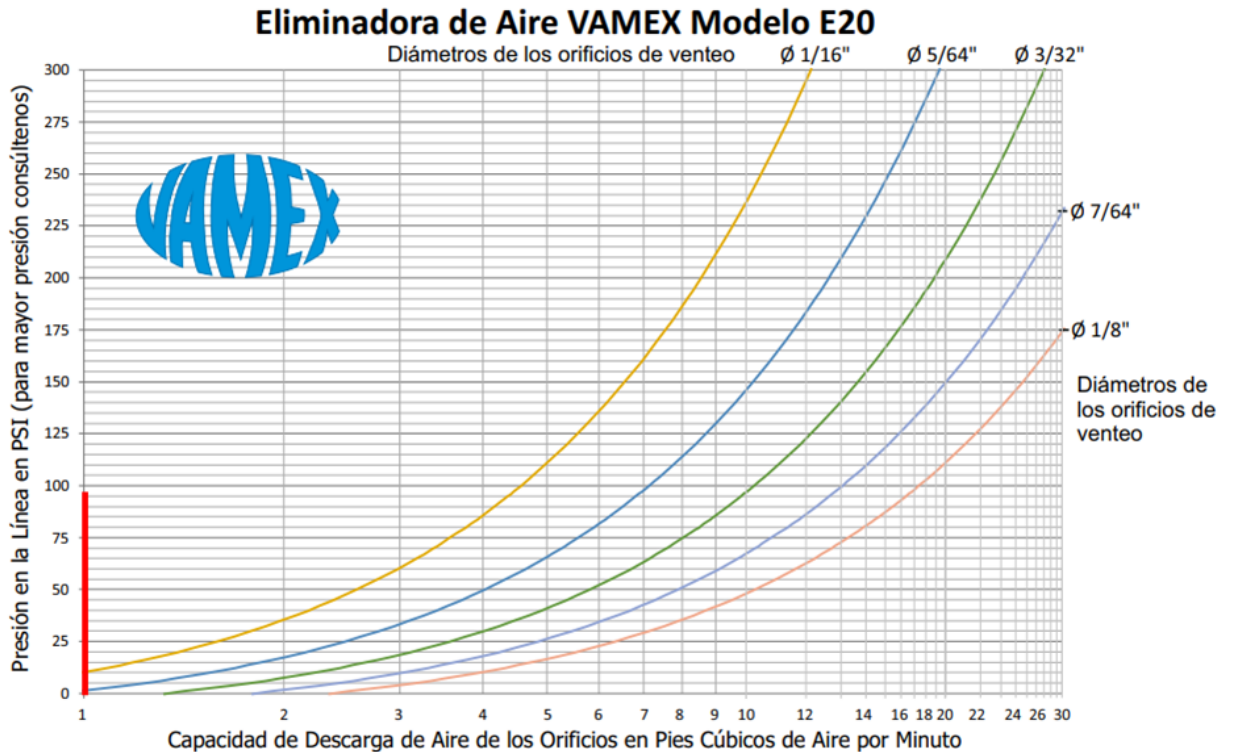


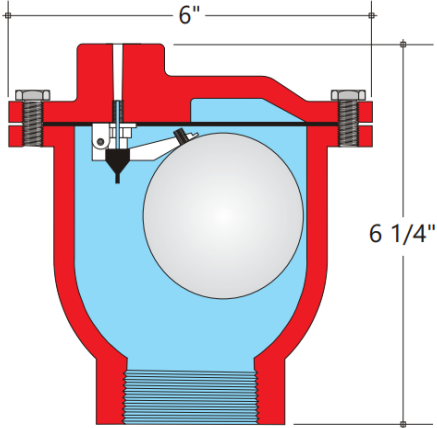
Figura: 3.28: Gráfica de selección de diámetros de venteo de válvulas desairadoras VAMEX, de modelo E20

Fuente adaptada de: VAMEX. Catálogo de válvulas de expulsión de aire.

Según la gráfica de la figura 3.26, el caudal de operación no está dentro de la gráfica, entonces se debe seleccionar el diámetro de venteo menor, el cual posee una magnitud de  $\frac{1}{16}$  in. Por lo tanto, la válvula desairadora seleccionada presenta las especificaciones de la tabla 3.23 (VAMEX, 2020):

Tabla 3.23: Especificaciones de la válvula desairadora seleccionada  
Fuente adaptada de: VAMEX. Catálogo de válvulas de expulsión de aire.

Especificaciones de la válvula desairadora seleccionada	
Marca	VAMEX
Modelo	E20
Material	Hierro fundido A126
Conexión	Roscado NPT hembra
Diámetro nominal de conexión	2 in
Diámetro de venteo	$\frac{1}{16}$ in $\cong 1.6$ mm



En cuanto a los demás componentes seleccionados para la instalación de la válvula desairadora (Figura 3.18), las especificaciones se encuentran en la siguiente tabla y se obtuvieron a partir del catálogo de amanco (Anexo IV: Figura AII.5):

Tabla 3.24: Componentes seleccionados para la instalación de la válvula desairadora

Componentes seleccionados para la instalación de la válvula desairadora				
Designación (figura 2.18)	Componente	Marca	Código	Especificaciones
AM	Adaptador	AMANCO	SCH40-909168	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 2 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>

RS	Reductor de sección	AMANCO	SHC40-913098	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Reducción: 4 – 2 in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
TE	Unión TE	AMANCO	SHC40-914352	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 4 in</li> <li>▪ Conexión: Campana cementada</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>

Por lo tanto, el esquema de la instalación de la válvula desairadora sería tal y como el que se muestra en la figura 3.29:

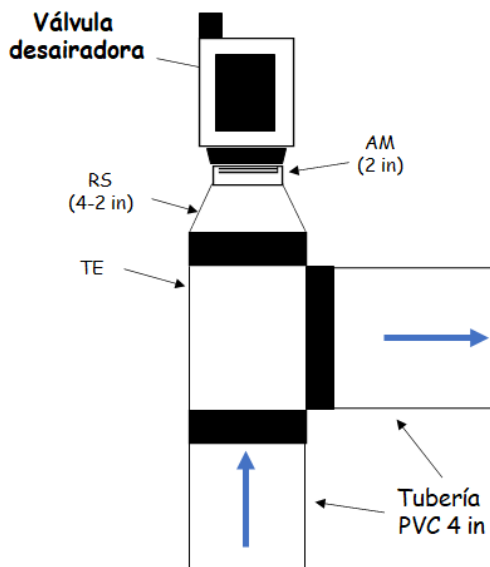


Figura 3.29: Instalación de la válvula desairadora.

Fuente propia

## K. Selección del Caudalímetro

En la sección 2.5.3 se presentaron 3 tipos de caudalímetros; en el siguiente cuadro comparativo se analizan las ventajas y desventajas para poder seleccionar el más pertinente para el banco de pruebas:

Tabla 3.25: Ventajas y desventajas de los tipos de caudalímetros

Ventajas y desventajas de los tipos de caudalímetros		
Tipo de caudalímetro	Ventajas	Desventajas
Inserción	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Por su mecanismo, es de las opciones más económicas para medir caudales en tuberías.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Su instalación es invasiva por la sonda que se debe insertar para medir la velocidad del flujo, lo cual puede generar pérdidas de presión y alteraciones en las mediciones.</li> <li>▪ Las sondas son bastante propensas a sufrir averías por desgaste.</li> </ul>
Electromagnético	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Es el que presenta mayor nivel en la presión de sus mediciones, puesto que la magnitud del flujo que se registra depende directamente del campo magnético generado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La instalación de estos dispositivos es invasiva, ya que se debe alterar la tubería para poder acoplarlos al sistema en la ubicación donde se medirá el caudal.</li> </ul>
Ultrasonoro	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El método que utilizan permite medir el caudal en tuberías con diámetros bastante mayores a 5000 mm de manera económica.</li> <li>▪ Su instalación no es invasiva, puesto que los transductores se colocan en la pared exterior de las tuberías.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los costos de su adquisición son bastante elevados.</li> </ul>

Además de las ventajas y desventajas que se presentan en la tabla 3.25, también se deben considerar los siguientes requerimientos:

- Considerando que la tubería es de 4 in ( $D_{int} = 100.54 \text{ mm}$ ) y que el caudal máximo permisible es de  $100 \text{ GPM} = 0.006309 \text{ m}^3/\text{s}$ , el caudalímetro seleccionado debe ser capaz de medir velocidades de flujo mayores a  $0.795 \text{ m/s}$ .
- Se debe garantizar que el medidor seleccionado tenga la capacidad para registrar cambios repentinos en la magnitud del caudal.
- El medidor seleccionado no debe generar pérdidas en el flujo para obtener mediciones confiables.
- La instalación del medidor debe ser simple para facilitar las tareas de mantenimiento.

Por lo tanto, en base a los requerimientos y las ventajas de la tabla 3.25, se opta por seleccionar el caudalímetro portátil ultrasonoro Flexim F601, cuyas especificaciones se encuentran en la tabla 3.26 (FLEXIM, 2020):

*Tabla 3.26: Datos técnicos del caudalímetro seleccionado*  
 Fuente adaptada de: [https://www.flexim.com/sites/default/files/2022-07/TSFLUXUS\\_F601V2-4-2ES\\_Leu.pdf](https://www.flexim.com/sites/default/files/2022-07/TSFLUXUS_F601V2-4-2ES_Leu.pdf)

<b>Datos técnicos del caudalímetro seleccionado</b>	
Marca	Flexim
Modelo	F601
Rango de diámetros internos de tubería	6 – 6500 mm
Rango de temperaturas	– 40°C – 200°C
Rango de velocidades de flujo registrables	0.01 – 25 m/s
Fuente de alimentación	Batería Li-ION 7.2V/6.2A
Tipo de sensores	Transductores Shear wave



The image shows the Flexim F601 ultrasonic flowmeter, which consists of a yellow handheld device with a screen and keypad, and a separate sensor unit with two transducers connected by a cable.

El caudalímetro F601 consta de una unidad de control y de sensores que se instalan en la pared externa de la tubería donde se desea medir el caudal, garantizando así que su instalación no obstruya el flujo que corre por el banco; asimismo tiene la capacidad para monitorear cambios bruscos de flujo y su batería le permite mantener tiempos de operación de hasta 14 horas seguidas, de manera que los ensayos no sean interrumpidos por paros por falta de carga en la unidad de control.

Además, este modelo posee la capacidad para medir la temperatura del flujo tanto corrientes arriba como corrientes debajo de la instalación de los sensores, por lo cual no será necesaria la instalación de algún termómetro adicional para medir esta variable. En la figura 3.30 se muestra un esquema de la instalación de todo el conjunto (FLEXIM, 2020):

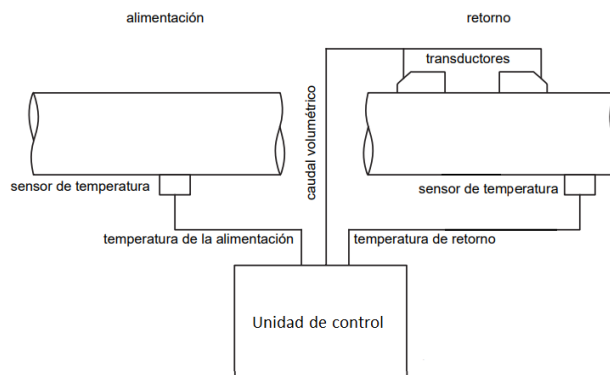


Figura 3.30: Esquema de la instalación del caudalímetro F601

Fuente adaptada de: Manual Flexim "Operating instruction Fluxus F60x".

Cabe destacar que durante la instalación de este caudalímetro existe una etapa de parametrización, donde la unidad de control solicita las condiciones de operación bajo las cuales el dispositivo deberá realizar las mediciones del caudal, para tal efecto se deben ingresar diversos datos de entrada tales como:

- Diámetro externo de la tubería
- Espesor de la tubería

- Material de la tubería
- Fluido de trabajo

En lo que respecta a la instalación de los sensores (Figura 3.29), la distancia “a” entre estos dispositivos es determinada por la unidad de control durante la etapa de parametrización; dicha distancia puede llegar a un máximo de 10 cm, sin embargo, la regla milimétrica que sostiene ambos transductores posee una longitud de 20 cm; por lo cual, se destinará un tramo de tubería de 20 cm para la instalación de los sensores, tal y como se muestra en la figura 3.31 (FLEXIM, 2020).

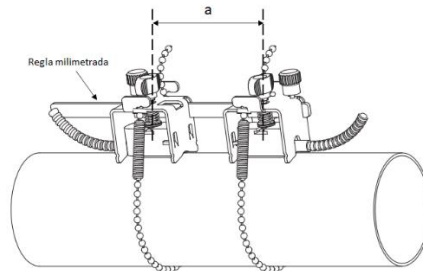


Figura 3.31: Instalación de los sensores del caudalímetro

Fuente adaptada de: Manual Flexim “Operating instruction Fluxus F60x”.

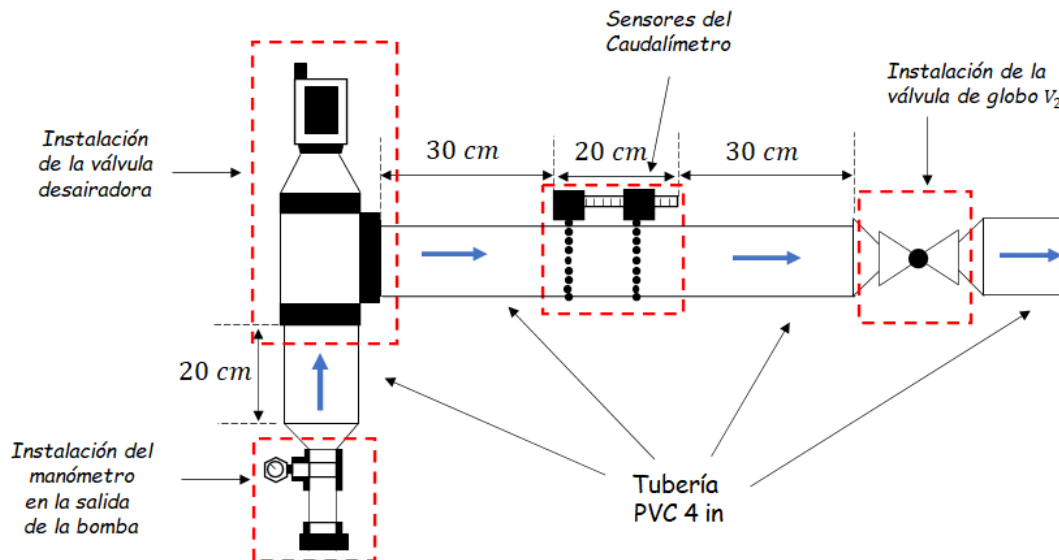


Figura 3.32: Instalación de los sensores del caudalímetro F601

Fuente propia

## L. Selección del reductor de turbulencias

En la descripción de la instalación de la tubería de descarga (Literal F, Sección 3.2.5.2) se especificó que se utilizaría un reductor de turbulencias en la salida de la tubería de descarga; por lo cual, dicho componente se selecciona según los siguientes requerimientos:


- Costo económico reducido.
- Debe ser desmontable para facilitar las tareas de mantenimiento.
- El amortiguamiento que genere en la salida de la tubería de descarga debe garantizar que el flujo reingrese al tanque sin generar mayor disturbio en la superficie, ya que se desea evitar derramamientos de agua sobre los demás componentes del banco.

Por lo tanto, se opta por seleccionar un reductor de marca MABA Water, modelo COM-007, cuyas especificaciones se encuentran en la tabla 3.27 (MABA WATER):

Tabla 3.27: Especificaciones del reductor de turbulencia seleccionado

Fuente: <https://mabawater.com/producto/reductor-de-turbulencia-axolot-4%E2%80%B3>

Especificaciones del Reductor de Turbulencia seleccionado	
Marca	MABA Water
Modelo	COM-007
Materiales	Adaptador: PVC Reductor: Polietileno
Acople	Capacidad de acople a cualquier tubería de 3 o 4 in
Dimensiones	Altura: 18 cm Laterales: 25 cm



A pesar de que su adquisición implica una importación, se considera como la opción más adecuada por su bajo precio y porque el mantenimiento es sencillo, puesto que solo implica el desmontaje y limpieza del conjunto. Por lo tanto, el esquema de su instalación se muestra en la figura 3.33:

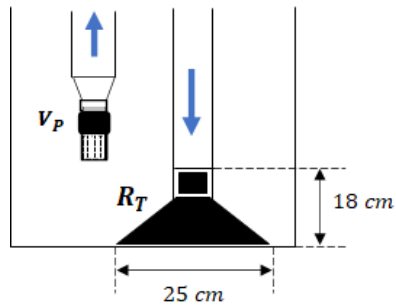


Figura 3.33: Instalación del reductor de turbulencia en la tubería de descarga


Fuente propia







### 3.2.5.4 Selección del tanque de reserva


Uno de los principales criterios para seleccionar el tanque de reserva consiste en considerar el material más adecuado que compondrá el modelo seleccionado; la empresa “Fibras y Normas de Colombia S.A.S”, proveedora de servicios de tratamiento de agua a nivel nacional en Colombia, publicó un blog en su sitio web donde se mencionan las ventajas, desventajas y aplicaciones de los distintos tipos de tanques de almacenamiento que normalmente se utilizan en la actualidad, los cuales se clasifican principalmente según el material con el cual se fabrican. En la tabla 3.29 se encuentra detallada la información de los diversos tanques de almacenamiento:

Tabla 3.28: Ventajas y desventajas de los distintos tipos de tanques de almacenamiento

Fuente adaptada de: <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/tanques-almacenamiento-agua-tipos-ventajas-desventajas/>

Tanques de almacenamiento			
Material	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Polietileno o u otros polímeros	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bajo temperatura ambiente, no desprenden sedimentos que afecten la composición de líquido almacenado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No son capaces de contener líquidos con altas temperaturas sin desprender material de sus paredes internas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Almacenamiento de agua para uso cotidiano.</li> </ul> 

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No presentan problemas de corrosión.</li> <li>▪ Tienen alta resistencia a la proliferación de algas y bacterias.</li> <li>▪ Fácil manejo y bajo costo económico</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transporte de sustancias líquidas.</li> </ul> 
Fibras de vidrio	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resisten altas y bajas temperaturas, por lo cual se pueden ubicar en la intemperie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sus dimensiones geométricas son bastante pronunciadas, por lo cual normalmente no se utilizan en interiores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cisternas domésticas</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reservas industriales de agua</li> </ul> 
Aleaciones ferrosas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pueden almacenar sustancias con altas temperaturas</li> <li>▪ Poseen mayor capacidad para sellar sustancias contaminantes con contenido tóxico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tienen menor resistencia a la corrosión y dependiendo de la aleación, pueden requerir un recubrimiento especial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Industria alimenticia y farmacéutica.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transporte de sustancias derivadas del petróleo.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Almacenamiento de sustancias radiactivas.</li> </ul> 

<p>Concreto</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Son la opción más económica para almacenar grandes cantidades de agua, por eso generalmente se utilizan en la intemperie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Si el concreto no es elaborado correctamente, pueden surgir problemas de fugas por filtración.</li> <li>▪ Surgen grietas en sus paredes por las variaciones de temperatura.</li> <li>▪ Tienen mayor tendencia a la proliferación de algas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Almacenamiento de aguas residuales:</li> </ul> 
-----------------	---	--	---

Además del material, otro factor que se debe considerar indispensablemente para la selección del tanque de reserva del banco es el volumen del fluido desplazado a través de la red de tuberías, ya que el nivel de la superficie en el tanque disminuirá una vez que se hayan iniciado los tiempos de operación de la bomba para realizar los ensayos.

Por lo tanto, el descenso en el nivel de la superficie es un parámetro para seleccionar un modelo de tanque que tenga el espacio interno suficiente para garantizar que se cumpla la sumergencia definitiva de la tubería de succión (sección 3.2.5.1), así como asegurar que los componentes sumergidos, es decir, la válvula de pie y el reductor de turbulencias, se puedan acomodar sin mayor dificultad.

Para calcular el descenso del nivel de la superficie se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El descenso del nivel se calculará en base al esquema preliminar del banco que se muestra en la figura 3.32, donde las longitudes de las tuberías se han establecido en base a las instalaciones de los diversos componentes que se describieron en las secciones 3.2.5.2 y 3.2.5.3.

- El descenso del nivel se obtiene a partir del volumen del líquido desplazado durante el inicio de la operación de la bomba; la magnitud de dicho volumen corresponde con la del volumen interno del segmento de la tubería de impulsión que no se encuentra sumergido. Esto se debe a que la bomba ensayada estará cebada antes de su puesta en marcha, es decir, la tubería de succión y la carcasa de la bomba estarán llenas de agua antes de iniciar la operación al principio de los ensayos de cavitación.
- Entre mayor sea el volumen interno del tanque, menor será el descenso del nivel de la superficie. En el caso del banco de ensayos, si el espacio designado para el tanque fuera ocupado por un modelo con forma prismática, la capacidad de almacenamiento sería mucho mayor que si se utilizara un tanque con forma cilíndrica; por lo tanto, se opta por calcular el descenso del nivel con un tanque cilíndrico para seleccionar un modelo bajo condiciones críticas.
- Considerando las dimensiones de la tubería de la red, la válvula de pie y el reductor de turbulencias, se estima que un diámetro interno de 60 cm para el tanque cilíndrico no complicará la instalación de dichos componentes.

En el esquema de la figura 3.34 se muestran las longitudes de las tuberías del banco de ensayos, las cuales se han establecido en base a las instalaciones de los componentes:

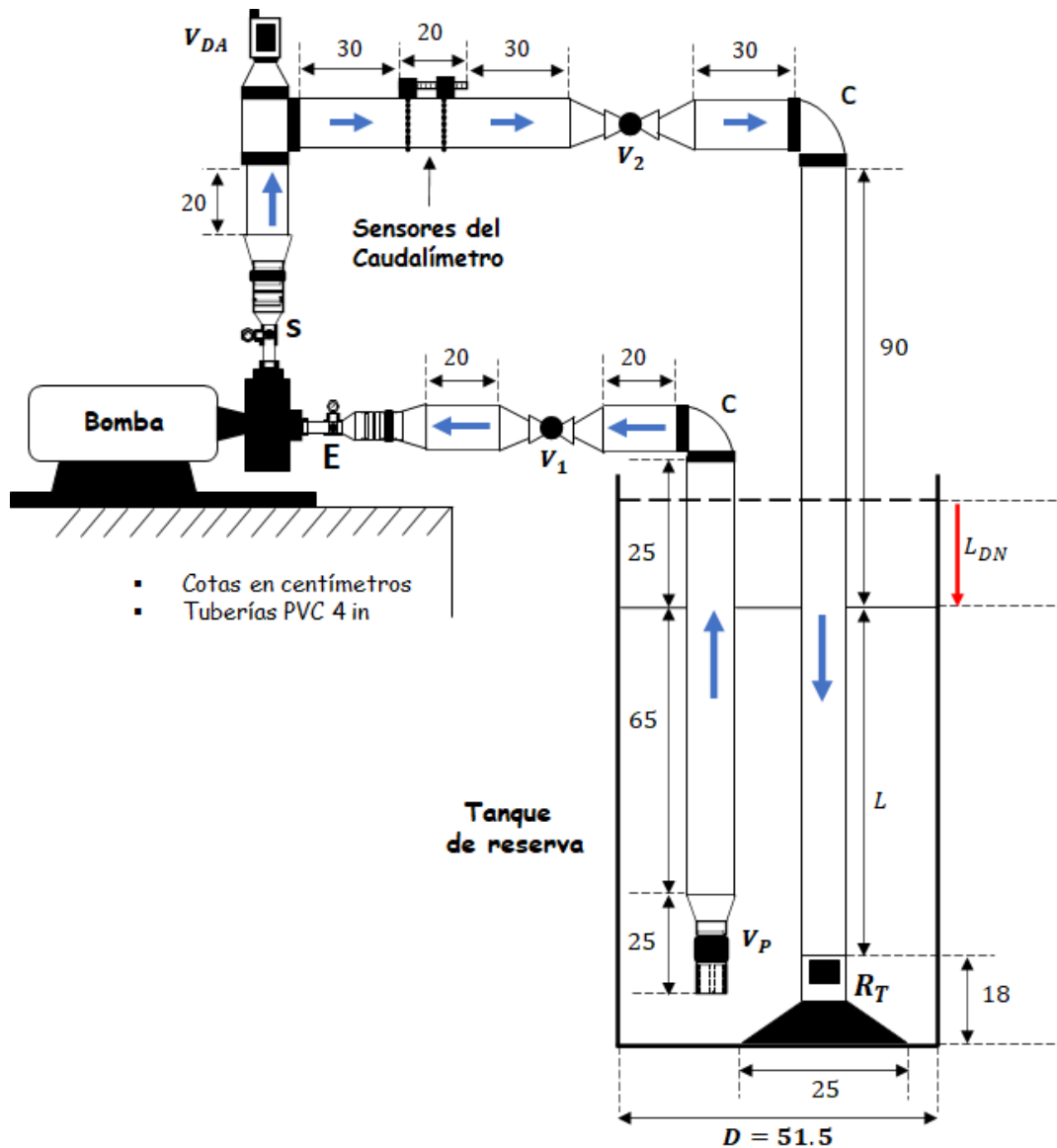


Figura 3.34: Dimensiones aproximadas de las tuberías del banco de pruebas de cavitación

Fuente propia

A partir de las consideraciones y de la figura 3.34 se obtienen los siguientes datos:

- La longitud del segmento de la tubería de impulsión que no estará sumergido suma un total de  $L_{TI} = 220 \text{ cm} = 2.20 \text{ m}$ .
- El diámetro interno del tanque se asume de  $D_{int T} = 60 \text{ cm} = 0.6 \text{ m}$
- La tubería seleccionada de 4 in cuenta con las siguientes medidas:

- $D_{int\ 4\ in} = 100.84\ mm = 0.10084\ m$
- $D_{ext\ 4\ in} = 114.30\ mm = 0.11430\ m$
- El descenso de nivel se designa con las letras  $L_{DN}$  y se indica con la flecha roja.

Por lo tanto, el volumen desplazado  $V_D$  se calcula con la siguiente expresión:

$$V_D = \frac{\pi}{4} D_{int\ 4\ in}^2 * L_{TI} \quad 3.16$$

$$V_D = \frac{\pi}{4} (0.10084)^2 * 2.20$$

$$V_D = 0.0176\ m^3$$

El descenso del nivel de la superficie  $L_{DN}$  se calcula a partir del volumen desplazado y considerando la sección de la tubería de succión que se encuentra sumergida en el tanque:

$$V_D = \left(\frac{\pi}{4}\right) (D_{int\ T}^2 - D_{ext\ 4in}^2) * L_{DN}$$

$$L_{DN} = \frac{V_D}{(\pi/4) * (D_{int\ T}^2 - 2 D_{ext\ 4in}^2)} \quad 3.17$$

$$L_{DN} = \frac{0.0176\ m^3}{(\pi/4) * (0.60^2 - 2 * 0.11430^2)}$$

$$L_{DN} = 0.0671\ m \cong 6.7\ cm$$


Por lo tanto, el descenso de nivel tendrá una magnitud de 6.5 cm con el uso de un tanque cilíndrico de 60 cm de diámetro interno. Basándonos en el cálculo anterior, en las medidas de la instalación de la válvula de pie de la figura 3.13, en la sumergencia de la tubería de succión de la figura 3.32 y en la instalación del reductor de turbulencia de la figura 3.31, el tanque seleccionado deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Por los cálculos del descenso de nivel, el diámetro interno del tanque será mayor o igual que 60 cm.
- Garantizar espacio suficiente para instalar la válvula de pie y el reductor de turbulencia, garantizando que la sumergencia de la tubería de succión se cumpla después de ocurrir el descenso estimado de nivel, cuando inicien los tiempos de operación.
- Bajo costo económico
- Alta facilidad para desmontaje por los trabajos de mantenimiento del banco.
- Instalación sencilla de un sistema de desagüe.

Por lo tanto, se opta por utilizar un tanque de polietileno de marca Fluid Containment con las siguientes características técnicas:

*Tabla 3.29: Características técnicas del tanque seleccionado*

*Fuente: <https://fluidcontainment.com/envases-plasticos/tambores-plasticos/>*

<b>Tanque de almacenamiento para el banco de ensayos</b>		
Marca	Fluid Containment	
Material	Polietileno de alta densidad	
Peso	15 kg	
Capacidad	220 litros/58 galones	
Profundidad	110 cm	
Diámetro promedio	60 cm	

El esquema de la figura 3.35 muestra las dimensiones de la instalación del tanque:

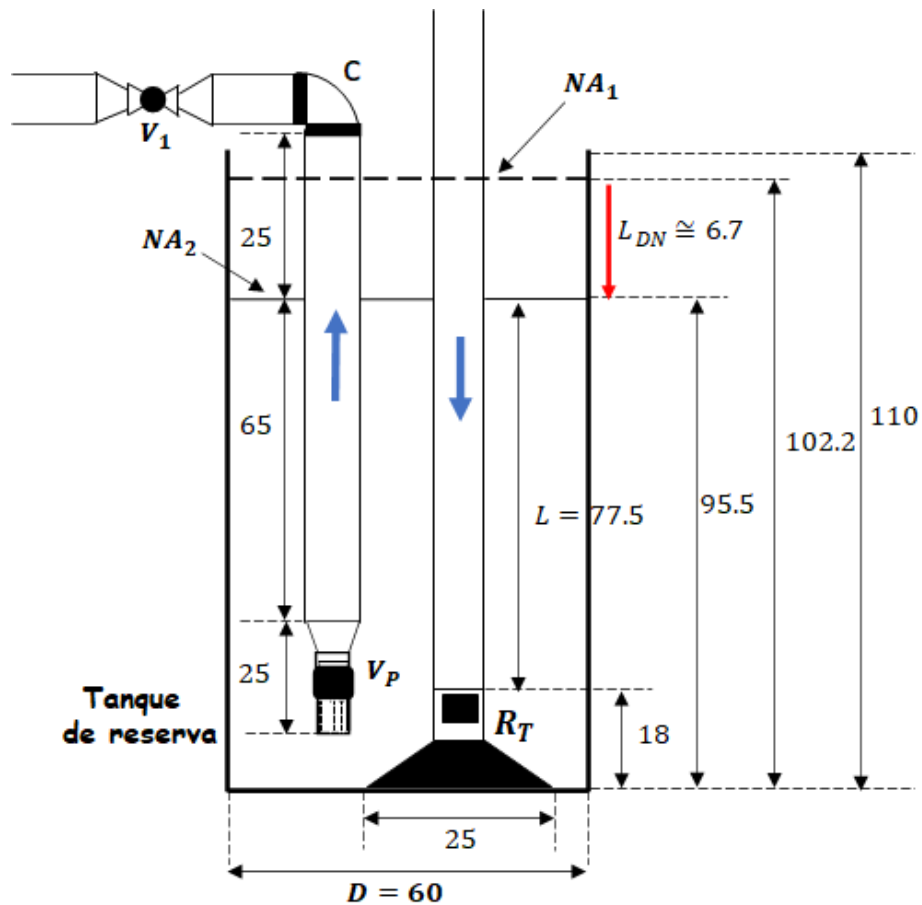


Figura 3.35: Instalación del tanque de reserva

Donde

- $NA_1$ : Nivel de agua en el tanque antes del inicio de operación de la bomba
- $NA_2$ : Nivel de agua en el tanque durante la operación de la bomba.
- La distancia  $L$  adopta una magnitud de 77.5 cm ya que dependía de las dimensiones de tanque seleccionado.

### 3.2.5.5 Dimensiones aproximadas de la red de tuberías

Tomando en cuenta todas las instalaciones que se han detallado en secciones anteriores y los componentes que se ha seleccionado, el esquema de la figura 3.34 pasaría a tomar las dimensiones que se muestran en la figura 3.36,

donde básicamente se presentan las dimensiones aproximadas que tendría la red de tuberías del prototipo del banco de pruebas:

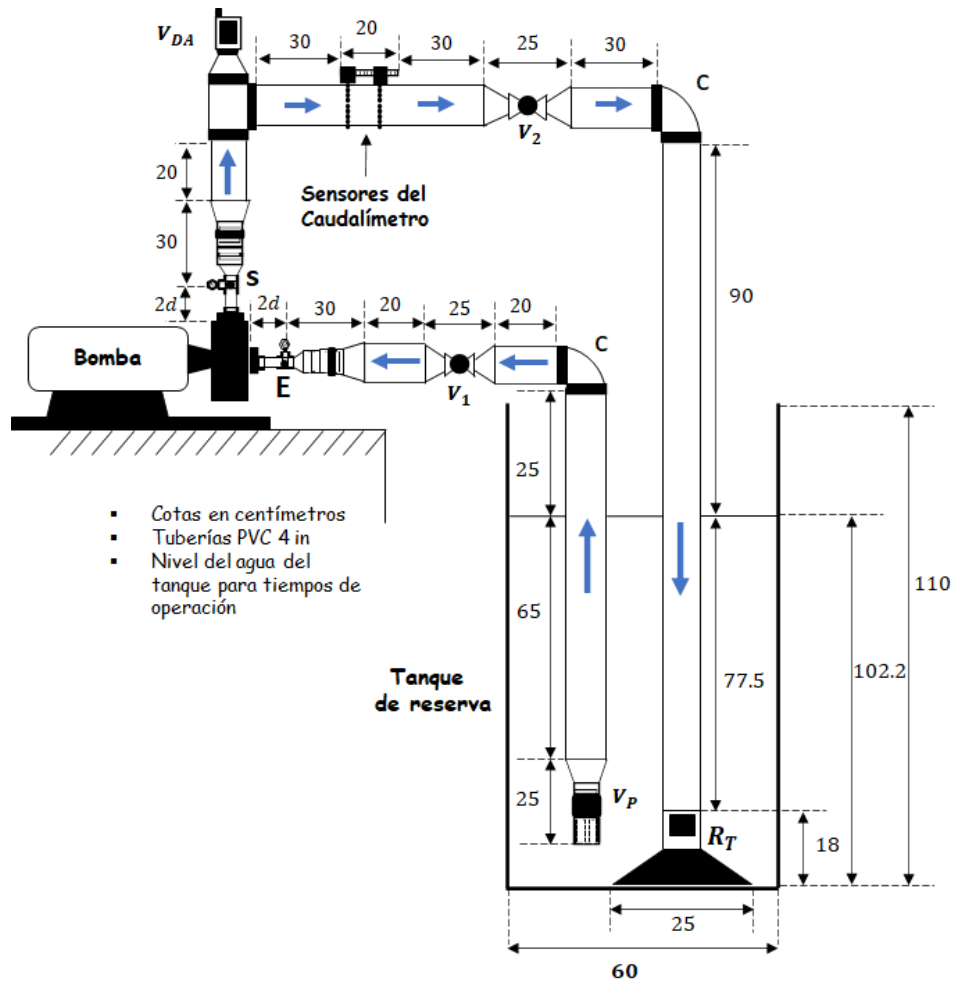


Figura 3.36: Dimensiones aproximadas de la red de tuberías del banco de pruebas

Fuente propia

Para tal efecto se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las cotas se han determinado en base a:
  - El nivel del agua  $NA_2$  en la superficie del tanque corresponde con que se tendrá durante los tiempos de operación del banco.
  - La sumergencia definitiva de la tubería de succión y las dimensiones geométricas del tanque seleccionado.

- Las dimensiones de las bombas de la familia de referencia (Tabla AIII.1, Anexo III)
  - Las características geométricas de las instalaciones de las válvulas reguladoras, detalladas en la figura 3.12.
  - Las características geométricas de la instalación de la válvula de pie, detalladas en la figura 3.13.
  - Las características geométricas de las instalaciones de los dispositivos de medición, detalladas en las figuras 3.15 y 3.30.
  - Las dimensiones designadas para la tubería de descarga, las características geométricas del tanque seleccionado y los distintos niveles de agua almacenada según los tiempos de operación del banco, los cuales se detallan en la figura 3.35.
- Los componentes se designan con las siguientes letras:
    - E: Posición del vacuómetro en la entrada de la bomba
    - S: Posición del manómetro en la salida de la bomba
    - $V_p$ : Válvula de pie
    - $V_{DA}$ : Válvula desariadora
    - $R_T$ : Reductor de turbulencia
    - $V_1$  y  $V_2$ : Válvulas de globo
    - C: Codos de 90°
  - La cota  $2d$  se refiere a la distancia que corresponde al doble del diámetro interno de ducto de la entrada/salida de la bomba ensayada; las magnitudes de dichas cotas se encuentran en la tabla 3.12 y dependerán directamente de las características geométricas de la bomba que se quiera ensayar.

### **3.3 Diseño de estructura de soporte**

El diseño de la estructura que soportará los diversos componentes que forman el banco de ensayos de cavitación se compone de distintas etapas de desarrollo, entre las cuales se encuentran las siguientes

1. Establecimiento de la geometría preliminar de la estructura: En esta etapa se determinará la geometría preliminar de la estructura de soporte en base al esquema de la red de tuberías que se muestra en la figura 3.36; asimismo, se seleccionará el tipo de elementos que se utilizarán para armar dicha estructura en base a las ventajas que éstos puedan ofrecer al momento del montaje.
2. Determinación de las cargas y puntos críticos: tomando en cuenta los componentes de la red de tuberías (figura 3.36), se deberán determinar las principales cargas que la estructura tendrá que soportar. Localizando los puntos críticos de la estructura, se procede a calcular las fuerzas cortantes y momentos flectores que las cargas ejercerán sobre los elementos que se encuentran en dichas ubicaciones.
3. Selección del perfil y análisis de esfuerzos: Tomando como referencia las características geométricas de un perfil cuadrado normado, se procederá a analizar los esfuerzos provocados por las cargas resultantes y a comprobar si dicho perfil cumplirá con un factor de seguridad predeterminado.
4. Análisis de sujeciones: Tomando como referencia el perfil seleccionado y el punto crítico, se procederá a determinar el tipo de sujeción que se utilizará y se realizarán los cálculos respectivos para su caracterización.
5. Selección de rodos: Se seleccionarán los rodos que se utilizarán para movilizar la estructura del banco en base a las cargas críticas.

6. Establecimiento de la geometría definitiva de la estructura: según los resultados de los análisis efectuados, se modificará la forma de la estructura agregando diversos refuerzos que brinden mayor estabilidad a todo el sistema del banco.

El desarrollo de los pasos anteriores se presenta entre las secciones 3.3.1 y 3.3.6.

### 3.3.1 Establecimiento de la geometría preliminar de la estructura de soporte.

La estructura que soportará los diversos componentes que forman el banco de ensayos consiste de un conjunto de marcos rígidos que estarán armados con tubos estructurales de sección rectangular; en la siguiente tabla se muestran las ventajas y desventajas de estas piezas:

*Tabla 3.30: Ventajas y desventajas de los tubos estructurales*

<b>Tubos estructurales de sección rectangular</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La facilidad de manipulación que ofrecen estas piezas para armar la estructura es mucho mayor que la de los tubos de sección circular.</li> <li>▪ La superficie plana de sus paredes permite desarrollar cordones de soldadura sin requerir mayor habilidad técnica.</li> <li>▪ Es la opción más económica para montar este tipo de estructura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El acero que los compone normalmente es altamente propenso a corrosión si no se les da un recubrimiento con pintura anticorrosiva.</li> </ul>

A pesar de que este tipo de piezas son bastante propensas a corroerse, se considera que las ventajas que ofrecen para el montaje tiene del banco tienen

mayor peso, pues el problema de corrosión se puede solucionar garantizando que la verificación de la capa anticorrosiva sea una de las tareas de mantenimiento; por lo cual, las especificaciones del tubo estructural que se utilizará se determinarán a través de un análisis de esfuerzos en la sección 3.3.3, donde se tomará en cuenta las cargas principales a las que la estructura estará sometida, entre las cuales se encuentra el peso de la bomba y el tanque de almacenamiento.

En cuanto a las características de la estructura, se encuentran las siguientes:

- La estructura de marcos rígidos consistirá de dos niveles para satisfacer el requerimiento de ubicar el tanque de almacenamiento a una altura inferior de la bomba
- La estructura estará soportada en la parte inferior por ocho rodos industriales para garantizar la movilidad.
- La estructura contará con dos soportes, correspondientes a la tubería de succión e impulsión.
- La geometría de la estructura se desarrolló tomando en cuenta las medidas especificadas en el esquema de la figura 3.36.

En la figura 3.37 se muestra la geometría resultante de la estructura de soporte, donde las cotas se encuentran en milímetros.

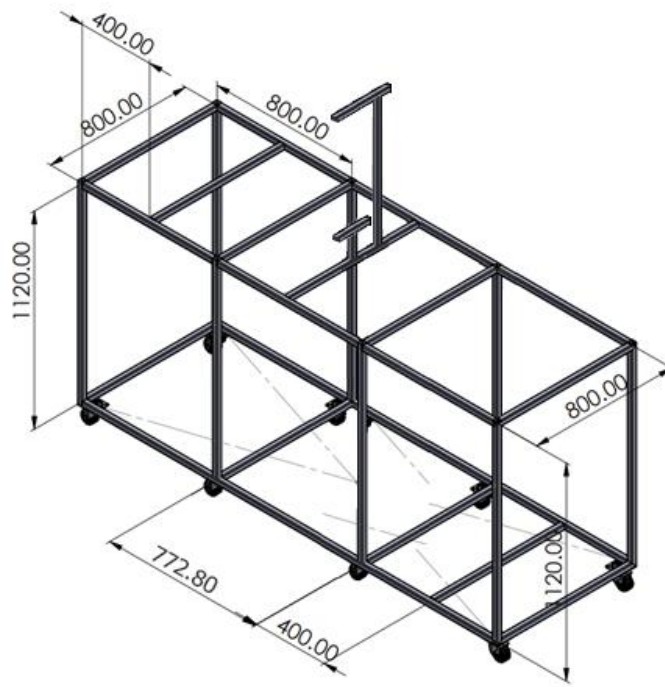


Figura 3.37: Estructura de soporte

Fuente propia

En el primer nivel se ubicará el tanque de almacenamiento y en el segundo nivel la bomba; adicionalmente la estructura cuenta con un soporte para evitar deflexiones en la tubería.

### 3.3.2 Determinación de cargas y puntos críticos

Para comenzar con el análisis estructural se definirán las cargas a las que la estructura estará sometida, entre las cuales principalmente se encuentran el peso de la bomba y el tanque de almacenamiento; para tal efecto se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Debido a que el diseño de la estructura de soporte está contemplado para condiciones críticas, el peso que se tomará en cuenta será el representativo para las los motores de las bombas de 7.5 hp, ya que esta es la mayor potencia nominal permisible que se podrá ensayar;

asimismo, se tomará como referencia el dato del catálogo del fabricante Franklin Electric (Tabla AIII.1, Anexo III).

- En lo relacionado con el tanque de almacenamiento, tal y como se mencionó en la sección 3.2.5.4, se cuenta con un tanque con capacidad de 58 galones, el peso se determinará para el caso que el tanque se encuentre al 100% de su capacidad, aun cuando en la práctica no suceda de esta manera. Además, se tomará en cuenta la masa del material del tanque que se especifica en la tabla 3.29, la cual posee un valor de  $m_{tanque} = 15 \text{ kg}$ .
- Las tuberías se asumirán como cuerpos rígidos, con una masa de 20.453 kg cada 6 metros, según las especificaciones de las tuberías que se muestran en el catálogo de Amanco (Anexo III. Tabla AIII.8). El peso adicional corresponde al agua en su interior. Cada tubería estará apoyada por un soporte ubicado en la parte central del banco de ensayos.
- Se considerará la carga dinámica del flujo ejercida a las tuberías, para un caudal de 100 GPM.
- Para desarrollar el diseño de la estructura bajo condiciones críticas, se asume que el agua que se utilizará posee la densidad mayor permitida por la norma ISO 9906, la se encuentra especificada en la tabla 2.1 y posee una magnitud de  $1050 \text{ kg/m}^3$ .

En lo que respecta al peso de la bomba ensayada, se observa en el catálogo de bombas centrifugas Franklin Electric (Tabla AIII.1, Anexo III) que las bombas de 7.5 hp de la serie AG presentan un peso de  $143 \text{ lb}$ , por lo tanto, la carga de la bomba se considera así:

$$W_{bomba} = 143 \text{ lb} = 636.10 \text{ N}$$

En cuando a la carga de tanque, se utilizará la densidad especificada en las consideraciones para calcular la carga ejercida por este elemento.

$$V_{tanque} = 58 \text{ gal} = 0.2196 \text{ m}^3$$

$$\rho_{agua} = 1050 \text{ kg/m}^3$$

Aplicando la definición de densidad:

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

Despejando:

$$m_{agua} = \rho_{agua} V_{tanque} = (1050 \text{ kg/m}^3)(0.2196 \text{ m}^3) = 230.58 \text{ kg}$$

Por lo tanto:

$$W_{tanque} = g * (m_{agua} + m_{tanque}) \quad (3.18)$$

$$W_{tanque} = (9.81 \text{ m/s}^2)(230.58 \text{ kg} + 15 \text{ kg}) = 2409.14 \text{ N}$$

Como se mencionó con anterioridad las tuberías se asumirán como cuerpos rígidos, primero determinaremos la carga dinámica ejercida por el fluido, luego determinaremos el peso en cada tramo de tubería para posteriormente determinar la carga ejercida sobre los soportes, comenzando con la tubería de impulsión, determinaremos las cargas  $q$ ,  $W_{I,1}$  y  $W_{I,2}$ , tomando como referencia el diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura 3.38.

Para determinar la carga dinámica en la tubería de impulsión, consideraremos el volumen de control desde la entrada de la tubería hasta la salida, designando a la fuerza en la entrada debido al flujo como  $F_s$ , la fuerza en la salida debido al flujo como  $F_o$ , y la fuerza debido a la carga dinámica en el soporte como  $F_y$ , ubicadas como se muestra en la figura 3.38.

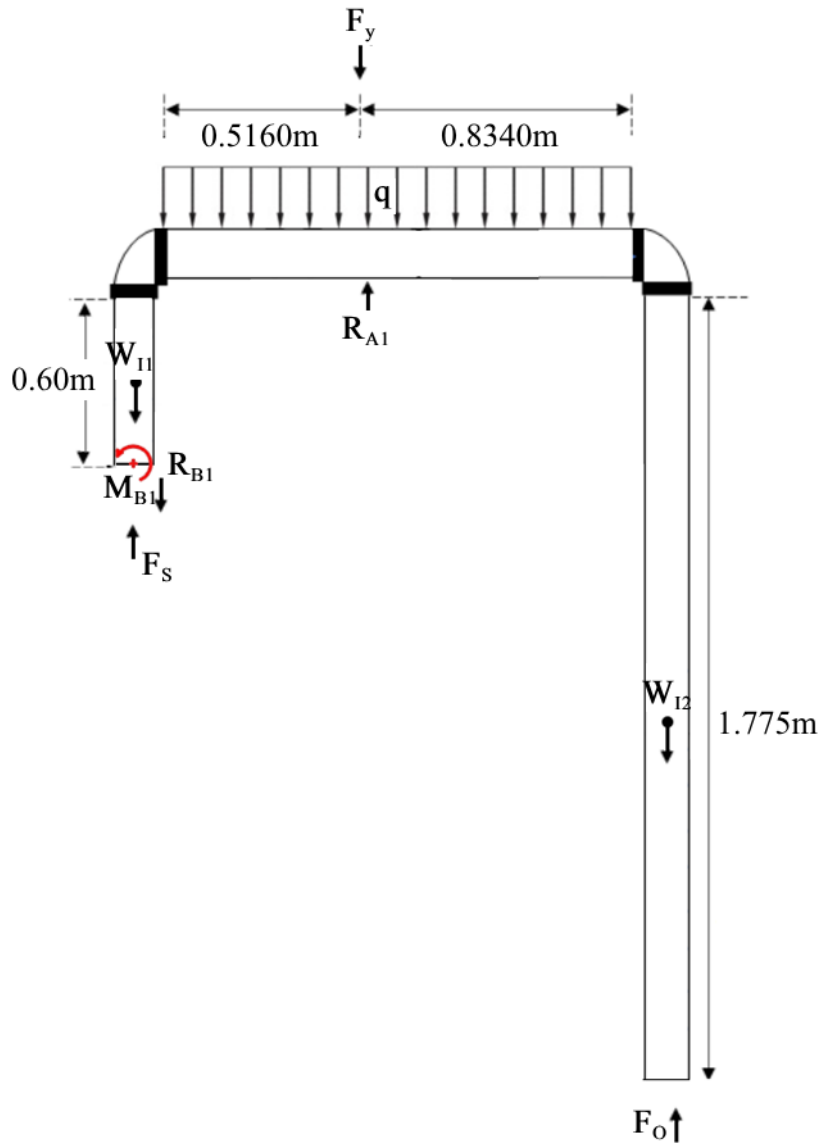


Figura 3.38: DCL de la tubería de impulsión.

Fuente propia

Por la definición de la cantidad de movimiento se llega a la siguiente ecuación:

$$F_y - F_S - F_O = \frac{Q}{\rho g} * (v_o - v_E)$$

Como se determinó con anterioridad el caudal máximo con el que trabajará el banco de ensayos es de 100 GPM, la densidad del flujo es de  $1050 \text{ kg/m}^3$ , y tenemos que  $v_o = -v_e$ , por lo que llegamos a la siguiente expresión:

$$F_y - F_s - F_o = \frac{0.006309 \frac{m^3}{s}}{\left(1050 \frac{kg}{m^2}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} (2v)$$

$$F_y - F_s - F_o = \frac{0.006309 \frac{m^3}{s}}{\left(1050 \frac{kg}{m^2}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} \left(2 \left(\frac{0.006309 \frac{m^3}{s}}{\frac{1}{4} \pi (0.10084)^2}\right)\right) = 9.68 \times 10^{-7} N$$

Por lo que determinamos que la carga dinámica no es considerable para efectos de cálculo.

El diámetro interior de la tubería es de 100.84 mm y su sección transversal es:

$$A_s = \frac{\pi}{4} (0.10084)^2 = 0.007986 m^2$$

Cada 6 metros de tubería tiene una masa de 20.453 kg, por lo que:

$$W_{tubería} = 3.41 kg/m$$

Se procede a calcular la carga  $W_{I1}$ :

$$V_{I1} = (0.007986 m^2)(0.60 m) = 0.004792 m^2$$

$$W_{I1} = [W_{tubería} * L + V_{I1} * \rho_{agua}] * g \quad (3.19)$$

$$W_{I1} = \left[ \left(3.41 \frac{kg}{m}\right) (0.60 m) + (0.004792 m^3) \left(1050 \frac{kg}{m^3}\right) \right] \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) = 69.43 N$$

$$W_{I1} = 69.43 N$$

La carga  $W_{I2}$  se calcula con la ecuación 3.19 pero aplicada a la tubería de mayor distancia:

$$V_{I2} = (0.007986 m^2)(1.775 m) = 0.01418 m^3$$

$$W_{I2} = \left[ \left(3.41 \frac{kg}{m}\right) (1.775 m) + (0.01418 m^3) \left(1050 \frac{kg}{m^3}\right) \right] \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) = 205.44 N$$

$$W_{I2} = 205.44 N$$

Y para la carga distribuida q:

$$V_q = (0.007986\text{m}^2)(1.35) = 0.01078\text{m}^3$$

$$q = \left[ \left( 3.41 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right) + \frac{(0.01078 \text{ m}^3) \left( 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{1.35\text{m}} \right] \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 115.68 \text{ N/m}$$

$$q = 115.68 \text{ N/m}$$

Teniendo las cargas de la tubería, se procede a calcular las reacciones:

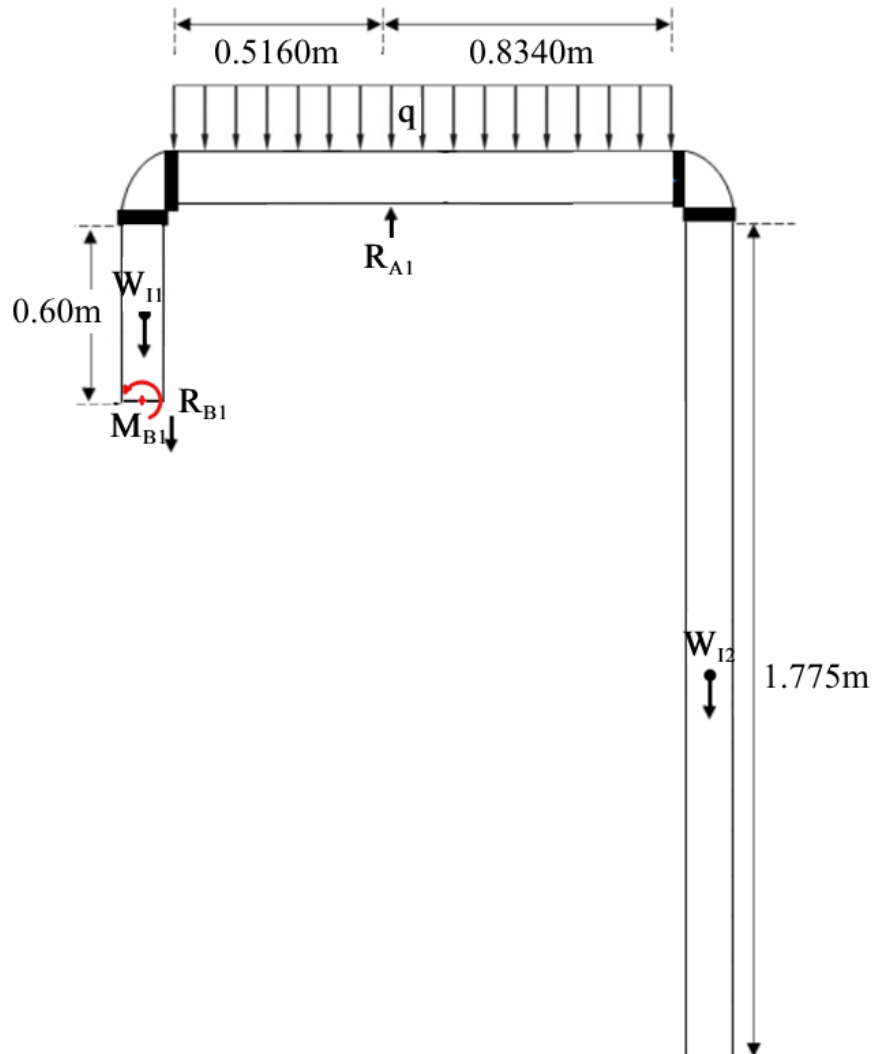


Figura 3.39: DCL de la tubería de impulsión

Fuente propia

A partir de la figura 3.39, se realiza una sumatoria de momentos en A:

$$\sum M_A = 0$$

$$(69.42 \text{ N})(0.5160 \text{ m}) - (205.44)(0.8340 \text{ m}) + (0.5160 \text{ m}) \left(115.69 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right) \left(\frac{0.5160}{2} \text{ m}\right) \\ - (0.8340 \text{ m}) \left(115.69 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right) \left(\frac{0.8340}{2} \text{ m}\right) + R_{B1}(0.5160 \text{ m}) = 0$$

$$R_{B1} = 315.75 \text{ N}$$

Sumatoria de fuerzas en Y:

$$\sum F_y = 0$$

$$-315.75 - 69.42 + R_A - 156.18 - 205.44 = 0$$

$$R_A = 746.79 \text{ N} = R_{IMP}$$

Sumatoria de momentos en B:

$$\sum M_B = 0$$

$$-(156.18 \text{ N})(0.675 \text{ m}) - (205.44)(1.35 \text{ m}) + (746.79 \text{ N})(0.5160 \text{ m}) + M_B = 0$$

$$M_B = -2.58 \text{ N/m}$$

Como siguiente punto se realiza el mismo procedimiento en la tubería de impulsión, a la longitud del tramo vertical le añadimos 10cm correspondientes al codo. Se procede a realizar un Bernoulli desde la entrada de la tubería hasta la salida, de la sección 3.2.3.2 se tiene que para un caudal de 100 GPM la presión en la entrada de la bomba es de -9.50 kPa, por lo que la presión en la entrada de la tubería se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{P_2}{\gamma} + 1.25 + H_{rE-O} = \frac{P_1}{\gamma}$$

$$H_{rE-O} = \frac{8 Q^2}{\pi^2 D^4 g} * \left( f * \frac{L}{D} + K_{codo} + K_{V1} + K_{VP} \right)$$

$$H_{rE-o} = \frac{8 (0.006309)^2}{\pi^2 (0.10084)^4 (9.81)} * \left( 0.0183 * \frac{2.40 \text{ m}}{0.10084} + 0.90 + 10 + 7 \right)$$

$$H_{rE-o} = 0.5832 \text{ m}$$

$$\frac{(-9500 \text{ Pa})}{(9.81)(1050)} + 1.25 + 0.5832 = \frac{P_1}{(9.81)(1050)}$$

$$P_1 = -9.38 \text{ kPa}$$

Ya obtenidas las presiones podemos proceder a calcular las fuerzas:

$$F_1 = P_1 A = (-9380) \left( \pi \left( \frac{0.10084}{2} \right)^2 \right) = -74.91 \text{ N}$$

$$F_2 = P_2 A = (-9500) \left( \pi \left( \frac{0.10084}{2} \right)^2 \right) = -75.87 \text{ N}$$

Se procede a calcular la carga dinámica en la dirección y:

$$F_y - F_1 = \frac{Q}{\rho g} * (v_o - v_E)$$

$$F_y + 74.91 = \frac{0.006309 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\left( 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \left( \left( \frac{0.006309 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{1}{4} \pi (0.10084)^2} \right) - 0 \right)$$

$$F_y = -74.91 \text{ N}$$

Aplicando lo mismo en la dirección x:

$$F_x - F_x = \frac{Q}{\rho g} * (v_o - v_E)$$

$$F_x + 75.87 = \frac{0.006309 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\left( 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \left( \left( \frac{0.006309 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{1}{4} \pi (0.10084)^2} \right) - 0 \right)$$

$$F_x = -75.87 \text{ N}$$

Ya que  $F_y \cong F_1$  y  $F_x \cong F_2$ , determinamos que la carga dinámica no es considerable para efectos de cálculos en la tubería de impulsión. En cuanto a la tubería de succión, se inicia el análisis con las fuerzas estáticas:

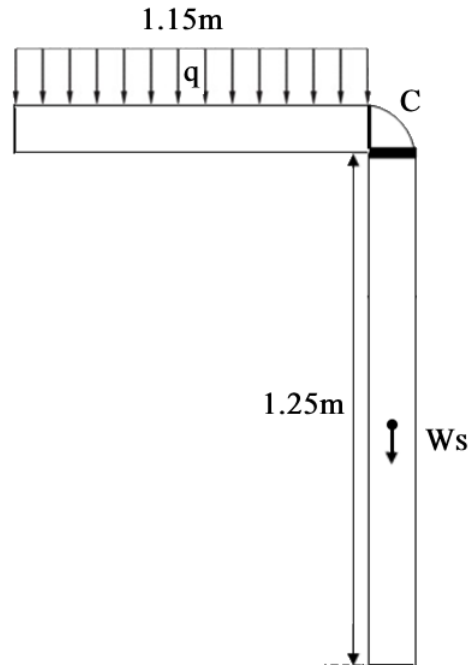


Figura 3.40: DCL de la tubería de succión  
Fuente propia

Se calcula la carga  $W_s$  aplicando la ecuación 3.16 para este caso:

$$V_s = (0.007986 m^2)(1.25 m) = 0.0099825 m^2$$

$$W_s = \left[ \left( 3.41 \frac{kg}{m} \right) (1.25 m) + (0.0099825 m^2) \left( 1050 \frac{kg}{m^2} \right) \right] \left( 9.81 \frac{m^2}{s} \right)$$

$$W_s = 144.64 N$$

Y para la carga distribuida q:

$$V_q = (0.007986 m^2)(1.15) = 0.009184 m^2$$

$$q = \left[ \left( 3.41 \frac{kg}{m} \right) + \frac{(0.009184 m^2) \left( 1050 \frac{kg}{m^2} \right)}{1.15 m} \right] \left( 9.81 \frac{m^2}{s} \right) = 115.68 N/m$$

$$q = 115.71 \text{ N/m}$$

Se procede a calcular las reacciones.

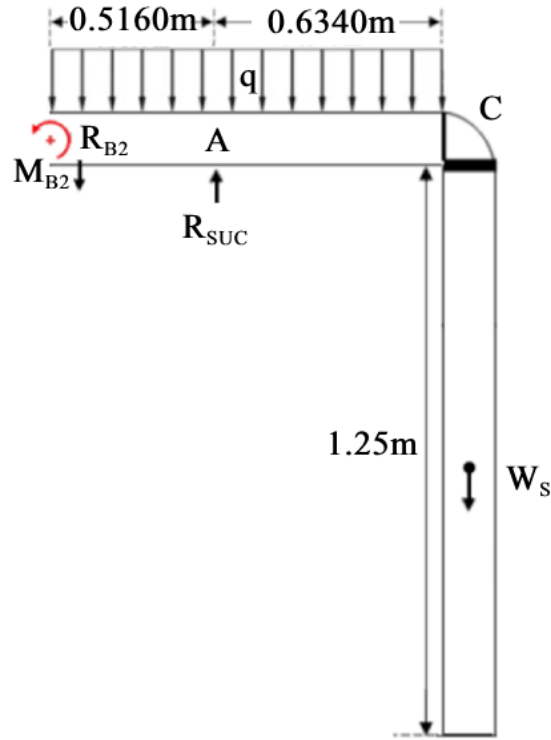


Figura 3.41: DCL de la tubería de succión

Fuente propia

Realizando la sumatoria de momentos en A:

$$\sum M_A = 0$$

$$-(144.64 \text{ N})(0.6340 \text{ m}) + (0.5160 \text{ m}) \left( 115.71 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) \left( \frac{0.5160}{2} \text{ m} \right) - (0.6340 \text{ m}) \left( 115.71 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) \left( \frac{0.6340}{2} \text{ m} \right) + R_{B2}(0.5160 \text{ m}) = 0$$

$$R_{B2} = 192.93 \text{ N}$$

Sumatoria de fuerzas en Y:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{suc} - 144.64 \text{ N} - 133.07 \text{ N} = 0$$

$$R_{Suc} = 277.71 \text{ N}$$

Sumatoria de momentos en B:

$$\sum M_B = 0$$

$$(-133.71 \text{ N})(1.15 \text{ m}) - (144.64 \text{ N})(1.15 \text{ m}) + (277.71)(0.5160 \text{ m}) + M_{B2} = 0$$

$$M_{B2} = 176.81 \text{ N/m}$$

En la figura 3.42 se muestran donde estarían ubicadas espacialmente dichas cargas. Las uniones entre los tubos estructurales que las soportan se indican con letras:

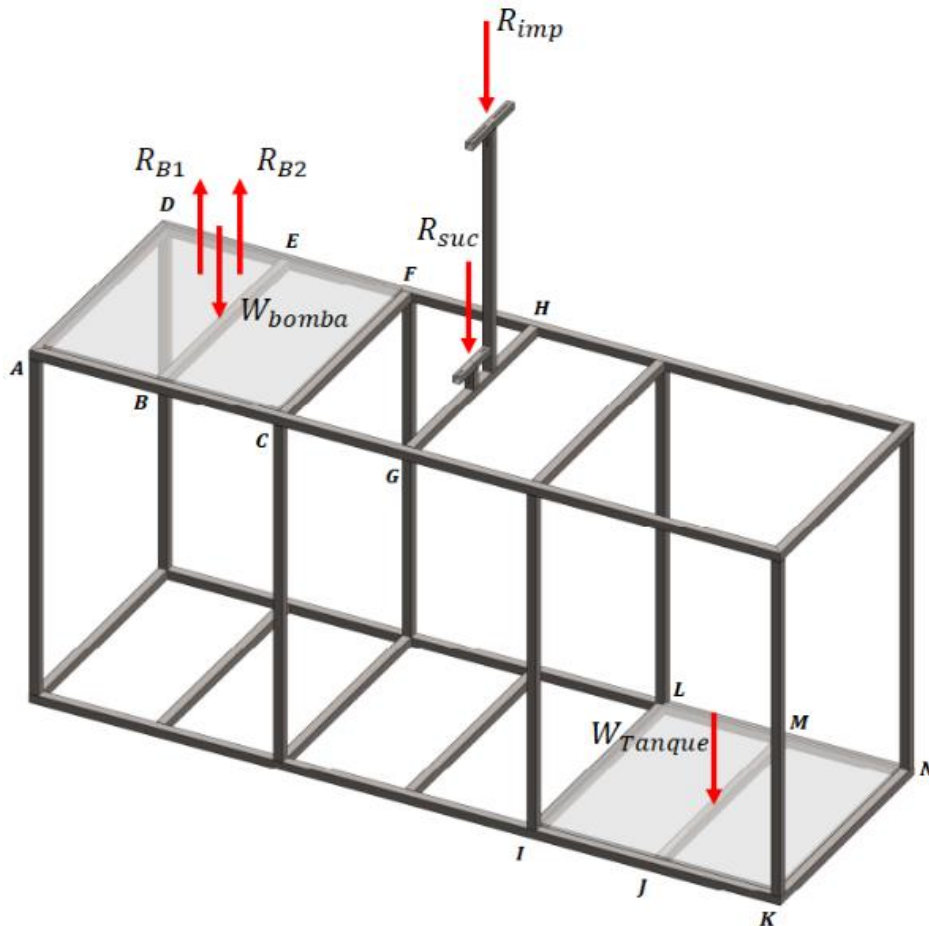


Figura 3.42: Ubicación espacial de cargas en estructura de soporte

Fuente propia

En relación a las cargas de la figura 3.42, se plantean las siguientes consideraciones:

- El análisis las secciones sujetas bajo cargas las idealizaremos como un sistema de cargas tributarias, suponiendo que las cargas del tanque y la bomba se distribuyen de manera uniforme a lo largo de las superficies indicadas en la figura anterior, así obteniendo una aproximación de como actuarían las fuerzas en dichos elementos.
- La carga ejercida por el tanque es considerablemente mayor que la carga ejercida por la bomba y las tuberías en el elemento GH; por lo cual, en la figura 3.42, por simple inspección se puede asumir que en la sección IJKLMN se encuentra la sección crítica que nos interesa analizar. Por lo tanto, se iniciará analizando la sección IJKLMN, determinando las fuerzas que actúan sobre los elementos que la componen.

En base a las consideraciones anteriores se procederá a analizar la sección IJKLMN para determinar las fuerzas y momentos críticos que actúan sobre los elementos, siguiendo los siguientes pasos:

- Se calculará la carga superficial en la sección IJKLMN.
- Siguiendo el procedimiento detallado en el libro “Análisis Estructural” del autor R.C. Hibbeler, se determinará si las cargas tributarias se transfieren en una dirección o dos direcciones.
- Se determinará cuál es el elemento que está sometido a la carga crítica.
- Se determinarán las reacciones, fuerzas cortantes y momentos flectores para el elemento estructural determinado.

Cómo primer paso se calculará la carga superficial, para ello se toma en cuenta que la superficie bajo análisis es de  $0.8 \times 0.8 \text{ m}$ :

$$w_{tanque} = \frac{W_{tanque}}{A_{KLOP}} = \frac{2409.14 \text{ N}}{0.64 \text{ m}^2} = 3764.28 \text{ N/m}^2$$

Para calcular las cargas tributarias sobre los elementos estructurales se seguirá el procedimiento detallado en el libro “Análisis Estructural” del autor R.C Hibbeler (Hibbeler, 2012); en donde se establece que si la relación entre los soportes transversales y laterales  $L_2/L_1 \geq 2$ , es permitido suponer que la carga se transfiere a los elementos en una dirección.

En este caso, ya que  $L_1 = 0.4 \text{ m}$  y  $L_2 = 0.8 \text{ m}$ , tal y como se muestra en la figura 3.43, esta condición se cumple. Por lo que puede suponer que una carga distribuida sobre la superficie IJKLMN, la cual será soportada por la viga central, en este caso el elemento JM.

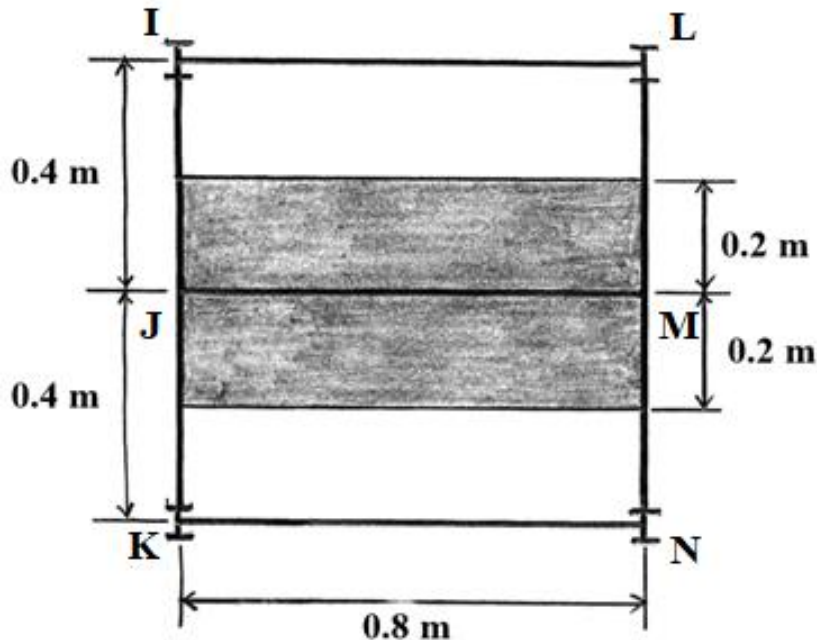


Figura 3.43: Plano estructural idealizado

Fuente: Análisis Estructural, R.C. Hibbeler

Por lo tanto, si se aplica una fuerza de  $3764.28 \text{ N/m}^2$  se obtendrá una intensidad máxima de:

$$(3764.28 \text{ N/m}^2)(0.8 \text{ m}) = 3011.42 \text{ N/m}$$

Que estará actuando sobre el centro del elemento estructural JM. Se analizará como una viga empotrada en ambos extremos, como se observa en la siguiente figura:

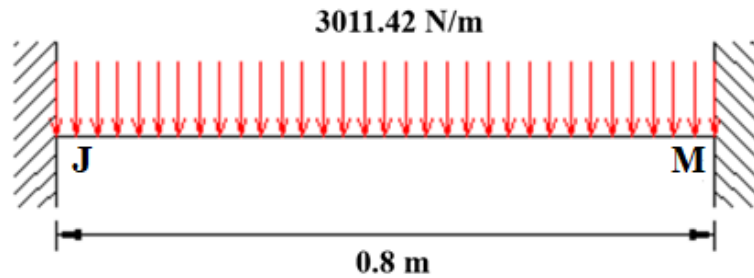


Figura 3.44: Elemento estructural JM

Fuente propia

Para determinar las reacciones, esfuerzos cortantes y momentos flectores se tomarán como referencia las ecuaciones de la tabla del texto “Elaboración de fórmulas analíticas y tablas de cálculo para las estructuras metálicas de acero según la normativa Eurocódigo 3”(Tabla A1.6, Anexo I).

$$R_J = R_M = \frac{pL}{2} \quad (3.20)$$

$$R_J = R_M = \frac{(3011.42 \text{ N/m})(0.8 \text{ m})}{2} = 1204.57 \text{ N}$$

$$V_J = R_M = 1204.57 \text{ N}$$

$$V_M = -R_M = -1204.57 \text{ N}$$

$$M_J = M_M = -\frac{pL^2}{12} \quad (3.21)$$

$$M_J = M_M = -\frac{\left(3011.42 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right)(0.8 \text{ m})^2}{12} = -160.60 \text{ Nm}$$

$$M_{x=\frac{L}{2}} = \frac{pL^2}{24} \quad (3.22)$$

$$M_{x=\frac{L}{2}} = \frac{\left(3011.42 \frac{N}{m}\right) (0.8 \text{ m})^2}{24} = 80.30 \text{ Nm}$$

Se obtienen los siguientes diagramas de fuerzas cortantes y momento flector:

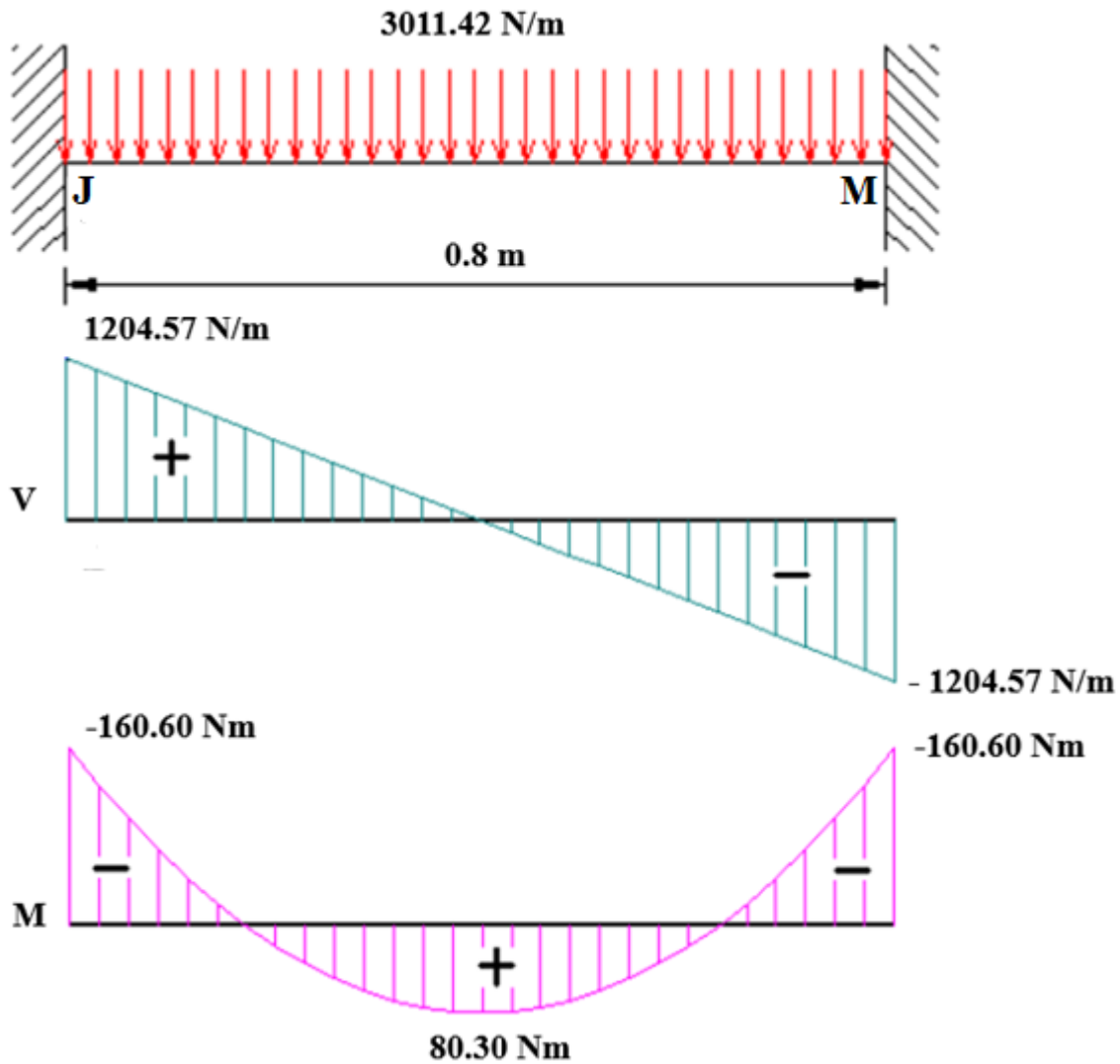


Figura 3.45: Diagrama de cortante y momento flector

Fuente propia

### 3.3.3 Selección del perfil y análisis de esfuerzos

A través del análisis de la sección 3.3.2 determinamos que el elemento bajo condiciones críticas es el JM, que se encuentra bajo cargas flectoras y cortantes.

Para realizar la selección del perfil a utilizar en la estructura se procederá al cálculo de esfuerzos, en este caso se utilizará la teoría de falla de Energía de Distorsión Máxima para Materiales Dúctiles, dicho análisis se realizará solo sobre el elemento JM. Para tales efectos se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El material a utilizar será ASTM A500 Grado A, para el cuál el esfuerzo máximo es de 310 MPa.
- Se tomará como mínimo un factor de seguridad de 2, el límite superior recomendado para usos donde las cargas y las condiciones ambientales no son severas, en el sitio “Factors of Safety”, The Engineering Toolbox (Tabla AIII.7, Anexo III)
- Para ejecutar los cálculos es necesario contar con las características del perfil, inicialmente se preseleccionará un perfil de 3/4 pulgadas y espesor de 1.5mm (Chapa 16; Tabla AIII.11, Anexo III) al ser de los perfiles de menor magnitud que se encuentran comercialmente; de no cumplir con el factor de seguridad se procederá a realizar nuevamente los cálculos con un perfil de magnitudes superiores, hasta encontrar el perfil que cumpla con las condiciones.

El esfuerzo normal máximo ocasionado por el momento flector, se calculará con la siguiente ecuación:

$$\sigma_M = \frac{|M|}{S} \quad (3.23)$$

Donde:

- $M$ : Momento flector con relación al eje neutro
- $S$ : Módulo de sección del perfil

De la figura AIII.11 (Anexo III) se obtiene que el módulo de sección para tubo cuadrado de  $\frac{3}{4}$  pulg y chapa 16 es de  $0.58 \text{ cm}^3$ .

$$\sigma_M = \frac{160.60 \text{ Nm}}{0.58 \text{ cm}^3} = \frac{160.60 \text{ Nm}}{5.80(10)^{-7} \text{ m}^3} = 276.90 \text{ MPa}$$

Se procede a calcular el esfuerzo cortante en la sección transversal, con la siguiente ecuación:

$$\tau_x = \frac{R_J}{A} \quad (3.24)$$

Donde  $A$  es la sección transversal del tubo estructural cuadrado, se extrae de la tabla (Figura AIII.11, Anexo III), y es igual a  $1.05 \text{ cm}^2$

$$\tau_x = \frac{1204.57 \text{ N}}{1.05 \text{ cm}^2} = \frac{1204.57 \text{ N}}{1.05(10)^{-4} \text{ m}^2} = 11.47 \text{ MPa}$$

Teniendo tanto el esfuerzo normal máximo, como el esfuerzo cortante, se procede a calcular el esfuerzo combinado utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_x^2} \quad (3.25)$$

Sustituyendo se obtiene:

$$\sigma = \sqrt{(276.90 \text{ MPa})^2 + 3(11.47)^2} = 277.61 \text{ MPa}$$

De la teoría de falla para materiales dúctiles se obtiene:

$$n = \frac{0.6(S_{m\acute{a}x})}{\sigma} \quad (3.26)$$

Sustituyendo los valores determinados, se obtiene el factor de seguridad:

$$n = \frac{0.6(S_{m\acute{a}x})}{\sigma} = \frac{0.6(310 \text{ MPa})}{277.61 \text{ MPa}} = 0.67$$

Se obtiene un factor de seguridad de 0.66, al no cumplir con el requerimiento de un factor de seguridad de 2 procederemos con el cálculo para un tubo de 1 1/4 pulgada, chapa 16 (1.50 mm):

De la figura AIII.11 (Anexo III) se obtiene que el módulo de sección para tubo cuadrado de 1 pulg y chapa 16 es de  $1.21 \text{ cm}^3$ .

$$\sigma_M = \frac{160.60 \text{ Nm}}{2.19 \text{ cm}^3} = \frac{160.60 \text{ Nm}}{21.90(10)^{-7} \text{ m}^3} = 73.33 \text{ MPa}$$

Se procede a calcular el esfuerzo cortante en la sección transversal, con la siguiente ecuación:

$$\tau_x = \frac{R_J}{A} \quad (3.27)$$

Donde  $A$  es la sección transversal del tubo estructural cuadrado, se extrae de la tabla (Figura AIII.11, Anexo III), y es igual a  $1.35 \text{ cm}^2$ :

$$\tau_x = \frac{1204.57 \text{ N}}{2.19 \text{ cm}^2} = \frac{1204.57 \text{ N}}{2.19(10)^{-4} \text{ m}^2} = 5.50 \text{ MPa}$$

Teniendo tanto el esfuerzo normal máximo, como el esfuerzo cortante, se procede a calcular el esfuerzo combinado utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_x^2} \quad (3.28)$$

Sustituyendo se obtiene:

$$\sigma = \sqrt{(73.33 \text{ MPa})^2 + 3(5.50)^2} = 73.95 \text{ MPa}$$

De la teoría de falla para materiales dúctiles se obtiene:

$$n = \frac{0.6(S_{m\acute{a}x})}{\sigma} \quad (3.29)$$

Sustituyendo los valores determinados, se obtiene el factor de seguridad:

$$n = \frac{0.6(S_{m\acute{a}x})}{\sigma} = \frac{0.6(310 \text{ MPa})}{73.95 \text{ MPa}} = 2.52$$

El resultado es un factor de seguridad de 2.52, por lo que se cumple con el requerimiento de un factor de seguridad mínimo de 2, por lo que seleccionamos un tubo estructural de 1 1/4 pulgada, chapa 16 (1.50mm).

### 3.3.3.1 Simulaci3n de cargas estáticas en software

Para fines de verificaci3n se realiza una simulaci3n de cargas estáticas en el software CAD Solidworks del sistema. Como se puede observar en la figura 3.46, el elemento bajo condiciones críticas es el elemento JM.

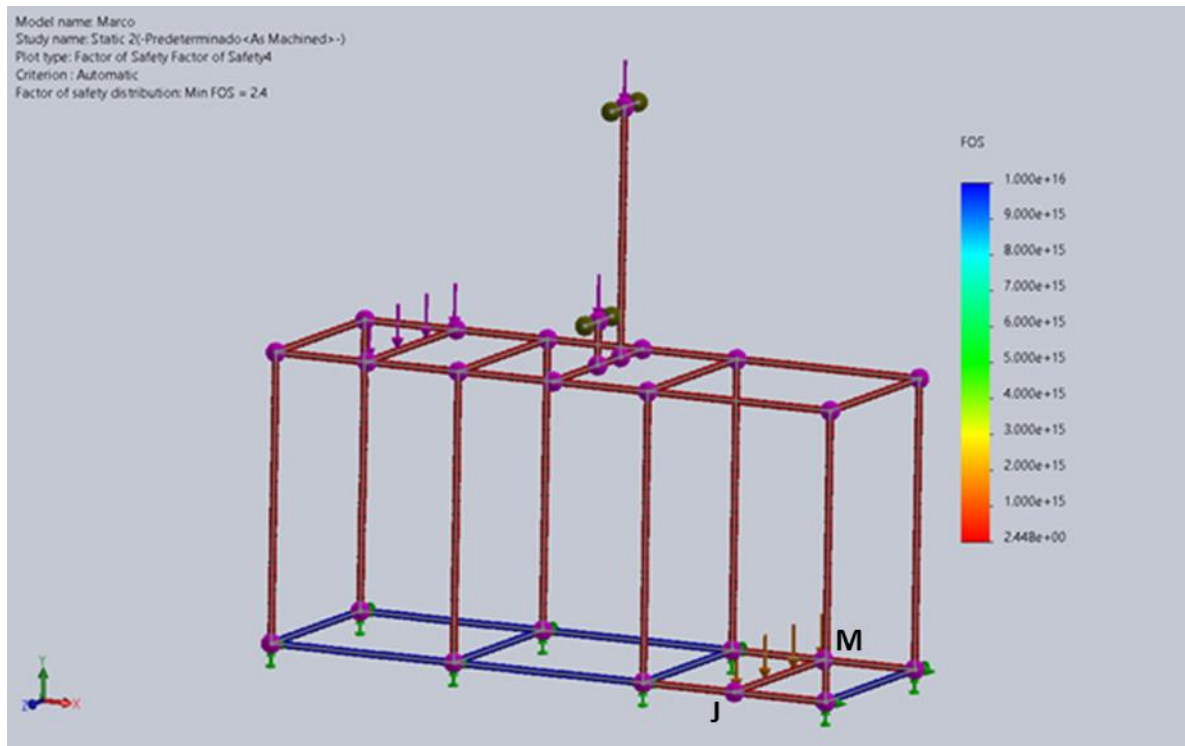


Figura 3.46: Análisis de cargas estáticas de la estructura

Fuente propia

De igual forma se puede observar que el factor de seguridad obtenido a través de la simulaci3n es de 2.4, un valor que cumple con el mínimo de 2.

### 3.3.4 Análisis de sujeciones

En primer lugar, se debe seleccionar el tipo de sujeción que se utilizará para el montaje de la estructura de soporte; en la tabla 3.31 se muestra una comparación entre las sujeciones por pernos y soldadura.

Tabla 3.31: Cuadro comparativo entre mecanismos de sujeción.

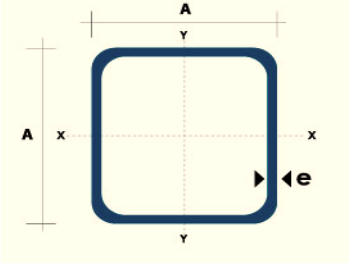
Cuadro comparativo entre mecanismos de sujeción		
Sujeción	Ventajas	Desventajas
Pernos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Son desarmables, lo cual facilita las tareas de mantenimiento y el cambio de piezas.</li> <li>▪ Dependiendo de los elementos a sujetar, su instalación puede no requerir de equipo especializado.</li> <li>▪ Normalmente se fabrican con materiales o recubrimientos anticorrosivos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Su instalación implica perforaciones que se pueden comportar como concentradores de esfuerzo.</li> <li>▪ Las vibraciones provocadas por tiempos de operación pueden debilitar la sujeción a largo plazo.</li> </ul>
Soldadura	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ofrece mayor libertad para sujetar elementos con cualquier geometría.</li> <li>▪ Las sujeciones con este método no se ven afectadas por las vibraciones de los tiempos de operación, por lo cual son pertinentes para el montaje de estructuras metálicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El costo económico que involucra es mayor porque se requiere de personal técnico y equipo especial para su ejecución.</li> <li>▪ Dependiendo de material, los cordones de soldadura son más propensos a corrosión a falta de protección.</li> <li>▪ Las sujeciones con soldadura son irreversibles, por lo que un mínimo error implica pérdidas económicas y de materia prima.</li> </ul>

En base a las ventajas mostradas en la tabla anterior, se opta por utilizar cordones de soldadura para las sujeciones de los elementos estructurales, ya que se requiere que la estructura de soporte no pierda su rigidez por las vibraciones que las bombas puedan ocasionar conforme se realicen diversos ensayos, además de que este método de sujeción es el que se utiliza cotidianamente para el montaje de estructuras y elementos con perfiles cuadrados.

Para determinar las características de los cordones de la estructura, se deberá analizar el elemento que se encuentra bajo condiciones críticas, que en este caso es el elemento JM de la figura 3.44, tal y como se muestra en la sección 3.3.2.

Las características del perfil estructural se describen en la tabla 3.32:

Tabla 3.32: Geometría del tubo metálico de chapa 16

Propiedades geométricas del perfil cuadrado chapa 16		
A	30 mm	
e	1.5 mm	
Área	1.65 cm <sup>2</sup>	

Del libro “Manual del Soldador” de Oygasa se obtiene la tabla 3.33, que indica el diámetro del electrodo recomendado para diversos espesores del metal a soldar (OXGASA, 2014) .

Tabla 3.33 Recomendaciones de electrodo

Fuente: "Manual del soldador". Oxgasa.

Posición Plana Espesor del Metal	Medida del Electrodo	Amperaje Aproximado
Calibre 18	3/32"	50 - 80
Calibre 16	3/32"	
Calibre 14	1/8"	90 - 135
Calibre 12	1/8"	
Calibre 10	5/32" ó 1/8"	120 - 175
3/16"	5/32" ó 1/8"	
1/4"	3/16" ó 5/32"	140 - 200
5/16"	3/16" ó 5/32"	200 - 275
3/8"	1/4" ó 3/16"	
1/2"	1/4" ó 3/16"	250 - 350
3/4"	1/4"	
1"	1/4"	325 - 400

En primera instancia se preseleccionará tubo estructural de calibre 16, en caso de no cumplir con los requerimientos del diseño se iterará con calibres superiores, por lo que en un principio la medida del electrodo a utilizar para el análisis será de  $3/32$  pulg.

Entonces para el diseño de la soldadura se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El cordón de soldadura rodeará el contorno del perfil estructural cuadrado.
- Se utilizará una soldadura de filete.
- Para el análisis de soldadura, se tomará una altura de garganta de cordón  $h = \frac{3}{32}$  pulg.
- El elemento estructural crítico es el elemento JM, que se encuentra bajo carga de flexión.
- Los cordones de toda la estructura se realizarán con las mismas características de los cordones del elemento JM.

De la tabla 9-1 de “Diseño de Elementos de Máquinas” del autor Shigley (Tabla AIII.9, Anexo III), se obtienen las propiedades flectoras para el tipo de soldadura a analizar:

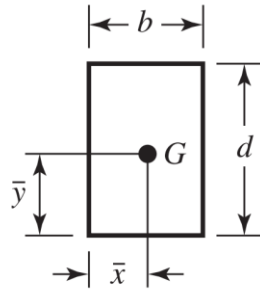


Figura 3.47: Geometría de soldadura

Fuente: Diseño de Elementos de Máquinas, Shigley

$$A = 1.14h(b + d) \quad (3.30)$$

$$I_u = \frac{d^2}{6} (3b + d) \quad (3.31)$$

Donde:

- $A$ : Área de la garganta
- $I_u$ : Segundo momento unitario del área

Ya que  $d = b$ , se obtiene:

$$A = 2.28hb \quad (3.32)$$

$$I_u = \frac{4b^3}{6} \quad (3.33)$$

Procederemos con el cálculo del área de la garganta  $A$ ; sabiendo que

$$h = \frac{3}{32} \text{ pulg} = 2.38 \text{ mm} \text{ y que } b = 25 \text{ mm, entonces:}$$

$$A = 2.28(2.38\text{mm})(30\text{mm}) = 162.79 \text{ mm}^2$$

Teniendo A podemos calcular el esfuerzo cortante primario, con la ecuación 2.24 y  $R_L = 1204.57 \text{ N}$  (calculado con la ecuación 3.28 en la sección anterior):

$$\tau' = \frac{V}{A} = \frac{R_L}{A} = \frac{1204.57 \text{ N}}{162.79 \text{ mm}^2} = \frac{1204.57 \text{ N/m}}{1.62(10)^{-4} \text{ m}^2} = 7.40 \text{ MPa}$$

A continuación, se debe de calcular el esfuerzo cortante secundario, este se debe a el momento de flexión, que de igual manera fue calculado en la sección anterior. El esfuerzo secundario se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau'' = \frac{Mc}{I} \quad (3.34)$$

Donde

- $c$ : Centroide
- $I$ : Momento de inercia

Dada la geometría de la soldadura mostrada en la figura 3.47, el centroide se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \bar{y} = c = \frac{b}{2} \quad (3.35)$$

$$c = \frac{30 \text{ mm}}{2} = 15 \text{ mm}$$

El momento de inercia está dado por la siguiente expresión:

$$I = \text{sen}45(h)(I_u) \quad (3.36)$$

Calculando  $I_u$  con la ecuación 3.33:

$$I_u = \frac{4b^3}{6}$$

$$I_u = \frac{4(30 \text{ mm})^3}{6} = 18000 \text{ mm}^3$$

Entonces, sustituyendo  $I_u$  en la ecuación 3.36:

$$I = \text{sen}45(2.38)(18000) = 30292.45 \text{ mm}^4$$

Y considerando que  $M = 80.30 \text{ Nm}$ , según el resultado de la ecuación 3.18:

$$\tau'' = \frac{Mc}{I} = \frac{(160600 \text{ N mm})(15 \text{ mm})}{30292.45 \text{ mm}^4}$$

$$\tau'' = 79.52 \text{ MPa}$$

Como siguiente punto, teniendo tanto el esfuerzo cortante primario y secundario, se procede a calcular el esfuerzo cortante:

$$\tau = \sqrt{(\tau')^2 + (\tau'')^2} \quad (3.37)$$

$$\tau = \sqrt{(7.40 \text{ MPa})^2 + (79.52)^2} = 79.86 \text{ MPa}$$

Aplicando la teoría de falla de Energía de Distorsión Máxima para Materiales Dúctiles (ecuación 3.26) determinaremos el esfuerzo máximo para que cumpla con el factor de seguridad previsto de 2, luego con el esfuerzo calculado nos iremos a las tablas de distintos electrodos para seleccionar el que se ajusta al cálculo.

$$n = \frac{0.6(S_{m\acute{a}x})}{\tau}$$

$$S_{max} = \frac{n\sigma}{0.6} = \frac{2(79.86 \text{ MPa})}{0.6} = 266.2 \text{ MPa}$$

De la tabla 9-3 del libro “Diseño de Elementos de Máquinas” del autor Shigley determinamos que el electrodo número E60xx cumple con el esfuerzo requerido (427 MPa) (Tabla AIII.10, Anexo III). Del análisis se determinó que para todas las sujeciones entre elementos se utilizará soldadura con electrodo de uso convencional AWS-E6013.

### 3.3.5 Selección de rodos

Para la selección de los rodos que proporcionarán movilidad y soportarán al banco de ensayos se tomarán las siguientes consideraciones:

- Se seleccionarán a partir del área crítica IJKLMN que está sujeta a la carga del tanque.
- Dicha área crítica esta soportada principalmente por 4 rodos, por lo que se considerará que la carga del tanque se distribuye en cada uno de ellos de manera uniforme, en la sección 3.3.1 se determinó la masa del tanque, dando un total de 245.58 kg, por lo que cada rodo tendrá que soportar 61.40 kg.

Tomando en cuenta los puntos anteriores, se seleccionarán rodos giratorios con capacidad de 100kg.

Tabla 3.34: Especificaciones técnicas de los rodos seleccionados

Especificaciones técnicas de los rodos seleccionados		
Marca	DYNE	
Modelo	030CI077PF	
Diámetro de rueda	75 mm	
Capacidad	100 kg	

### 3.3.6 Geometría definitiva de la estructura de soporte

En las secciones anteriores se verificó que la estructura cumpliera con las condiciones de cargas críticas con un solo soporte para cada tubería respectivamente; sin embargo, para añadir mayor estabilidad a las tuberías se agregará un soporte extra a cada una de ellas, considerando que éstos no interrumpan con la ubicación de los demás componentes. Por lo tanto, la

estructura pasaría a tomar la geometría que se muestra el esquema de la figura 3.48:

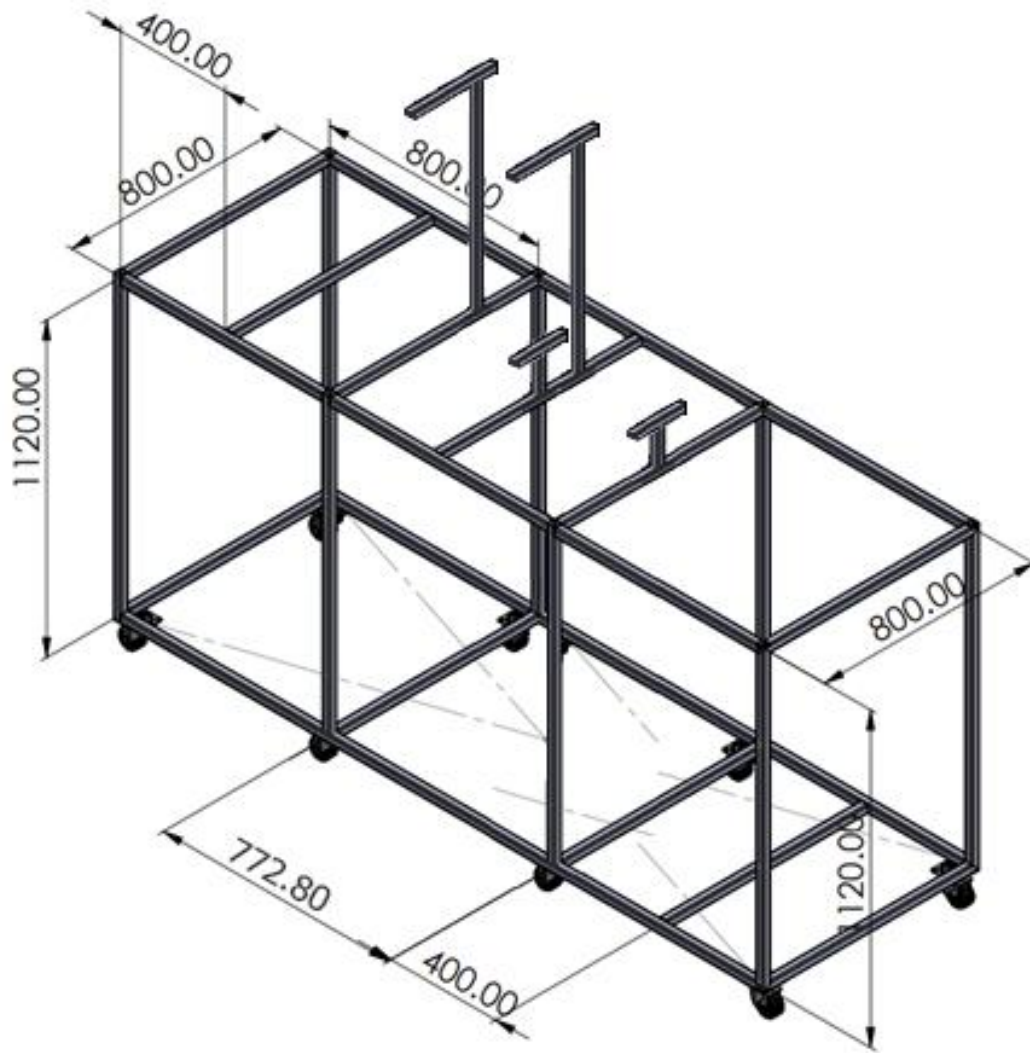


Figura 3.48: Estructura de soporte del banco de cavitación.

Fuente propia

### **3.4 Diseño de sistema eléctrico**

En el diseño de un sistema eléctrico, es muy importante tener en cuenta los dispositivos electrónicos involucrados en la aplicación a diseñar y la función que llegarán a realizar, para poder plantear un problema con todas las limitantes posibles para simplificar una solución.





En este caso el problema consiste en diseñar el sistema eléctrico del banco de pruebas considerando que el intervalo de potencias nominales permisibles va desde 0.5 hp hasta 7.5 hp. Asimismo, conociendo que las bombas trabajarán con velocidades de giro constantes y que el prototipo estaría instalado en la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, para dar inicio al diseño se tomarán en cuenta los siguientes lineamientos:

- La potencia máxima demandada por la familia de bombas es de 7.5 hp
- Debido a que el banco de pruebas podrá desplazarse en conjunto, el tablero eléctrico con todos sus componentes tendrá que ser alimentado por un tomacorriente y estar anclado a la estructura de soporte del banco de pruebas.
- La instalación eléctrica de la escuela de ingeniería cuenta con un voltaje de 220 v trifásico, entonces será el voltaje que se utilizará para dimensionar el circuito eléctrico. Por lo cual, las bombas ensayadas deberán ser accionadas por motores trifásicos.
- Al trabajar con velocidades de giro constantes no será necesario implementar sistema de control que incluya un variador de frecuencia, puesto que se pretende caracterizar la bomba para su velocidad nominal de operación.

### 3.4.1 Diseño de circuito de fuerza y control.

Una buena parte de los circuitos utilizados en las instalaciones de motores eléctricos están compuestos por una parte de fuerza y por otra de control; cada una con una función en específico, ya que el circuito de fuerza es el encargado de energizar todo componente eléctrico o electrónico involucrado en el circuito, mientras que el circuito de control está relacionado a todos los parámetros involucrados en el sistema. En nuestro caso en específico las acciones que involucran control son únicamente el encendido y apagado, utilizando los siguientes componentes:

Tabla 3.35: Componentes del Sistema de Control Eléctrico.

Cuadro descriptivo de componentes eléctricos involucrados		
Nombre	Función	Imagen
Interruptor termomagnético	Su función es interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando detecta valores mayores a ciertos límites. Existen trifásicos y monofásicos.	
Contactador	Sirve para conectar y desconectar todas las líneas de energía que corren hacia una carga o para encender y apagar un circuito eléctrico de forma repetida.	
Botonera	Este dispositivo va orientado al operador final, permitiendo el paso de corriente al motor y cortarlo de una forma más fácil y sencilla.	
Repartidor eléctrico de distribución	Es un dispositivo que permite la repartición de las distintas líneas eléctricas de un cuadro de forma segura, utilizando para ello el mínimo espacio posible.	

En las siguientes figuras se muestra un esquema general de los circuitos involucrados en el sistema de control eléctrico que se utilizará en el banco (figuras 3.49 y 3.50):

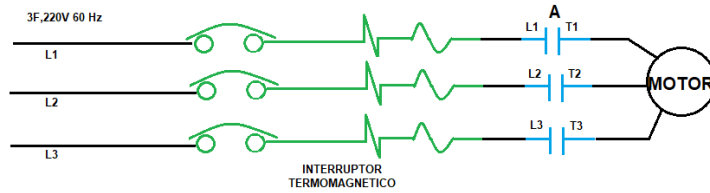


Figura 3.49: Diagrama de fuerza a utilizar.

Fuente propia

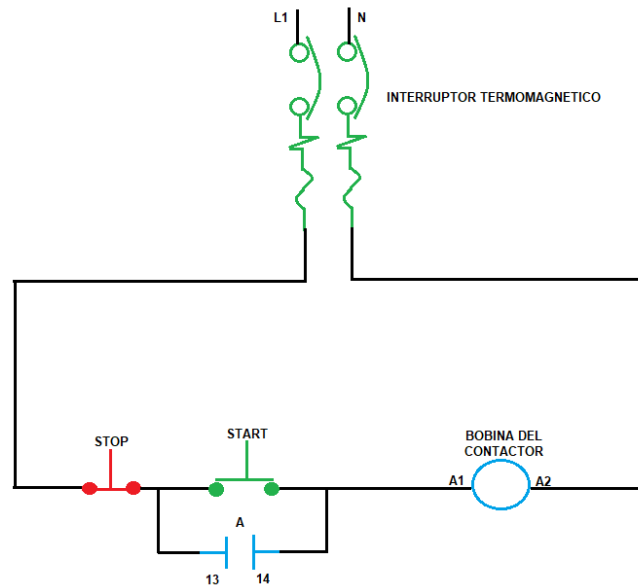


Figura 3.50: Diagrama de control a utilizar.

Fuente propia

La lógica del sistema de control es la siguiente:

- Al accionar el interruptor termomagnético la corriente energiza el circuito eléctrico, pasando por el contacto cerrado de stop y deteniendo su recorrido en el contacto normalmente abierto de start. Podemos ver cómo sin ningún estímulo externo la bobina del contactor no energiza.

- Al presionar el botón start, el contacto se cierra y al estar conectado en paralelo con los contactos de la bobina del contactor, realiza un enclavamiento que energiza la bobina del contactor; de manera que se habilita el paso de corriente al motor, sin la necesidad de un estímulo externo posterior.
- Una vez se presenta la condición anterior, si presionamos el botón stop, su contacto se abre, cortando todo paso de corriente hacia el contactor; al no recibir corriente los contactos de la bobina se desenergizan desactivando la bobina del contactor, al quitar el dedo del botón stop regresamos a las mismas condiciones iniciales.

En la siguiente imagen se muestra un esquema del cableado del sistema de control donde se incluyen los circuitos de fuerza y control:

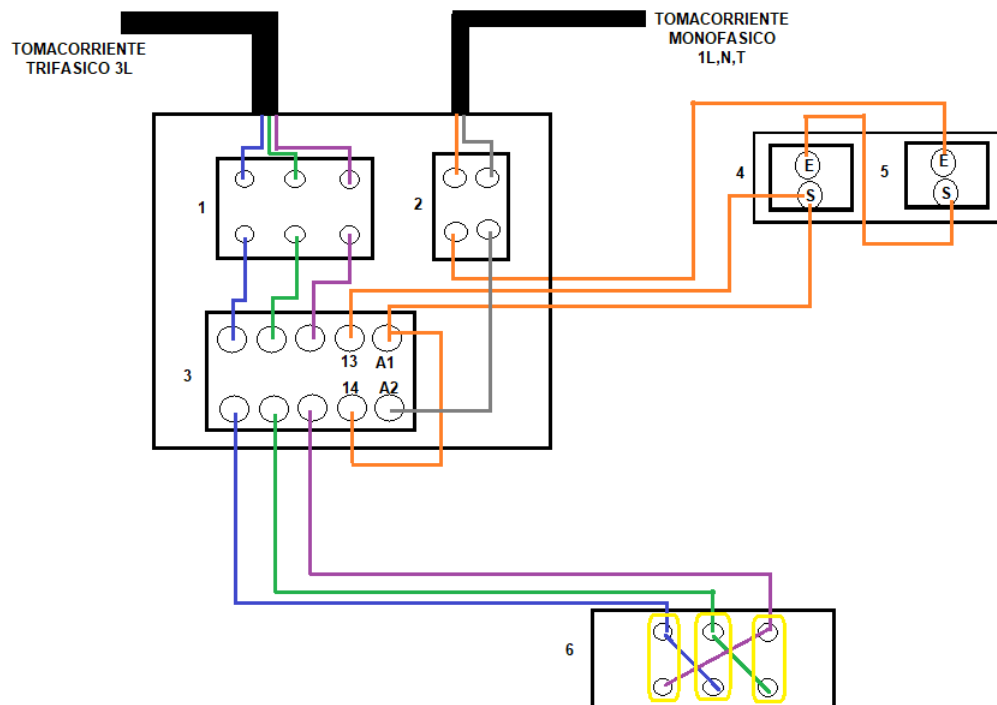


Figura 3.51: Diagrama de cableado control y potencia.

Fuente propia

Podemos apreciar como ambos circuitos están coexistiendo en un mismo arreglo; el circuito de control es alimentado por un tomacorriente monofásico de 120 v a 60hz, mientras que el de fuerza es alimentado por un tomacorriente trifásico a 220 v a 60 Hz. Por otra parte, la conexión utilizada en el motor es una conexión delta, ya que se presentarán intervalos bajos de tensión.

A continuación, se detalla la enumeración del diagrama de la figura 3.51:

1. Interruptor termomagnético trifásico
2. Interruptor termomagnético monofásico
3. Contactor
4. Botón pulsador normalmente abierto
5. Botón pulsador normalmente cerrado
6. Bornera de motor.

En el diagrama de la figura 3.51 está reflejado el funcionamiento del banco de manera aislada para una sola protección; sin embargo, en este caso se trabajará con diferentes potencias, ya que se pretende habilitar el banco para ensayar distintas potencias nominales que se encuentren dentro del rango permisible. Por lo tanto, se deberá utilizar diferentes protecciones que tendrán que estar conectadas en paralelo y se tendrá que ir activando la protección a utilizar, al mismo tiempo que se desactivan las protecciones que no se utilizarán.

En la figura 3.52 se muestra un esquema general con el cableado que se utilizará en el circuito de fuerza, estando resaltado las posiciones de los distribuidores en un cuadro de color rojo:

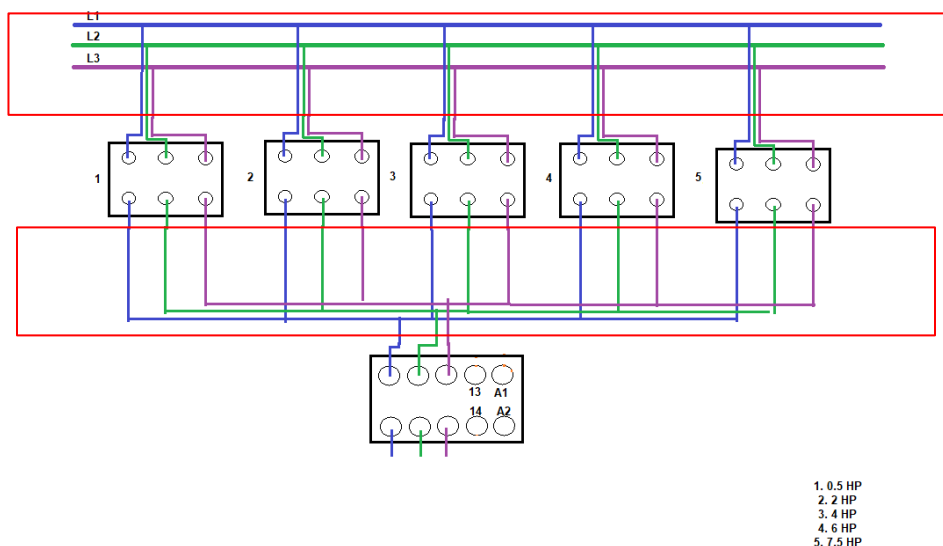


Figura 3.52: Arreglo de protecciones en paralelo.

Fuente propia

Una vez modificado el arreglo de fuerza para proteger el motor a utilizar en las diferentes etapas de potencia, se debe conectar con el circuito de control. Para tal efecto, se opta por utilizar repartidores eléctricos de distribución, ya que los empalmes representarían un problema de desorden y posibilidad de cortocircuito.

Para esta ocasión se utilizarán dos repartidores: uno al inicio y otro antes del contactor. En cuanto al primero, su función consiste dirigir equitativamente la energía eléctrica proveniente de las tres fases a las protecciones de manera ordenada; mientras que en el segundo repartidor recibir la energía proveniente de las protecciones y transportarla al contactor.

El funcionamiento del circuito implicaría deshabilitar manualmente las protecciones que no se estén utilizando durante los ensayos. En la figura 3.53 se señala con marcos rojos la parte del circuito que estaría siendo cumplida por los repartidores:

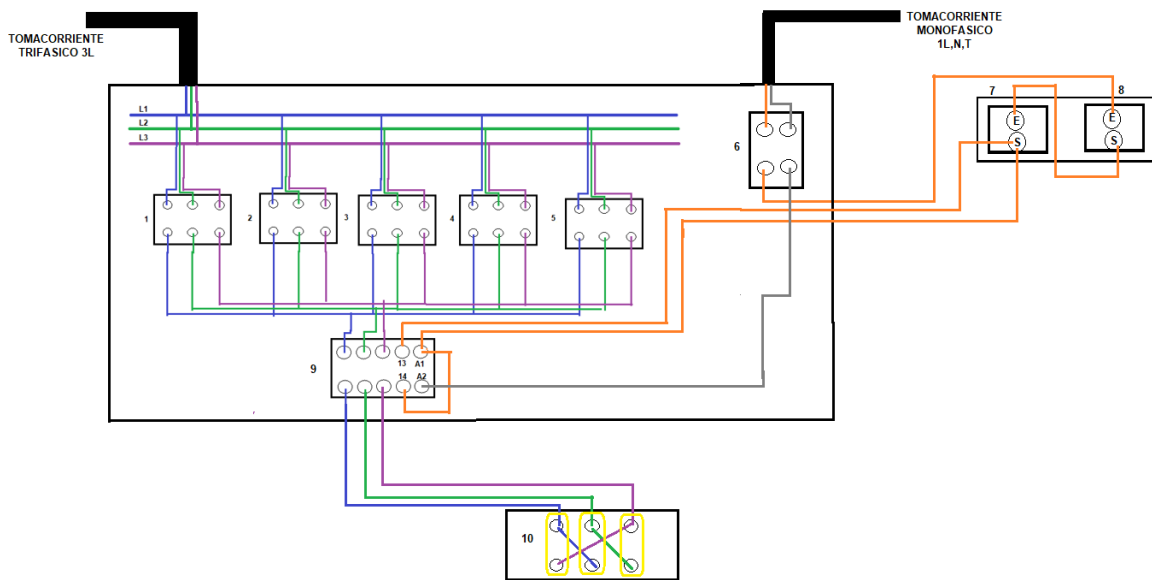


Figura 3.53: Circuito integrado de fuerza y control

Fuente propia

En la tabla 3.36 se muestran enumerados los componentes señalados en el sistema de la figura anterior:

Tabla 3.36: Componentes del sistema eléctrico

Componentes del Sistema eléctrico	
Nº	Componente
1	Protección termomagnética trifásica 0.5 Hp
2	Protección termomagnética trifásica 2 Hp
3	Protección termomagnética trifásica 4 Hp
4	Protección termomagnética trifásica 6 Hp
5	Protección termomagnética trifásica 7.5 Hp
6	Protección Monofásica 3A
7	Contacto normalmente Abierto (stop)
8	Contacto normalmente cerrado (start)
9	Contactador
10	Bornera

### 3.4.2 Selección de componentes del sistema eléctrico

#### 3.4.2.1 Selección de interruptores termomagnético trifásicos.

Para calcular las protecciones termomagnéticas que se utilizarán se debe considerar las distintas corrientes nominales que correspondan a los distintos motores de las bombas que se desean ensayar. Por consiguiente, la formula a utilizar será la siguiente.

$$P = \sqrt{3} * I * V * Fp \quad (3.38)$$

El factor de potencia es la relación entre la potencia de trabajo y la potencia aparente, esta mide la eficacia con la que se utiliza la energía eléctrica. Para esta aplicación no hay un factor de potencia definido, ya que no se sabe a exactitud las características del motor a utilizar. Por lo tanto, se utilizará un factor de potencia de 0.80.

$$7.5 \text{ hp} * \frac{745.7 \text{ W}}{1 \text{ hp}} = \sqrt{3} * I * 220 * 0.80$$

$$I = \frac{5592.75}{\sqrt{3} * 220 * 0.80}$$

$$I = 18.35 \text{ A}$$

Los motores pueden trabajar por encima de su corriente nominal sin sufrir algún desperfecto mecánico, así que se suele multiplicar por un factor de 1.25 para seleccionar la corriente de la protección a utilizar.

$$I = 18.35 * 1.25$$

$$I = 22.93 \text{ A}$$

Se realizo el mismo proceso para todas las potencias evaluadas y el resultado fue el siguiente:

Tabla 3.37: Selección de protección de sistema eléctrico.

Fuente: Schneider Electric. Catálogo de productos. (2024)

Selección de protecciones del sistema eléctrico		
Potencia	Corriente	Protección
0.5 Hp	1.22 A	Guardamotor Termomagnético TeSys GV2 AC-3 1.0-1.6A 100kA 3P3D GV2ME06
2 Hp	4.90 A	Guardamotor Termomagnético TeSys GV2 AC-3 4-6.3A 100kA 3P3D GV2ME10
4 Hp	9.78 A	Guardamotor Termomagnético TeSys GV2 AC-3 6-10A 100kA 3P3D GV2ME14
6 Hp	14.68 A	Guardamotor Termomagnético TeSys GV2 AC-3 13-18A 100kA 3P3D GV2ME20
7.5 Hp	22.93 A	Guardamotor Termomagnético TeSys GV2 AC-3 17-23A 100kA 3P3D GV2ME21

### 3.4.2.2 Selección de contactor trifásico


Para seleccionar el contactor trifásico a utilizar se debe tomar en cuenta dos factores:

- Potencia nominal máxima del motor que se pueda ensayar.
- El arreglo de voltaje que este posee además el voltaje de control con el que se controlará la bobina del contactor.

Para nuestro caso en específico esos datos son los siguientes: Potencia de motor 7.5 Hp a 220v trifásico (mayor corriente a circular por el contactor), con un voltaje de control de 110 v. En base a los datos anteriores se selecciona el contactor de código LC1D25F7 Ya que según su ficha técnica cumple con el requisito. LC1D25F7.

Tabla 3.38: Ejemplo grafico de contactor a utilizar LC1D25F7

Fuente: Schneider Electric. Catálogo de productos. (2024)


Selección de contactor		
Marca	SCHNEIDER	
Modelo	LC1D25F7	
Tensión de circuito de control	110 AC / 60 HZ	
Potencia del motor en HP	7.5	
Tensión del motor	240 V / 60 Hz / 3 fases	

### 3.4.2.3 Selección de interruptor termomagnético monofásico

En este caso, al ser un circuito puramente de control, no es necesario hacer un estudio de análisis de potencia ya que la corriente no sobrepasa los 3 A. Así que colocaremos un interruptor termomagnético para proteger las líneas de control y no sobrecalentar los cables. Se utilizará uno de 2 A. Modelo iC60N

Tabla 3.39: Ejemplo grafico de interruptor termomagnético monofásico.

Fuente: Schneider Electric. Catálogo de productos. (2024)

SELECCIÓN DE INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO MONOFÁSICO		
Marca	SCHNEIDER	
Modelo	IC60N	
Tensión de circuito de control	110 AC / 60 HZ	
Corriente	2 A	

Los botones no tienen mayor criterio de selección, debido a que son únicamente contactos normalmente abiertos o cerrados.

### 3.4.2.4 Selección del tablero y el calibre de los cables de los circuitos de potencia y control.

En ambos casos se utilizarán cables THHN; para la selección del calibre de cables se debe evaluar la corriente de ambos circuitos, ambos circuitos tienen sus interruptores independientes y están diseñados para soportar una corriente específica, así que los cables tienen que soportar esta corriente y un poco más por cualquier futura instalación. Se realizó la selección de cables según la normativa técnica de conexiones y reconexiones eléctricas en redes de distribución de baja y media tensión, publicada en el sitio oficial de la superintendencia de electricidad y telecomunicaciones SIGET (Anexo III, Tabla AIII.12)

Tabla 3.40: Cables a utilizar en la instalación eléctrica.

Tipo de circuito	Calibre cable THHN
Potencia	12
Control	14

Asimismo, el tablero a utilizar posee las siguientes características:

Tabla 3.41 Dimensionamiento de tablero

Fuente: ARGOS (Schneider Electric, 2024). Catálogo de productos. (2024)

CARACTERÍSTICAS DEL TABLERO	
Marca	ARGOS
Alto	600 mm
Ancho	400 mm
Largo	250 mm
Placa de conexión	Riel DIN
Protección	IP-66



En la figura 3.53 se muestra un esquema con los componentes seleccionados, donde el cuadro negro que encierra los interruptores termomagnéticos y el contactor se encuentra dentro del tablero ARGOS.

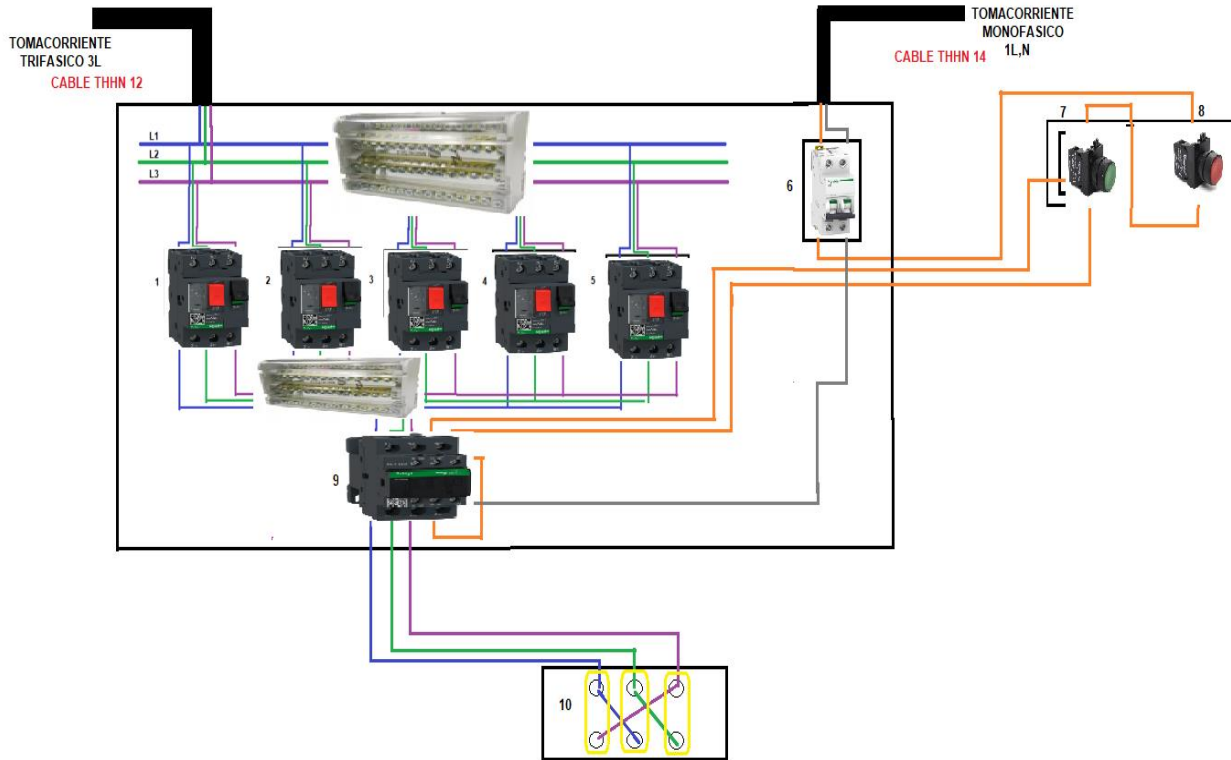


Figura 3.53: Esquema general del sistema eléctrico.

Fuente propia

### 3.5 Detalles de instalación.

En la sección 3.2.2.5 se presenta un esquema de la red de tuberías de banco de pruebas; al respecto de éste cabe destacar que las medidas que se presentan solamente se limitan a una aproximación de la geometría de la red de tuberías, debido a que no se consideró con detalle la geometría de los accesorios que se utilizarán en la instalación de los diversos componentes del banco.

En consecuencia, algunas de las cotas han sido levemente alteradas al modelar el ensamble de las instalaciones que componen dicha red, considerando

la geometría de los accesorios involucrados. Asimismo, las dimensiones de la estructura de soporte mostrada en la sección 3.3.6 también han variado por el cambio en las medidas de la red de tuberías, además de los componentes que se le han adicionado para poder realizar el acople de la red de tuberías; sin embargo, se considera que los cambios no han sido tan drásticos como para afectar los resultados de los cálculos de diseño y esto se comprobará en secciones posteriores.

Por lo tanto, a lo largo de esta sección se describen los cambios geométricos en las instalaciones de la red de tuberías que se consideren significativos, también como se detallarán los diversos accesorios que se han agregado, entre los cuales cabe destacar el sistema de drenaje del tanque de reserva. Por otra parte, también se detallan los cambios geométricos y la adición de componentes a la estructura que se han realizado para la instalación adecuada de la red de tuberías; luego la sección continúa con la presentación de un diagrama unifilar del sistema eléctrico del banco, además de los detalles de su instalación en el modelo del banco; posteriormente, la sección finaliza con el presupuesto general de la fabricación y el mantenimiento del banco. Cabe destacar que las imágenes utilizadas en esta sección se han extraído de los planos de diseño presentados en el Anexo V, donde se incluyen los resultados de todas las modificaciones y que se encuentran detalladas en el plano 1/29, el cual contiene el ensamble general del prototipo del banco de pruebas.

Por otra parte, es importante mencionar que en el Anexo I se presenta el desarrollo del Ensayo NPSH3, para el cual se ha encaminado el diseño del banco; en este apartado se mencionan con detalle toda la instrumentación a utilizar y los distintos procesos de laboratorio que se deben ejecutar para obtener la curva NPSH3 vs Q de la bomba ensayada. Asimismo, en el Anexo II se presenta el plan de mantenimiento que garantizará la disponibilidad del banco;

éste se ha desarrollado bajo la metodología del análisis de modos y efectos de fallas, la cual es aplicada en planes de mantenimiento preventivo.

### **3.5.1 Detalles en el modelado de la red de tuberías**

En los planos del Anexo V se presentan los detalles de las instalaciones de los componentes de la red de tuberías; cabe destacar que el plano 2/29 presenta un esquema de la red de tuberías donde los accesorios se han representado con simbologías normadas por los siguientes documentos:

- Manual de albañilería, de la organización italiana ASPeM (Asociación Solidaridad Países Emergentes) (Mariani, 2008)
- Norma I.S.010, implementada y establecida en Perú (MVCS, 2015).
- En cuanto a la red de tuberías, existen dos puntos principales que requieren descripción:
  - Las modificaciones en las dimensiones de las instalaciones de los distintos componentes de la red de tuberías.
  - La instalación de sistema de drenaje del tanque de reserva del banco.

En las siguientes secciones se detallarán los aspectos mencionados anteriormente

#### **3.5.1.1 Modificaciones en las instalaciones de la red de tuberías.**

Al respecto de las discrepancias entre las dimensiones geométricas de la red de tuberías mostrada en la figura 3.34 y el modelo de diseño del plano 5/29 del Anexo V, éstas se deben principalmente a los acoples entre los accesorios involucrados en las instalaciones de los diversos componentes de dicha red; por

lo cual, entre las instalaciones cuyas dimensiones se han visto alteradas significativamente se encuentran las siguientes:

- Instalación de la válvula de pie: De manera similar a las válvulas reguladoras, la longitud de la instalación de la válvula de pie aumentó en un total de 3.3 cm por los acoples entre el adaptador macho y el reductor de sección, tal y como se muestra en la figura 3.54 comparativa entre el esquema preliminar (figura 3.13) y el modelo de diseño de la red de tuberías (Plano 11/29, Anexo V):

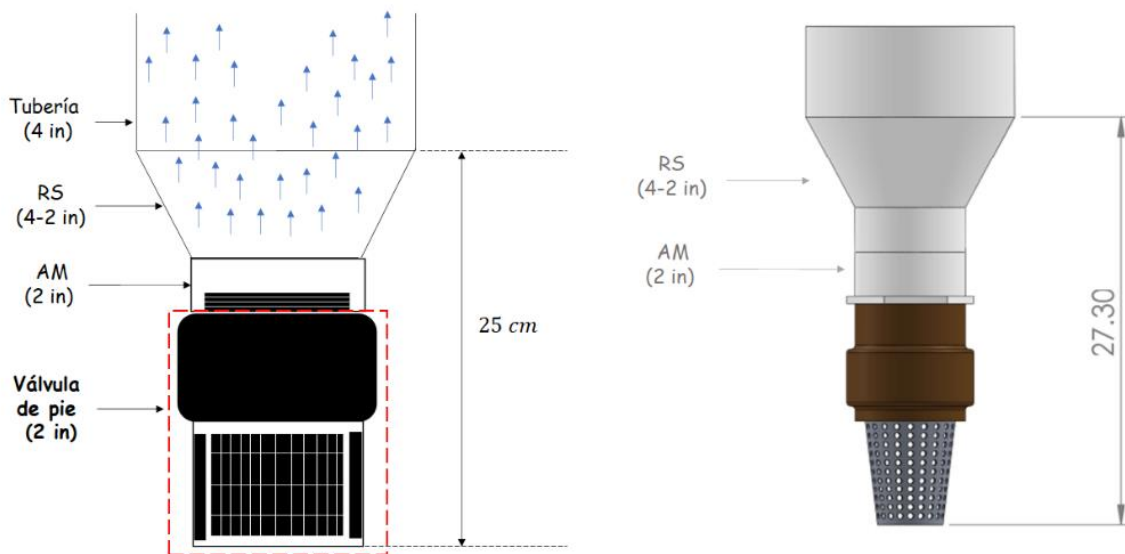


Figura 3.54: Variación en las dimensiones en la instalación de las válvulas reguladoras

Fuente propia

- Instalación de las válvulas reguladoras: Al considerar el aumento en las dimensiones por los acoples entre los reductores de sección y los adaptadores macho, la longitud total de dicha instalación varía en un total de 13.33 cm, tal y como se muestra en la figura 3.55, donde se compara el esquema preliminar (figura 3.12) y modelo de diseño de la red de tuberías (Plano 13/29, Anexo V):

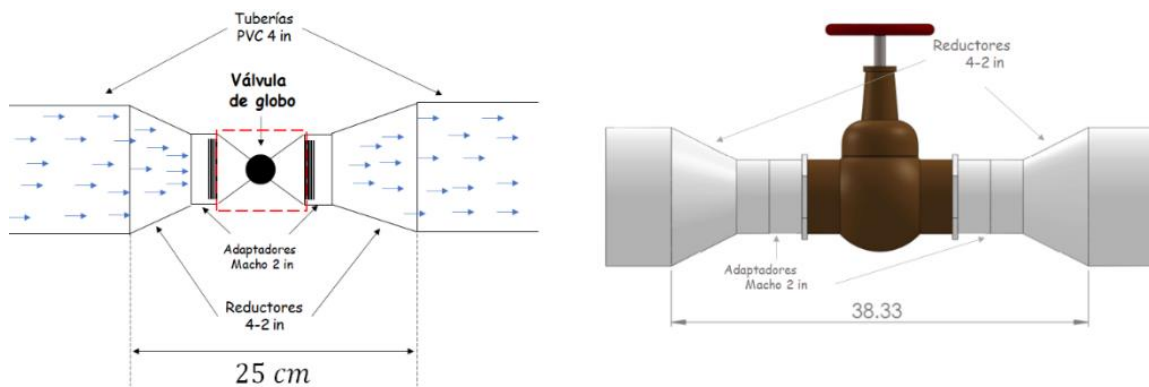


Figura 3.55: Variación en las dimensiones de la instalación de las válvulas reguladoras

Fuente propia

- Instalación de la red de tuberías de impulsión: En lo que respecta a la red de impulsión, se tuvieron que realizar dos cambios principalmente:
  - El aumento de las dimensiones por los acoples de la TEE utilizada en la instalación de la válvula desairadora aumentó drásticamente la altura total de la red de tuberías, por lo cual se optó por omitir la tubería de 20 cm posterior al reductor de sección de la instalación del manómetro, en la salida de la bomba; lo cual dio como resultado que el ambas instalaciones estarían conectadas directamente, así como se muestra en la figura 3.56, donde se muestra una comparación entre el esquema preliminar (figura 3.30) y el modelo definitivo (Plano 17/29, Anexo V):

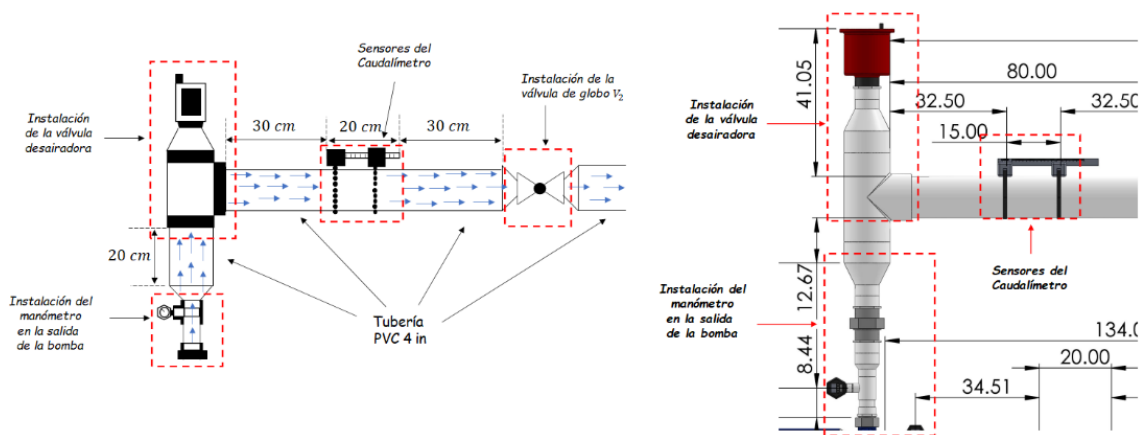


Figura 3.56: Variación en las dimensiones de la instalación red de impulsión

Fuente propia

- Asimismo, la longitud de la tubería de descarga previa al reductor de turbulencias también aumentó en un total de 13.55 cm, tal y como se muestra en la siguiente comparación (figura 3.57 / Plano 7/29, Anexo V):

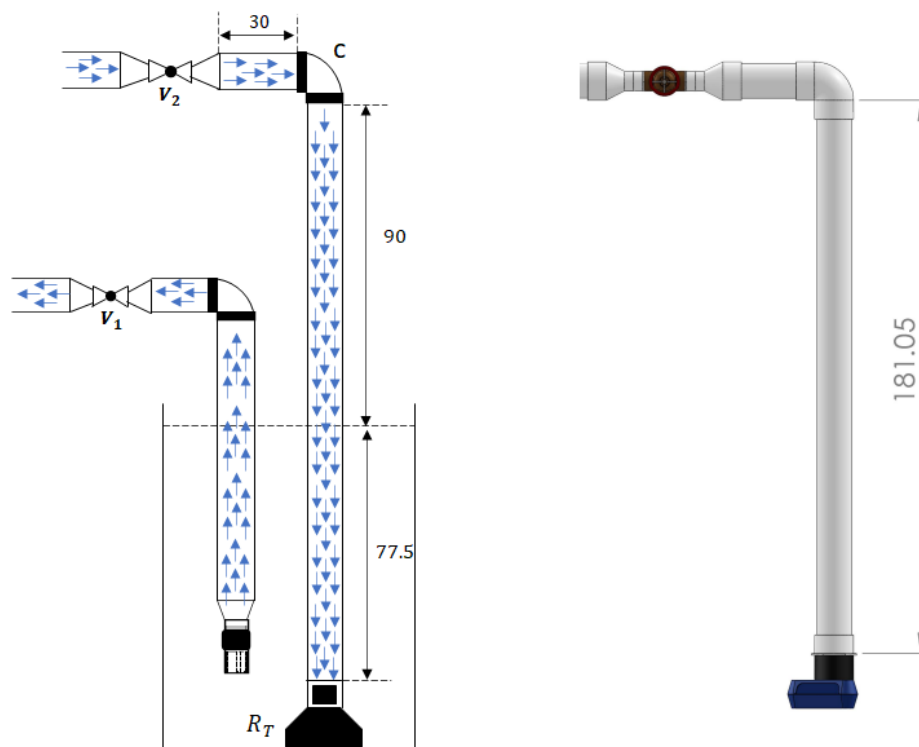


Figura 3.57: Variación en las dimensiones de la instalación de la tubería de descarga de la red de impulsión.

Fuente propia

- Instalación de la válvula de los medidores de presión: En el caso de los medidores de presión, la longitud total también se ha visto aumentada por los acoples entre los diversos accesorios que la componen. Cabe destacar que el modelo de la red de tuberías se realizó considerando que tanto la entrada como la salida de la bomba instalada tendrían un diámetro nominal de 1 ¼ in; por lo tanto, la magnitud de la distancia  $2D_{int E/S}$ , entre la entrada/salida de la bomba y el medidor de presión, tendría que ser lo más aproximado posible a los 7.36 cm, según lo indicado por la tabla 3.12. En la figura 3.58 se observa que la longitud total de la instalación aumenta en un total de 5.09 cm, al comparar el esquema preliminar (figura 3.15) y el modelo de diseño de la red de tuberías (Plano 15/29, Anexo V):

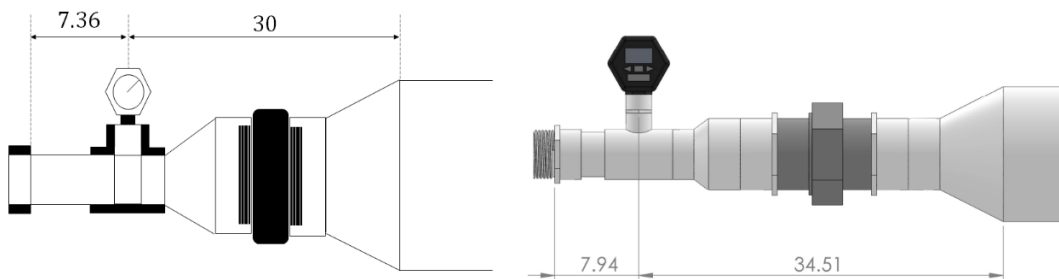


Figura 3.58: Variación en las dimensiones de la instalación de los medidores de presión

Fuente propia

- Instalación de Tanque de reserva: En lo relacionado con el tanque de reserva, se detalló la ubicación de las tuberías y los componentes que estarán sumergidas en su interior, ya que esta información no fue especificada en el esquema de la figura 3.33. Por lo tanto, en la figura 3.59 se muestra la instalación del tanque de reserva con todas las dimensiones especificadas, cabe destacar que el nivel del agua se ha detallado para los tiempos de operación (Plano 8/29):

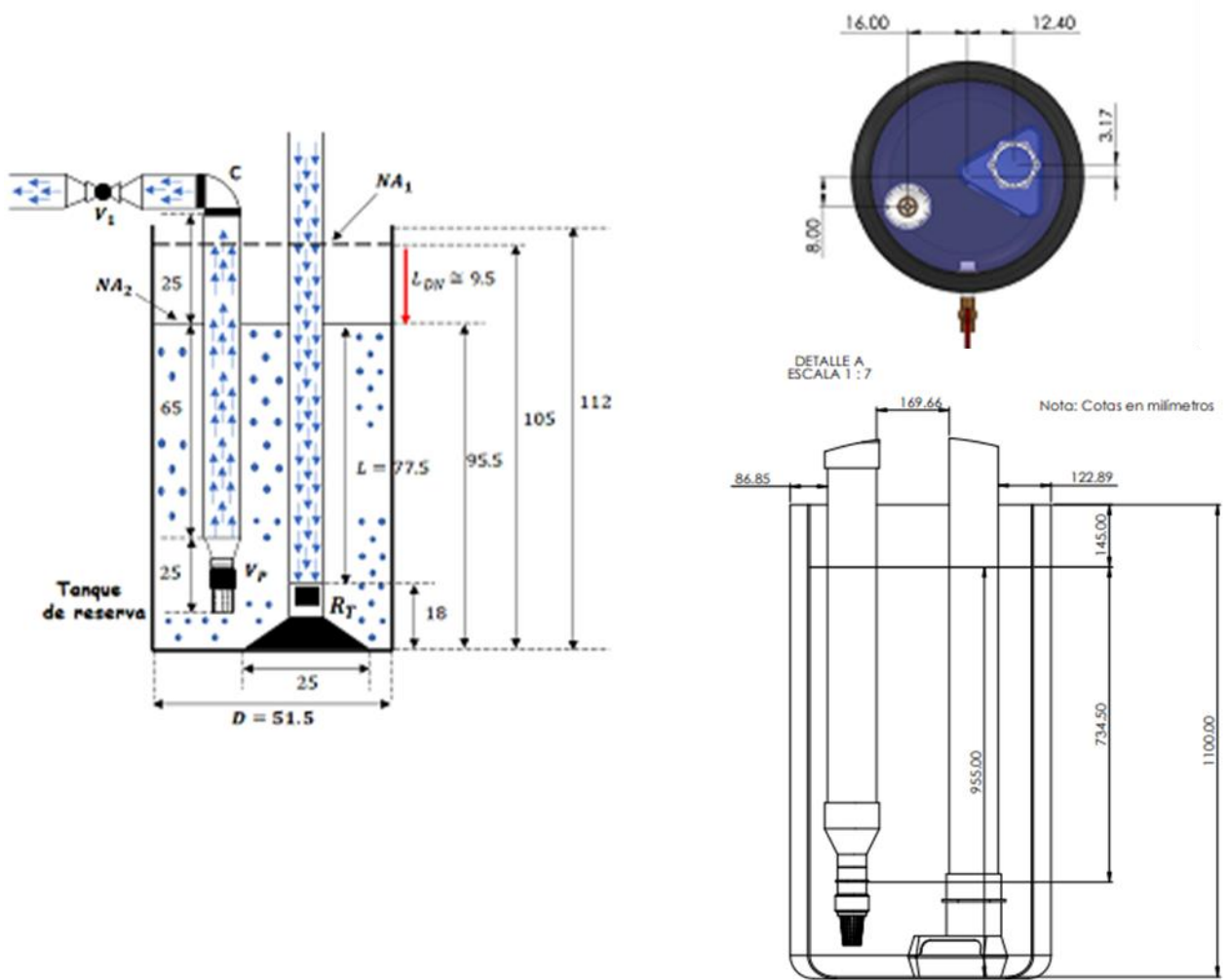


Figura 3.59: Especificación de las dimensiones de la instalación del tanque de reserva.

Fuente propia

### 3.5.1.2 Instalación del sistema de suministro del tanque de reserva

En lo que respecta al suministro del tanque de reserva, se ha contemplado utilizar agua filtrada para tal fin, puesto que el cambio del agua contenida en dicho elemento se incluye dentro de las tareas de mantenimiento y también formará parte de los ensayos de cavitación, dependiendo de su estado; esto se comenta con mayor detalle durante en la sección A1.1 del Anexo I, donde se describen los procesos de comprobación de estado del agua que se utilizará para los ensayos de cavitación.

Para tal efecto, se ha considerado utilizar un sistema de purificación de agua con ozono, ya que la estructura molecular del ozono se compone de 3 átomos de oxígeno ( $O_3$ ), a diferencia del oxígeno contenido en el aire que solo se compone de dos átomos ( $O_2$ ), por lo cual, el tercer átomo de oxígeno contenido en las moléculas del ozono ocasiona que este compuesto sea extremadamente oxidante, reactivo y efectivo en la neutralización de los contaminantes y microorganismos del agua (González, 2024).

Los sistemas de purificación de agua con ozono se conforman por dos componentes: un filtro de carbón y un generador de ozono. Por otra parte, el proceso de purificación se realiza mediante 3 etapas (González, 2024):

1. Filtrado del agua: Inicialmente el agua que será purificada atraviesa el filtro de carbón para eliminar los contaminantes no disueltos.
2. Generación de ozono: El generador de ozono procede a generar el ozono que se mezclará con el agua recién filtrada; esto se realiza mediante un proceso llamado “descarga de corona”, en donde el generador succiona aire al mismo tiempo que la somete a una corriente eléctrica de alta tensión, lo cual provoca la rotura de una

parte de los enlaces moleculares del oxígeno contenido en el aire, resultando en la formación de átomos individuales libres que se conformarán el ozono con las moléculas diatómicas restantes de oxígeno.

3. Desinfección y oxidación del agua filtrada: El generador procede a inyectar el ozono recién producido en el agua filtrada para que reaccione rápidamente con los contaminantes disueltos; de manera que al final del proceso se obtiene agua purificada y lista para el consumo humano.

Por lo tanto, se ha seleccionado el modelo de sistema de filtrado que se muestra en la tabla 3.42:

*Tabla 3.42: Selección del sistema de purificación de agua con ozono*

*Fuente: <https://purimanantial.com/productos/mini-acrilico/>*

<b>Selección del sistema de purificación de agua con ozono</b>		
Marca	Manantial	
Modelo	Mini Acrílico	
Caudal de tratamiento	0.67 GPM	
Potencia de consumo	25 W	
Presión máxima de trabajo	120 PSI	

Debido a que el sistema de la tabla 3.42 se utilizará para el suministro de agua del banco, se ha considerado que estará ubicado a un costado del tanque de reserva, tal y como se muestra en la figura 3.60.

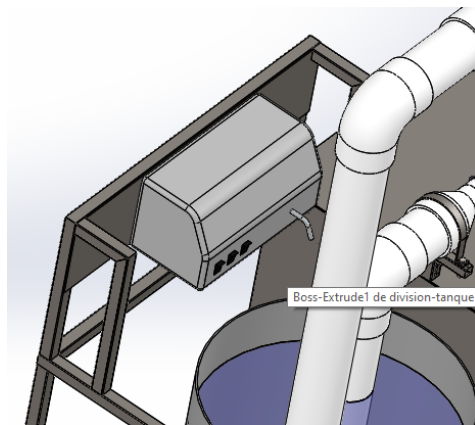


Figura 3.60: Ubicación del filtro de ozono en el banco de pruebas  
Fuente propia.

La ubicación de dicho componente se puede observar mejor en el plano 1/27, del Anexo V.

### 3.5.1.3 Instalación del sistema de drenaje del tanque de reserva.

Para facilitar las tareas de mantenimiento, se ha optado por instalar un sistema de drenaje en el tanque de reserva a una altura cercana a su fondo, ya que movilizar este componente con agua hasta el límite permitido sería demasiado dificultoso, por el peso del volumen contenido. Por lo tanto, tomando en cuenta las figuras representativas para accesorios de la tabla 3.9, la figura 3.60 muestra un esquema de los componentes del sistema de drenado:

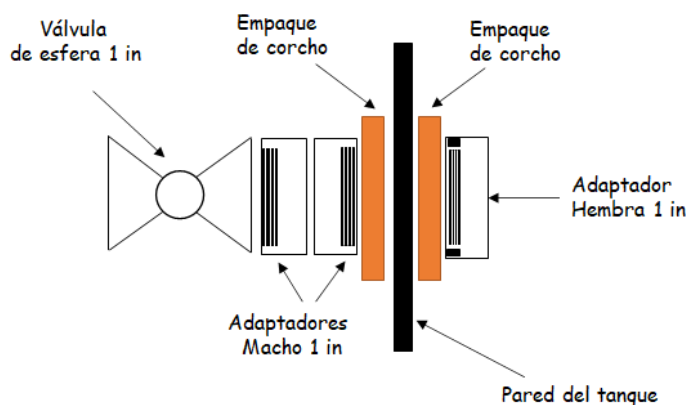


Figura 3.60: Esquema de la instalación del drenaje del tanque  
Fuente propia

Para determinar los componentes mostrados en el esquema anterior se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- El ducto que se forma por el acople de todos los accesorios tendrá un diámetro nominal de 1 pulgada para que en su interior fluya un caudal alto y que el tiempo de drenado se cumpla.
- Se utilizará una válvula de esfera para facilitar la apertura del flujo de drenado.
- Se utilizarán empaques de corcho para asegurar que no existan fugas, así como para sujetar firmemente el ensamble completo del drenaje con la pared del tanque de reserva. Estos empaques se pueden fabricar fácilmente con cola blanca para madera y láminas de corcho ofertadas en las ferreterías locales. Cabe destacar que el material de los estos componentes posee un alto nivel de impermeabilidad para cualquier fluido líquido.
- El sistema de drenado incluirá una manguera con el mismo diámetro nominal y una longitud mínima de 10 m; este componente se conectará a la salida de la válvula de esfera cuando se requiera extraer el agua en el interior del tanque.
- Se considera más apropiado realizar la instalación del drenaje en la pared del tanque porque el objetivo es disminuir la dificultad de movilizar este componente durante los trabajos de mantenimiento, por lo cual no es necesario remover completamente el agua contenida en su interior; además de que realizar la instalación el fondo implicaría una modificación extra en la estructura de soporte para poder ubicar el tanque de reserva en el banco.

Por lo tanto, observando con detalle la instalación en el modelo de la red de tuberías (Plano 18/29, Anexo V), el ensamble del sistema de drenaje posee las características que se muestran en la figura 3.61:

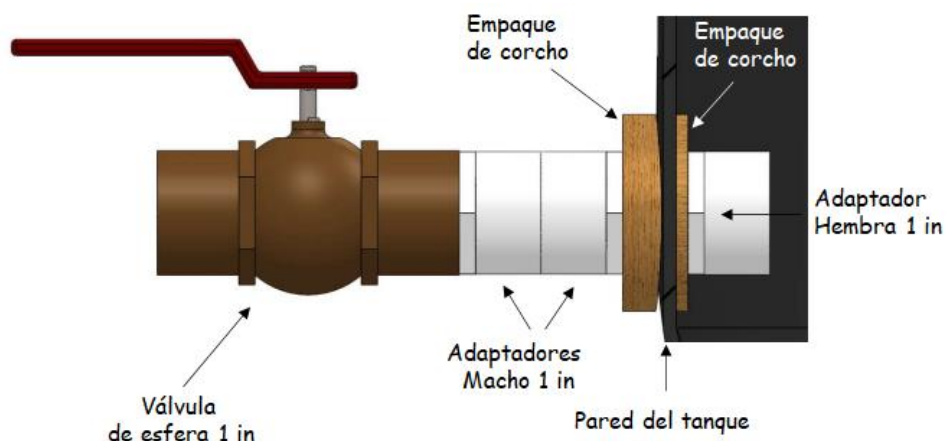


Figura 3.61: Instalación del drenaje del tanque en el modelo de la red de tuberías

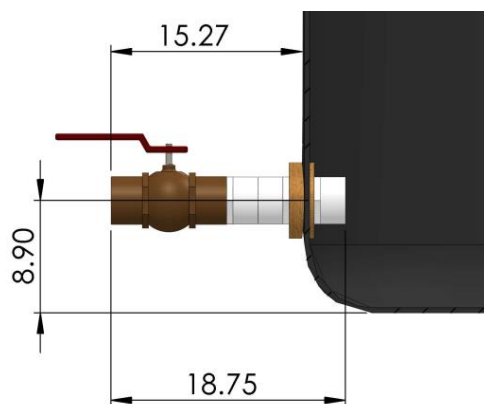
Fuente propia

En base a las consideraciones y requerimientos mencionados anteriormente, se han seleccionado los siguientes componentes, a partir del catálogo de Amanco y la oferta de ferreterías locales (figuras AIV.3 y AIV.5, Anexo IV):

Tabla 3.43: Componentes del sistema de drenaje del tanque de reserva

Componentes del sistema de drenaje del tanque de reserva				
Componente	Marca	Código	Cantidad	Especificaciones
Adaptador hembra	Amanco	SHC 40-909111	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 in</li> <li>▪ Conexión: NPT hembra</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
Adaptador macho	Amanco	SHC 40-909165	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: PVC (agua potable)</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 in</li> <li>▪ Conexión: NPT macho</li> <li>▪ Norma: ASTM D-2466</li> </ul>
Lámina de corcho	---	---	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: Corcho</li> <li>▪ Área: 60 cm x 90 cm</li> <li>▪ Espesor: 6 mm</li> </ul>
Válvula de esfera	RED WHITE	5044F	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material: Latón</li> <li>▪ Roscada NPT</li> <li>▪ Diámetro nominal: 1 in</li> </ul>

Considerando las dimensiones de los acoples de los accesorios seleccionados, el modelo del sistema de drenaje presenta las medidas especificadas en centímetros en la figura 3.62:



*Figura 3.62: Dimensiones de la instalación del drenaje del tanque de reserva*

*Fuente propia*

Tal y como se observa en la figura 3.62, la altura a la cual se deberá perforar el agujero en la pared del tanque para instalar el drenaje será de 8.9 cm aproximadamente, ya que a esta distancia es que se finaliza el borde curvilíneo que conecta a la base con la pared del tanque de reserva.

### **3.5.2 Modificaciones en la Estructura de soporte.**

Al momento de realizar el modelo del banco de pruebas, fue necesario modificar la estructura de soporte para poder montar la red de tuberías, por lo cual la naturaleza de los cambios realizados en ésta se puede clasificar de la siguiente manera:

- Cambios en las dimensiones del marco de la estructura.
- Adición de componentes para el montaje de la red de tuberías.

En las secciones 3.5.2.1 y 3.5.2.2 se describirán con mayor detalle las diversas modificaciones realizadas a la estructura de soporte.

### 3.5.2.1 Cambios en las dimensiones geométricas del marco de la estructura de soporte.

Debido a las nuevas dimensiones geométricas de la red de tuberías (Plano 5/29, Anexo V), fue necesario modificar las medidas del marco de la estructura de soporte, para garantizar que las tuberías y los componentes del sistema eléctrico se pudieran instalar correctamente. En la Figura 3.63 se muestra una comparación entre el marco de la estructura que resultó de la etapa de diseño (sección 3.3.6/figura 3.48) y el que ha resultado al final de la etapa de modelado del prototipo (Plano 23/29, Anexo V):

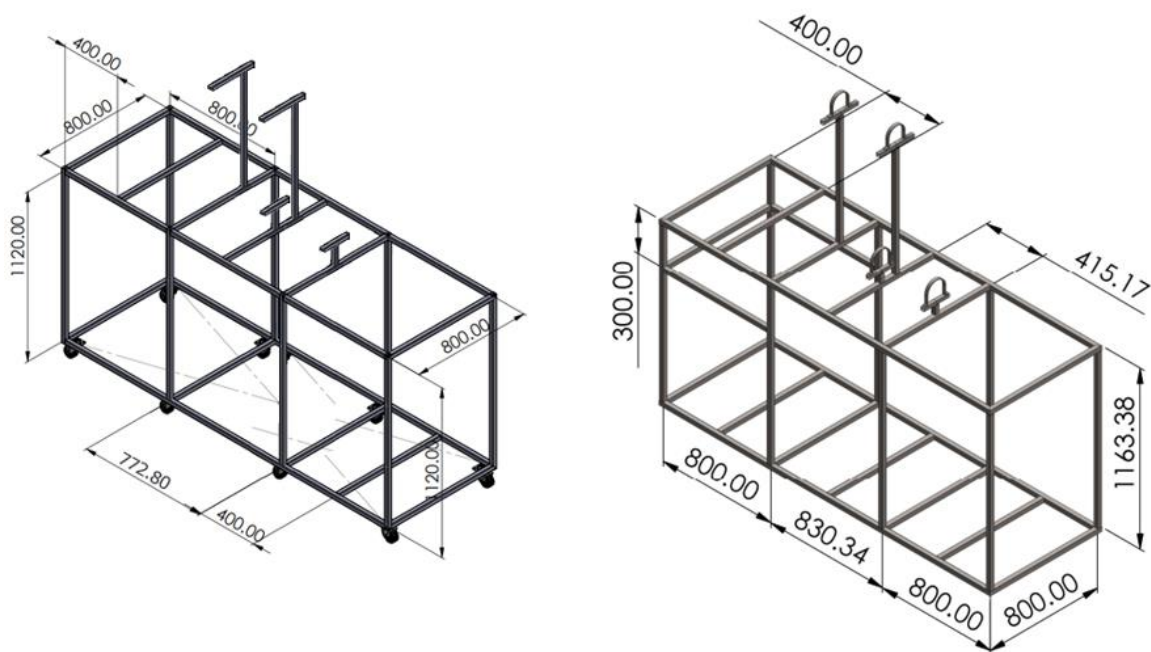


Figura 3.63: Modificaciones en las dimensiones del marco de la estructura de soporte

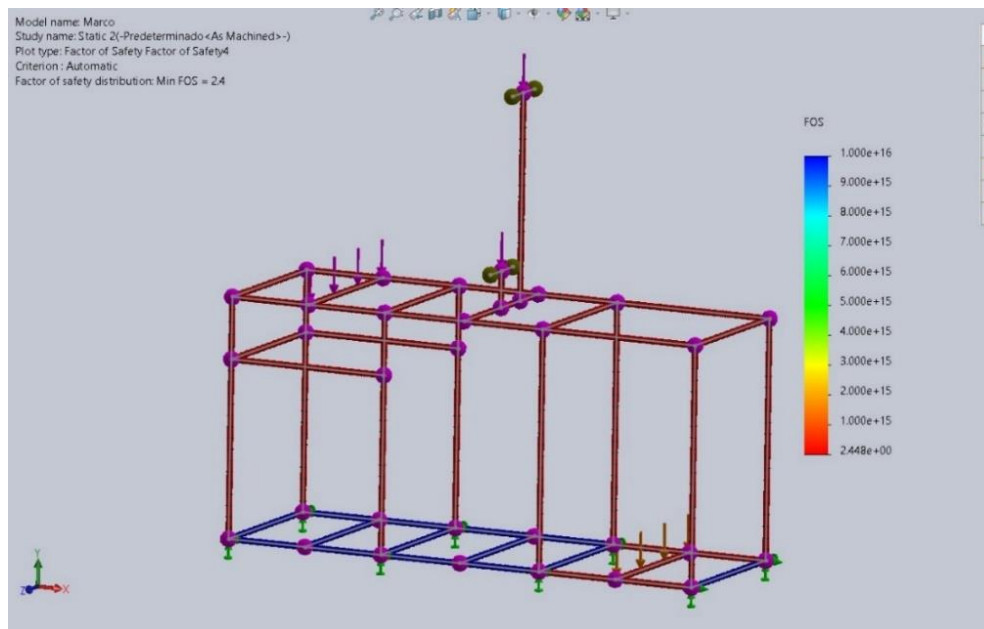
Fuente propia

En cuanto al nuevo marco, es importante señalar los siguientes cambios:

- Se han adicionado más tubos estructurales en diversas ubicaciones porque sirven como soporte adicional para los accesorios que se han agregado, los cuales se detallarán en la siguiente sección.

- Al comparar ambas imágenes de la figura 3.63, se observa que la longitud del marco ha aumentado en un total de 5.75 cm, debido al aumento total de las dimensiones de la red;
- Asimismo, la altura del marco se disminuyó en 4.34 cm para poder colocar correctamente los soportes de las tuberías.

A pesar de las modificaciones anteriores, el marco no ha disminuido su efectividad para resistir las cargas críticas a las cuales estará sometido, es decir, el peso de la bomba y del tanque completamente lleno de agua. Esto se demuestra con el resultado una simulación de esfuerzos realizada en un programa CAD (SolidWorks), en donde se obtuvo como resultado que el factor de seguridad mínimo presente se sigue manteniendo en 2.4 para el caso crítico en el que las tuberías solo se sostendrían con un soporte, tal y como se muestra en la figura 3.64; lo cual nos garantiza que se sigue cumpliendo el requerimiento de un factor de seguridad reglamentario de 2.0:



*Figura 3.64: Simulación de esfuerzos en el marco de la estructura de soporte*

*Fuente propia*

### 3.5.2.3 Componentes adicionales a la estructura de soporte.

A partir del plano 20/29 del anexo V, la vista isométrica de la estructura de soporte serían las que se muestran en la figura 3.65:

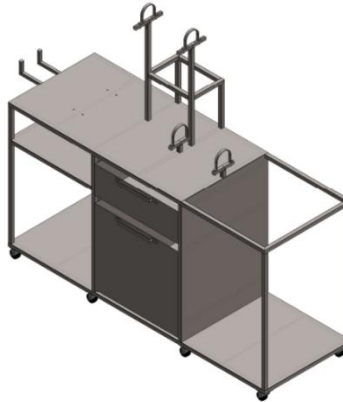


Figura 3.65: Vistas isométricas de la estructura de soporte

Fuente propia

La ubicación de los distintos componentes en la estructura se puede explicar aplicando una proyección en la vista frontal del isométrico de la derecha, tal y como se muestra en la siguiente imagen, donde se señala el espacio designado para cada subsistema del banco de pruebas:

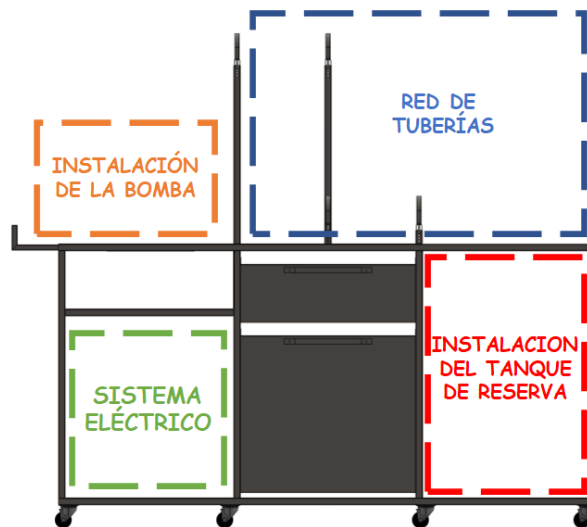
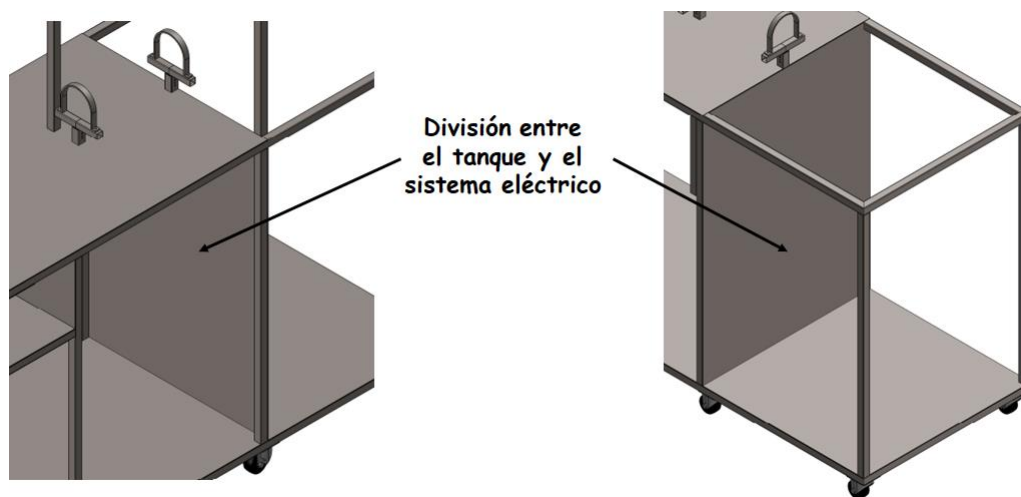


Figura 3.66: Distribución de espacios dentro de la estructura de soporte

Fuente propia

Al respecto de los componentes adicionales en la estructura, cabe mencionar lo siguiente:

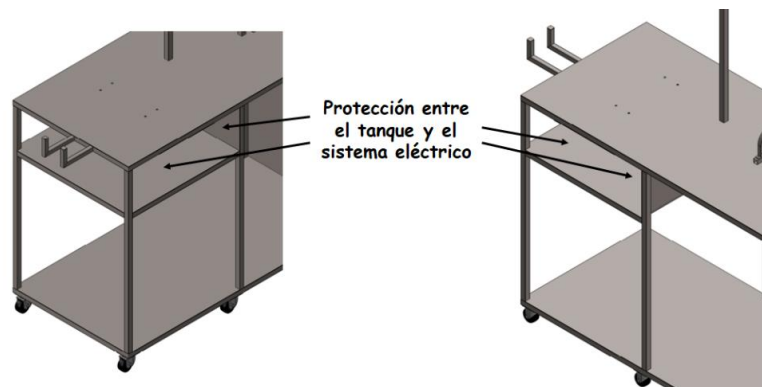
- Láminas: Tanto las para las divisiones entre los espacios asignados como para las superficies horizontales, se ha utilizado lámina de calibre 16 (espesor de 1.5 mm) y acero A36, mejor conocido a nivel nacional como “hierro negro”. Este calibre normalmente es utilizado para fabricar puertas, portones o cualquier tipo de estructura metálica de alta resistencia y costo reducido. Por otra parte, debido a la baja resistencia a la corrosión que presenta este material, será necesario aplicar 2 capas de pintura anticorrosiva.
- División entre el tanque y el sistema eléctrico: Se optó por instalar una lámina divisora entre los espacios del tanque de reserva y los componentes del sistema eléctrico, ya que se requiere guardar la integridad de las conexiones en caso ocurra algún derramamiento de agua:



*Figura 3.67: División entre el tanque de reserva y el sistema eléctrico*

*Fuente propia*

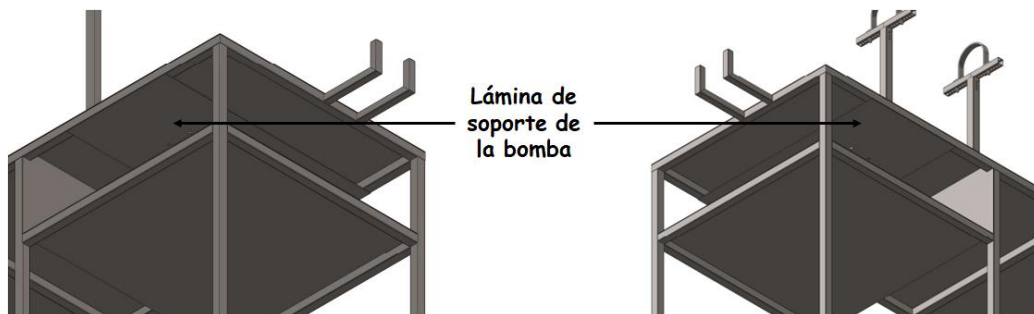
- Protección entre la bomba y el sistema eléctrico: De manera similar al tanque, se adicionó un nivel intermedio entre la instalación de la bomba y el sistema eléctrico, debido a que la bomba también puede presentar fugas de agua, las cuales se pueden filtrar por los agujeros de los pernos de la fijan con la estructura y derramarse sobre las conexiones, de manera que esta división sirve como protección:



*Figura 3.68: División entre la bomba y el sistema eléctrico*

*Fuente propia*

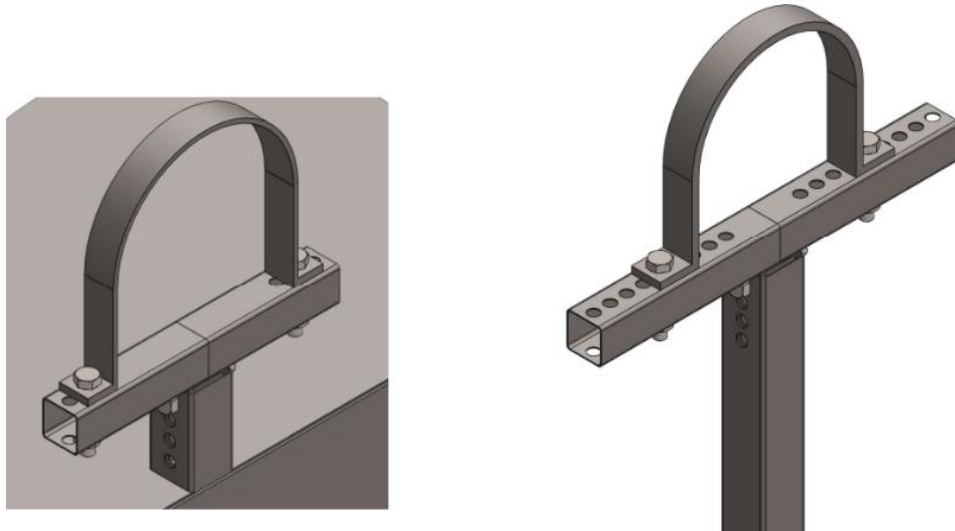
- Lámina de soporte para la bomba: Asimismo, debajo de la instalación de la bomba se ha adicionado una lámina extra, para mejorar la sujeción de los pernos que mantienen unidos sus soportes con la estructura.



*Figura 3.69: Lámina de soporte para la sujeción de la bomba*

*Fuente propia*

- Soportes de las tuberías: Para acoplar las tuberías a los soportes de la estructura, se ha diseñado un sistema de abrazaderas sujetadas con pernos hexagonales de 5/16 in de diámetro nominal, tal y como se muestran en la siguiente figura:



*Figura 3.70: Lamina de soporte para la sujeción de la bomba*

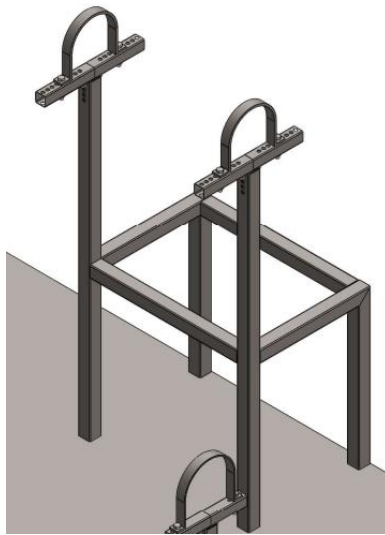
*Fuente propia*

- En la figura 3.70 se encuentra a la izquierda una imagen de los soportes de la tubería de succión y a la derecha los de la tubería de impulsión; al respecto de ambos soportes se pueden mencionar los siguientes puntos:
  - Tal y como se observa en la imagen, la serie de agujeros en los soportes permite ajustar las abrazaderas tanto en sentido horizontal como en vertical; esto se debe que la posición de las tuberías está sujeta a cambios, por la geometría de los ductos de entrada y salida de las bombas que se vayan a ensayar.

- La parte móvil de los soportes se debe fabricar con un tubo estructural de menor medida al que se utilizó en el marco de la estructura, es decir, con tubo cuadrado de 1 in (25mm); de esta manera se garantiza que dichas piezas se puedan desplazar verticalmente para poder variar la altura geodésica de la posición de las tuberías. Por otra parte, para ambos soportes, los pernos que se utilizarán para el acople entre la abrazadera y el tubo serán de cabeza hexagonal y con un diámetro nominal de 5/16 in.
- Se considera que la ubicación de la tubería de impulsión puede variar más que la de succión, ya que la posición de la salida de la bomba depende de la geometría de voluta de la bomba ensayada. Por tal motivo, los soportes de la tubería de impulsión se han habilitado para la posición de la abrazadera pueda variar en sentido horizontal en 9 ubicaciones, mientras que los de la tubería de succión solo pueden variar en 3 ubicaciones.

Los detalles de estos componentes se muestran en los planos 24/29 y 25/29 del anexo V.

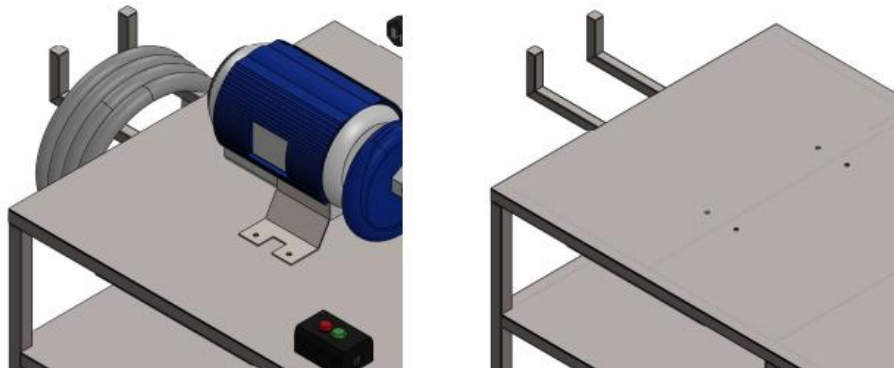
- Estructura de refuerzo para los soportes de la tubería de impulsión: Asimismo, se ha optado por asegurar los soportes de la tubería de impulsión soldándoles un conjunto de tubos que forman una estructura de refuerzo; esto tiene por objetivo aumentar la estabilidad de dicha tubería cuando el banco se encuentre en operación y pueda resistir mejor los impulsos provocados por el flujo de agua. Los detalles de dicha estructura se encuentran en el plano 23/29.



*Figura 3.71: Estructura de refuerzo para los soportes de la tubería de impulsión*

*Fuente propia*

- Soportes para la manguera del drenaje del tanque: Ya que la manguera del drenaje del tanque no siempre estará acoplada a la válvula de esfera, se optó por agregar un par de soportes a un costado de la estructura para suspender dicha manguera, tal y como se muestra en la figura 3.72:



*Figura 3.72: Soportes de la manguera de drenaje*

*Fuente propia*

Las dimensiones de estos soportes se encuentran en el plano 23/29 del anexo V; también se debe aclarar que se diseñaron con tubo estructural cuadrado

de 1 in, al igual que los soportes de las tuberías, puesto que el peso de la manguera no representa una carga comprometedora para la capacidad de la estructura.

- Gavetas para accesorios y equipos: Se ha contemplado agregar dos gavetas fabricadas con el mismo tipo de lámina, para guardar los instrumentos de medición complementarios y los equipos que se utilizarán durante los ensayos. Tal y como se muestra en la figura 3.73.

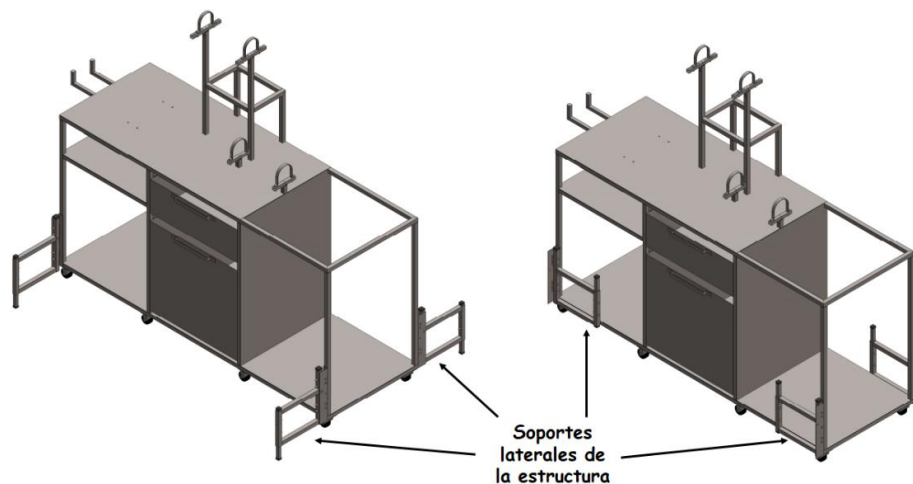


*Figura 3.73: Gavetas para equipos complementarios del banco*

*Fuente propia*

La gaveta superior se utilizará para guardar los instrumentos de laboratorio y de medición; por otra parte, la gaveta inferior contendrá los equipos auxiliares que se utilizarán durante los ensayos de cavitación. Todos estos equipos se exponen con mayor detalle en el anexo I.

- Soportes laterales para el refuerzo de la estructura del banco: Según el plano 23/29 del anexo V, la estructura del banco cuenta con 2.46 m de longitud y 0.83 m de ancho; por lo cual, se ha optado por instalar unos soportes en los laterales para mejorar la estabilidad de toda la estructura durante los tiempos de operación, tal y como se muestra en la figura 3.74. Cabe destacar que dichos soportes se pueden cerrar al momento de desplazar el banco. Los detalles de dichos soportes se encuentran especificados el plano 28/29 y 29/29 del anexo V.



*Figura 3.74: Soportes laterales para el refuerzo de la estructura.*

*Fuente propia*

- Soldaduras de la estructura de soporte: Tal y como se determinó en la sección 3.3.4, los diversos cordones de soldadura se realizarán con electrodos AWS-E6013 y con una garganta de 3/32 in (2.38 mm). Con el fin de reducir los costos de fabricación, se opta por realizar dichos cordones con soldadura por arco y electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés). En el plano 21/29 del Anexo V se señalizan las soldaduras que se deberán realizar para sujetar el marco y los soportes de la estructura.

Asimismo, en el plano 22/29 se indican los cordones que se utilizarán para sujetar tanto las láminas que sostendrán los componentes de la red de tuberías, como las que servirán como protección para el tablero del sistema eléctrico; cabe destacar que los cordones utilizados en las láminas serán intermitentes, es decir, tendrán una longitud de 20 mm y estarán separados por una distancia de 75 mm.

### 3.5.3 Detalles del sistema eléctrico.

Dentro del desarrollo del diseño eléctrico existen ciertas condiciones que no fueron completamente definidas, a continuación se procederá a enlistar dichos detalles.

- Tomacorriente de fuente de alimentación: El tomacorriente macho a utilizar será trifásico y correspondiente con la NEMA 1460 3P-4 HILOS, el cual cumple con las condiciones de alimentación requeridas para la instalación eléctrica.



*Figura 3.75: Tomacorriente macho de alimentación del sistema eléctrico del banco*

*Fuente tienda en línea ferretería vidrí*

- Especificaciones de los anclajes y los rieles utilizados en el tablero del banco: Los dispositivos seleccionados en el diseño poseen el siguiente tipo de anclaje M4 35 x 60/75; el cual corresponde al arreglo riel DIN (DIN 46277-3), este riel o carril es un riel normado usado en todo tipo de instalación eléctrica, tanto industrial como doméstica.

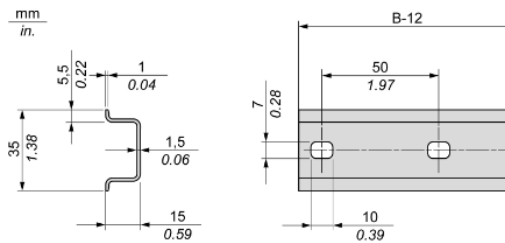


Figura 3.76: Rieles DIN 46277-3

Fuente propia

- Tornillos de sujeción de los componentes dentro del tablero: Todos los gabinetes poseen una placa de montaje la cual sirve para el riel y todos los componentes, para asegurar el riel a la placa se usan tornillos, para una correcta sujeción se ha considerado utilizar Tornillos de perforación auto-roscante Phillips, de cabeza plana, #8 x ½ pulgada



Figura 3.77: Tornillos Phillips de cabeza plana, #8 x ½ in.

Fuente propia

- Tomacorriente doble a 120 V: Se instalará un tomacorriente doble polarizado para tener una fuente de alimentación de fácil acceso para el uso de algunos de los elementos involucrados en las pruebas de cavitación; para esto se utilizará una caja rectangular y un tomacorriente doble conectado a 120 V. Además de su respectivo cableado, se ha considerado utilizar un tomacorriente de la marca eagle 1009-AW, el cual estará a un costado del panel eléctrico. El cable por utilizar será el mismo que el que se usó en el circuito de control ya que hablamos del mismo voltaje.
- Instalación de indicadores LED: La potencia de trabajo a la cual va a estar sometida el banco de pruebas es variable, dependiendo

directamente del motor a instalar. Es importante contar con un indicador visual que le brinde al estudiante una validación visual de la potencia seleccionada, ya que al tener activa una potencia incorrecta generará un daño severo al motor. El dispositivo seleccionado es el indicador led de la marca Schneider de la línea Easy harmony específicamente el modelo XA2EVM6LC, el cual consta con un voltaje de trabajo de 220v a 60Hz. Teniendo en cuenta siguientes dimensiones para su respectiva instalación.

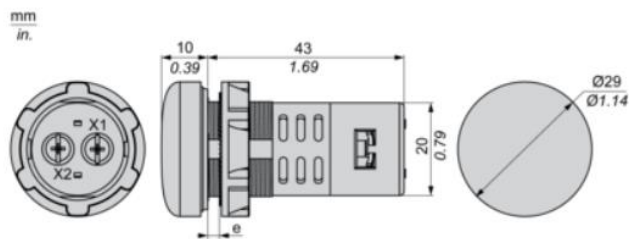


Figura 3.78: Dimensiones del indicador visual.

Fuente Datasheet del producto XA2EVM6LC

Se instalarán 5 indicadores led para satisfacer todas las configuraciones del banco, la conexión eléctrica tendrá que realizarse a la salida de las protecciones eléctricas; los indicadores estarán integrados al gabinete eléctrico y el montaje recomendando por el fabricante es el que se muestra en la figura 3.78:

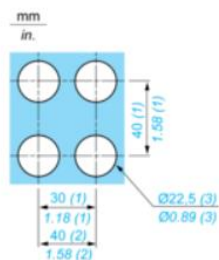
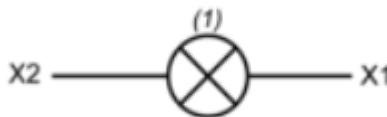


Figura 3.78: Montaje de indicador visual led

Fuente: Datasheet del producto XA2EVM6LC

Donde los 40 mm aplican sí se llegase a implementar un pulsador de emergencia, pero como no es nuestro caso nos quedaríamos con los 30 mm de distancia entre centros y el diámetro de la perforación de 22.5 mm. Para finalizar el diagrama de cableado es el siguiente



*Figura 3.78: Conexión de cableado indicador visual led*

*Fuente Datasheet del producto XA2EVM6LC*

Es muy importante identificar cada led para que el estudiante tenga la certeza de la protección activa al momento de realizar el ensayo.

#### **3.5.4 Presupuesto general**

El presupuesto general para la fabricación y mantenimiento del banco de pruebas se realizará bajo la modalidad de costos unitarios por partidas. Para tal efecto, las partidas se han agrupado según su naturaleza en las siguientes categorías:

- Componentes de la red de tuberías del banco de pruebas
- Componentes de la estructura de soporte del banco de pruebas
- Componentes del sistema eléctrico del banco de pruebas
- Instrumentos de laboratorio e insumos para las pruebas de cavitación
- Mano de obra para la fabricación del banco de pruebas
- Mano de obra para el mantenimiento del banco de pruebas

Los detalles de las partidas de cada categoría se presentan entre las tablas 3.44 y 3.49; cabe destacar que los precios unitarios no incluyen IVA:

Tabla 3.44: Costos unitarios de partidas de los componentes de la red de tuberías del banco de pruebas

<b>Componentes de la red de tuberías del banco de pruebas</b>					
No.	Partida	Unidad	Cant.	C.U.(USD)	Subtotal (USD)
1.1	Compra y adquisición de componentes/accesorios de PVC de la red de tuberías: - Tubo de PVC de 4" X 6 m L X 250 PSI (cant: 1) - Tubo de PVC de 2" X 6 m L X 250 PSI (cant: 1) - Codo 90° de PVC de 4" X 250 PSI (cant: 3) - Tee de PVC de 4" X 250 PSI (cant: 1) - Unión universal de PVC de 2" X 250 PSI - Reductores de sección de dimensiones variadas y con 250 PSI de presión máxima. - Adaptadores macho y hembra de dimensiones variadas y con 250 PSI de presión máxima - Tee's reductoras de dimensiones variadas y con 250 PSI de presión máxima - Reductor de turbulencias (cant: 1)	UNI	1	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00
1.2	Compra y adquisición de válvulas de la red de tuberías: - Válvula de globo de 2" (cant 2) - Válvula de esfera de 1/2" (cant: 1) - Válvula desairadora de 2" (cant: 1)	UNI	1	\$ 410.00	\$ 410.00
1.3	Compra y adquisición de instrumentación de medición: - Manómetro digital (cant: 1) - Vacuómetro digital (cant: 1) - Caudalímetro ultrasonoro (cant 1)	UNI	1	\$ 1,700.00	\$ 1,700.00
1.4	Compra y adquisición de bomba centrífuga de 2.0 HP	UNI	1	\$ 250.00	\$ 250.00
1.5	Compra y adquisición de sistema de purificación de agua	UNI	1	\$ 300	\$ 300
1.6	Compra y adquisición de tanque de polietileno de 58 G	UNI	1	\$ 60	\$ 60
1.7	Compra y adquisición de insumos consumibles para el montaje de la red de tuberías: - GLN de pegamento PVC transparente (cant: 1). - Cinta Téflon de 3/4" para cañería (cant: 6)	UNI	1	\$ 10.00	\$ 10.00
Costo total de componentes de la red de tuberías					\$ 3,730.00
IVA (13%)					\$ 484.90
Total (USD)					\$ 4,214.90

Tabla 3.45: Costos unitarios de partidas de los Componentes de la estructura de soporte del banco de pruebas

<b>Componentes de la estructura de soporte del banco de pruebas</b>					
No.	Partida	Unidad	Cant.	C.U. (USD)	Subtotal (USD)
2.1	Compra y adquisición de componentes metálicos de la estructura de soporte: - Tubo cuadrado de acero A36 en chapa 16: 1.5" X 1.5 mm esp X 6 m L (cant: 6). - Tubo cuadrado de acero A36 en chapa 16: 1.1/4" X 1.5 mm esp X 6 m L (cant: 1). - Ángulo cuadrado acero A36 en chapa 16: 1.5" X 1.5 mm esp X 6 m L (cant: 1). - Platina de acero A36 en chapa 16: 1.0 " x 1/8 " esp X 6 m L (cant: 1) - Lámina de acero A36 en chapa 16: 2 m X 1 m X 1.5 mm esp (cant: 5)	UNI	1	\$ 300.00	\$ 300.00
2.2	Compra y adquisición de rodos movilizadores para la estructura de soporte	UNI	8	\$ 13.00	\$ 104.00
2.3	Compra y adquisición de insumos consumibles para la fabricación de la estructura: - Libra de electrodos ER 6013 de 1/8" (cant: 7) - Discos de corte para metal. - Pernos completos de diversas medidas - Galón de pintura anticorrosiva (cant: 1) - Galón de pintura (cant: 1)	UNI	1	\$ 130.00	\$ 130.00
Costo total de los componentes de la estructura de soporte					\$ 534.00
IVA (13%)					\$ 69.42
Total (USD)					\$ 603.42

Tabla 3.46: Costos unitarios de partidas de los componentes del sistema eléctrico del banco de pruebas

<b>Componentes del sistema eléctrico de banco de pruebas</b>					
No.	Partida	Unidad	Cant.	C.U. (USD)	Subtotal (USD)
3.1	Compra y adquisición de componentes de sistema eléctrico del banco de pruebas: - Repartidor trifásico (cant: 1) - Contactor trifásico (cant: 1) - Protección termomagnética de 3 polos (cant: 5) - Tablero trifásico (cant 1) - Tomacorriente macho trifilar para conexión de 240 V. - Tomacorriente hembra de doble entrada para conexiones a 120 V. - Cables THHN de calibre 12 y 14	UNI	1	\$ 950.00	\$ 950.00
3.2	Compra y adquisición de insumos para la instalación del sistema eléctrico del banco de pruebas: - Cinta aislante - Polducto	UNI	1	\$ 15	\$ 15
Costo total de componentes del sistema eléctrico del banco de pruebas					\$ 965.00
IVA (13%)					\$ 125.45
Total (USD)					\$ 1,090.45

Tabla 3.47: Costos unitarios de partidas de los instrumentos de laboratorio e insumos para las pruebas de cavitación

Instrumentos de laboratorio e insumos para las pruebas de cavitación					
No.	Partida	Unidad	Cant.	C.U. (USD)	Subtotal (USD)
4.1	Compra y adquisición de instrumentos de laboratorio para la primera etapa de las pruebas NPSH3, donde se caracteriza el agua que se utilizará durante el ensayo de cavitación: - Pipeta graduada (cant: 1) - Probeta graduada (cant: 1) - Matraz Kitasato (cant: 1) - Placa Petri (cant: 2) - Filtro SST (Cant: 10) - Embudo Buschner (cant: 1)	UNI	1	\$ 400.00	\$ 400.00
4.2	Compra y adquisición de equipos auxiliares para la segunda etapa de las pruebas de cavitación: - Barómetro digital (cant: 1) - Balanza de precisión (cant: 1). - Bomba de vacío (cant: 1). - Horno pequeño de cocina (cant: 1). - Termómetro inflarajo (cant: 1) - PC portátil (cant: 1).	UNI	1	\$ 2,260.00	\$ 2,500.00
Costo total de los instrumentos e insumos para las pruebas de cavitación					\$ 2,900.00
IVA (13%)					\$ 377.00
Total (USD)					\$ 3,277.00

Tabla 3.48: Costos unitarios de partidas de mano de obra para la fabricación del banco de pruebas

Mano de obra para la fabricación del banco de pruebas de cavitación					
No.	Partida	Unidad	Cant.	C.U. (USD)	Subtotal (USD)
5.1	Subcontrato de mecánico soldador para la fabricación de la estructura de soporte	Horas hombre	32	\$ 15.00	\$ 480.00
5.2	Subcontrato de un técnico fontanero para el armado de la red de tuberías	Horas hombre	16	\$ 15.00	\$ 240.00
5.3	Subcontrato de técnico electricista para la instalación del sistema eléctrico.	Horas hombre	8	\$ 15.00	\$ 120.00
5.4	Alquiler de aparato de soldadura SMAW	Día	4	\$ 30.00	\$ 120.00
5.5	Alquiler de máquina Airless para aplicar pintura	Día	1	\$ 20.00	\$ 20.00
Costo total de mano de obra para fabricación del banco de pruebas (USD)					\$ 980.00
IVA (13%)					127.40
Total (USD)					1107.40

Tabla 3.49: Costos unitarios de partidas de mano de obra para el mantenimiento del banco de pruebas

Mano de obra para mantenimiento de banco de pruebas					
No.	Partida	Unidad	Cant.	C.U. (USD)	Subtotal (USD)
6.1	Subcontrato de mecánico soldador para trabajos de mantenimiento predictivo/correctivo de la estructura de soporte	Horas hombre	32	\$ 15.00	\$ 480.00
5.2	Subcontrato de un técnico fontanero para trabajos de mantenimiento predictivo/correctivo de la red de tuberías	Horas hombre	32	\$ 15.00	\$ 480.00
5.3	Subcontrato de técnico electricista para trabajos de mantenimiento predictivo/correctivo del sistema eléctrico.	Horas hombre	32	\$ 15.00	\$ 480.00
Costos totales anuales de mano de obra para mantenimiento del banco de pruebas (USD)					\$ 1,440.00
IVA (13%)					\$ 187.20
Total (USD)					\$ 1627.20

En la tabla 3.50 se presenta la sumatoria de los costos totales de todas las categorías:

Tabla 3.50: Costos totales del banco de pruebas de cavitación

Costos totales del banco de pruebas de cavitación		
No.	Partida	Costo (USD)
1	Componentes de la red de tuberías	\$ 4,214.90
2	Componentes de la estructura de soporte del banco de pruebas	\$ 603.43
3	Componentes del sistema eléctrico de banco de pruebas	\$ 1,090.45
4	Instrumentos de laboratorio e insumos para las pruebas de cavitación	\$ 3,277.00
5	Mano de obra para la fabricación del banco de pruebas de cavitación	\$ 1,107.40
6	Costos anuales por Mantenimiento	\$ 1,627.20
<b>TOTAL (USD)</b>		<b>\$ 10,920.38</b>

Por lo tanto, la fabricación y el mantenimiento del banco de pruebas de cavitación requiere de un presupuesto cuya suma es de \$10,920.38 dólares estadounidenses, con IVA incluido y tomando en cuenta los costos anuales de mantenimiento para el primer año de operación.

## CONCLUSIONES

- En base al estudio bibliográfico realizado en el capítulo II del presente documento, se determina que la presencia de cavitación se ve influenciada principalmente por variaciones en la presión y en la temperatura de trabajo del fluido; por lo cual, en lo que respecta a los sistemas de bombeo, la cavitación surge principalmente en las tuberías de succión por caídas de presión, las cuales surgen como consecuencia de factores como pérdidas energéticas en accesorios, mal dimensionamiento del diámetro de las tuberías durante la fase de diseño del sistema, y cotas de instalación mayores a las permisibles por el fabricante de la bomba, en el caso de instalaciones en succión.
- El banco de ensayos resultante de todo el proceso de diseño sigue el modelo de circuito cerrado de control por válvula, según la norma ISO 9906. El equipo se divide en tres subsistemas: La red de tuberías, el sistema eléctrico y la estructura de soporte. En el caso de la red de tuberías, su dimensionamiento se determinó principalmente mediante procesos matemáticos iterativos que se basaron en el comportamiento de la curva NPSHr vs Q de familia de bombas centrífugas A1.5 X 1-7, Serie AG y marca Franklin Electric. En cuanto al sistema eléctrico, éste se diseñó en base a un rango preestablecido de potencias nominales de las bombas centrífugas que podrán ser ensayadas en el banco, el cual se determinó según la disponibilidad en el mercado inmediato, por lo cual, el rango incluye a las bombas cuya potencia nominal varíe entre 0.5 HP y 7.5 HP; para tal efecto, el sistema eléctrico principalmente de un circuito en donde se han conectado en paralelo 5 protecciones termomagnéticas de distintas capacidades, las cuales se activarán según la potencia nominal del motor de la bomba ensayada. Finalmente, en lo

relacionado con la estructura de soporte, el dimensionamiento y sujeción de los elementos que la componen se diseñaron en base a la carga máxima a la cual estará sometida, la cual se le atribuyó al peso del tanque de reserva, después de su correspondiente análisis de cargas.

- El sistema de red de tuberías se compone de tuberías de PVC de 4 in de diámetro nominal y diversos accesorios reductores, con la capacidad para resistir hasta 250 PSI de presión; éstas conectan las instalaciones de la válvula de pie, las válvulas reguladoras, los medidores de presión, la válvula desairadora, los sensores del caudalímetro y el reductor de turbulencias. En cuanto a la instalación de la válvula de pie, se ha seleccionado una válvula de marca SIMMONS de 2 in de diámetro nominal; para la instalación de las válvulas reguladoras, se seleccionaron válvulas de globo de marca RED WHITE de 2 in de diámetro nominal; en cuanto a la instalación de los medidores de presión, para la tubería de succión se seleccionó un vacuómetro digital de marca VETO con capacidad de medir presiones relativas negativas de hasta 1 atm, por otra parte, para la tubería de impulsión se seleccionó un manómetro digital de la misma marca y con capacidad de medir presiones relativas de hasta 3500 PSI; en el caso de la instalación de la válvula desairadora, se seleccionó una válvula desairadora de marca VAMEX, modelo E20, de 2 in de diámetro nominal y con 1.6 mm de diámetro de venteo; en lo relacionado con el caudalímetro y sus sensores, se seleccionó el caudalímetro de ultrasonido de marca Flexim, Modelo portátil F601 y con capacidad de realizar mediciones de caudal y temperatura de flujo en tuberías de hasta 6.5 in de diámetro interno; Finalmente, en lo que respecta a la instalación del reductor de turbulencias, se seleccionó un reductor de marca MABA Water, modelo COM-007.

- En base al análisis de cargas y sujeción de componentes, se determinó que la estructura de soporte se fabricará con tubos estructurales cuadrados de 1 1/4 in y 1.5 mm de espesor (ch.16), asimismo, se utilizarán láminas de acero A-36 (hierro negro) de 1.5 mm de espesor (ch.16). La sujeción de los componentes se realizará mediante cordones de soldadura de 2.38 mm de altura de garganta, los cuales se deberán realizar con soldadura SMAW y electrodos revestidos certificados de código AWS-E6013. Según el resultado de las simulaciones de esfuerzos, la estructura de soporte garantiza un factor de seguridad de 2.4.
- El sistema eléctrico consiste de un circuito trifásico que contiene 5 protecciones termomagnéticas conectadas en paralelo, las cuales se activarán según la potencia nominal de la bomba ensayada, dado que éstas pueden variar entre 0.5 y 7.5 Hp. Para realizar este circuito se seleccionó un tablero de marca ARGOS que contiene un repartidor eléctrico trifásico para la conexión en paralelo de las protecciones a la red trifásica del local de instalación; asimismo, el suministro energético del motor de la bomba ensayada se realizará mediante un contactor trifásico de marca SCHNEIDER, modelo LC1D25F7, con capacidad para abastecer potencias nominales de hasta 7.5 hp; por otra parte, al igual que el contactor, los cables utilizados se han seleccionado en base a la corriente demandada por un motor de 7.5 hp, para tal efecto, se utilizarán cables THHN #12 para el abastecimiento energético de los motores y THHN #14 para el sistema de control de activación de éstos.
- Los ensayos de cavitación a realizarse con el banco de ensayos deben proveer información confiable para poder caracterizar la bomba ensayada en lo relacionado con las condiciones de cavitación; por tal motivo, el desarrollo de las prácticas de laboratorio se ha diseñado para efectuarse en dos etapas,

en donde la primera consiste en la comprobación del estado del agua, contenida en el tanque de reserva, para garantizar que ésta cumpla con los requerimientos establecidos por la norma ISO 9906; posteriormente, durante la segunda etapa se procederá a llevar a cabo el “Ensayo NPSH3”, en donde se pretende obtener la curva NPSHr vs Q de la bomba ensayada, con la asistencia de la aplicación NPSH3.

- Para garantizar la disponibilidad del banco de ensayos, se ha desarrollado un plan de mantenimiento bajo la metodología del Análisis de modos y efectos de falla (AMEF), en donde se han definido más de 40 tareas de mantenimiento distribuidas entre los sistemas del banco; cabe destacar que las frecuencias de estas tareas se han asignado según la criticidad de la falla potencial que se pueda presentar.
- Se ha estimado que la fabricación del banco de pruebas para ensayos de cavitación y la ejecución de su plan de mantenimiento implican un presupuesto de \$10,920.38 dólares estadounidenses; dentro de este presupuesto se han considerado los precios de los componentes con el IVA incluido y los costos de mantenimiento para el primer año de operación.

## RECOMENDACIONES

Para la ejecución del proyecto de fabricación del prototipo de la propuesta de diseño del banco de ensayos, se recomienda:

- Incluir en el presupuesto el monto necesario para la adquisición de licencias profesionales de softwares de simulación que permitan el estudio del estrangulamiento de flujos con válvulas, ya que mediante éstos se podrá comprobar que el dimensionamiento resultante de las tuberías sea adecuado para operar en condiciones libres de cavitación, dentro del rango permitido de caudales; esto se debe efectuar previamente a la construcción del banco para reducir costos por fallas de diseño. Entre los softwares recomendados para tal efecto se pueden mencionar: Autodesk CDF, SIMULIA, Pipe Flow Expert y Aspen Plus.
- Contratar el asesoramiento y mano de obra de empresas locales especializadas en el rubro de la metalmecánica, para asegurar que el prototipo resultante no presente defectos de fabricación que generen costos económicos por imprevistos a corto plazo. A nivel nacional, un grupo de empresas calificadas para cumplir tal función es el siguiente: Grupo Baron, RYSI El Salvador, Mecanicom, TM Industrial y Talleres Moldtrot.
- Contratar los servicios de un especialista en conexiones eléctricas para modificar el circuito del tablero y agregar las conexiones necesarias para habilitar al prototipo del banco para ensayar bombas centrífugas con motores monofásicos, salvaguardando la integridad de los componentes seleccionados y las conexiones indicadas en la propuesta de diseño.

## Bibliografía

- Amanco. (2011). Catálogo de especificaciones y listado de precios. *Catálogo*.
- ARGOS. (2024). ARGOS. *Productos disponibles*. Obtenido de argoselectrica.com: <https://argoselectrica.com/product-category/armarios/>
- Banco M., E., Velarde S, S., & Fernández F., J. (1994). *Sistemas de bombeo*. Guijón: Universidad de Oviedo.
- BERMAD. (2010). Electromagnetic Flow Meters MUT7000. Instruction Manual. *Catálogo*.
- Çengel, Y. A. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. Reno, Nevada: McGraw Hill.
- Çengel, Y. A. (2015). Termodinámica. En *Termodinámica*. España: Mc Grag Hill.
- d'Agostino, L. (2017). *Cavitation Instabilities and Rotordynamic Effects in Turbopumps and Hydroturbines*. Pisa: Springer.
- Días, L. E., Mustafá, Y., & Ríos, L. G. (2006). *Construcción y puesta en marcha de un banco de pruebas para bombas centrífugas pequeñas*. Risaralda, Colombia: Universidad Tecnología de Pereira.
- DIPAC. (s.f.). *Catálogo de tubo estructural cuadrado*. Obtenido de dipacmanta.com: <https://dipacmanta.com/producto/tubos/tubo-estructural/tubo-estructural-cuadrado-negro/>
- Editorial Etece. (5 de Agosto de 2021). *Termómetro*. Obtenido de www.Concepto.de: <https://concepto.de/termometro/>
- Fernández, M. T. (2015). *Elaboración de Fórmulas analíticas y tablas de cálculo para las estructuras metálicas de acero según la normativa Eurocódigo 3*. Barcelona: Escola Técnica Superior d'Ednginyeria Industrial de Barcelona.
- FLEXIM. (2020). Operating instruction: FLuxus f60x". Berlin: FLEXIM.

- Franklin Electric. (2013). *Bombas Centrífugas, Serie AG acoplada a motor*. Guatemala.
- Gamarra, B. B. (2013). *Métodos de diseño en Ingeniería Mecánica*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/529028668/3-Metodos-de-Disenio-en-Ing-Mecanica-CONCEPTO-DE-SOLUCION-Benjamin-Barriga-PUCP>
- García Guinéz, O. (2011). *Mejora del Plan de Mantenimiento de Motores de Combustión Interna de gas natural Rolls-Roice KVGS-18G4*. Barcelona: Facultad Náutica de Barcelona .
- González, X. (9 de Enero de 2024). *Purificador de agua de ozono, ¿Qué es? ¿Cómo funciona?* Obtenido de [www.filtrashop.com](http://www.filtrashop.com): <https://filtrashop.com/purificador-de-agua-ozono-que-es-como-funciona/>
- Hibbeler, R. C. (2012). *Análisis Estructural*. México: PEARSON.
- IKS PVD Technology. (18 de Mayo de 2018). *Clasificación de medidores de vacío*. Obtenido de [www.ikstechnology.com](http://www.ikstechnology.com): <https://www.ikstechnology.com/info/classification-of-vacuum-gauges-26347850.html>
- Ingeniería Mecánica y Mas. (13 de Mayo de 2018). *Tipos de bombas*. Obtenido de [www.ingenieriamecanicaymass.blogspot.com](http://www.ingenieriamecanicaymass.blogspot.com): <http://ingenieriamecanicaymass.blogspot.com/2018/05/clasificacion-y-tipos-de-bombas.html>
- Juan, D. S. (17 de Diciembre de 2018). *Cavitación de bomba centrífuga*. Obtenido de [www.0grados.com](http://www.0grados.com): <https://0grados.com/cavitacion-de-bomba-centrifuga/>
- Julián Pérez Porto, M. M. (15 de Agosto de 2018). *Cavitación - Qué es, definición y concepto*. Obtenido de [Definición.de](http://Definición.de): <https://definicion.de/cavitacion/>
- Kenneth, J. (1987). Bombas, selección, uso y mantenimiento. En J. Kenneth, *Bombas, selección, uso y mantenimiento* (págs. 71-147). Madrid: McGRAW-Hill.

- Llord, L. (12 de Diciembre de 2012). *La Cavitación en Redes de Tuberías*. Obtenido de [www.amusementlogic.es](http://www.amusementlogic.es): <https://amusementlogic.es/articulos/la-cavitacion-en-redes-de-tuberias>
- MABA WATER. (s.f.). *Reductor de tubulencias Ajolote*. Obtenido de [www.magawater.com](http://www.magawater.com): <https://mabawater.com/producto/reductor-de-turbulencia-axolot-4%E2%80%B3/>
- Mariani, C. (2008). *Manual de albañilería*. Lima: ASPEM.
- Mataix, C. (1983). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. En C. Mataix, *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo S. A.
- Mataix, C. (1983). *Turbomáquinas Hidráulicas*. En C. Mataix, *Turbomáquinas Hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo S. A.
- METEORED tiempo. (2023). *Histórico del tiempo en San Salvador*. Obtenido de [www.tiempo.com](http://www.tiempo.com): <https://www.tiempo.com/el-salvador/san-salvador/historico>
- Ministerio de Salud. (2009). *Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01.08*. EL Salvador: Diario Oficial.
- Miño Ormaza, M. P. (2015). *Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) de un motor de combustión interna Warstila 18VN32LNGD*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Monge R, M. Á. (9 de Enero de 2018). *Algunas observaciones a las instalaciones con equipos de bombeo*. Obtenido de [www.iagua.es](http://www.iagua.es): [https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/algunas-observaciones-instalaciones-equipos-bombeo#:~:text=La%20sumergencia%20\(S\)%20es%20la,buen%20funcionamiento%20de%20la%20bomba.](https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/algunas-observaciones-instalaciones-equipos-bombeo#:~:text=La%20sumergencia%20(S)%20es%20la,buen%20funcionamiento%20de%20la%20bomba.)
- MVCS. (2015). *Norma I.S. 010 Instalaciones Sanitarias para Edificaciones*. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Organización Internacional de Normalización. (2012). *ISO 9906*.

- OXGASA. (2014). *Manual del soldador*. San Salvador: OXGASA.
- RED WHITE. (s.f.). *Catálogo 211B Bronze Globe Valve*. Obtenido de [www.redwhitevalvecorp.com](http://www.redwhitevalvecorp.com):  
<https://redwhitevalvecorp.com/product/211bbronze-globe-valve/>
- RED WHITE. (s.f.). *Catálogo 5044F Brass Full Port Ball Valve*. Obtenido de [www.redwhitevalvecorp.com](http://www.redwhitevalvecorp.com): <https://redwhitevalvecorp.com/pdfs/5044F.pdf>
- Schneider Electric. (2024). *Schneider Electric. Productos disponibles*. Obtenido de [www.se.com](http://www.se.com): <https://www.se.com/cr/es/all-products>
- Servipresión. (s.f.). *¿Qué es la Cavitación? ¿Cómo evitarla?* Obtenido de [www.servipresión.com](http://www.servipresión.com): <https://servipresion.com/que-es-la-cavitacion-como-evitarla/>
- Shigley, J. E. (2012). *Diseño de Ingeniería Mecánica*. Bogotá: McGraw Hill.
- SIGET. (2021). *Manual de Especificaciones Técnicas de los materiales y equipos utilizados para la Construcción de Líneas Aéreas de Energía Eléctrica*. San Salvador: Super Intendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones.
- Simmons manufacturing company. (s.f.). *Product's Dimensions*. Obtenido de [www.simmonsmfg.com](http://www.simmonsmfg.com):  
<https://www.simmonsmfg.com/index.php/specifications/dimensions/>
- Streeter, V. L., Benjamin, W. E., & Bedford, K. W. (1999). *Mecánica de Fluidos*. Colombia: McGraw Hill.
- The Engineering ToolBox. (2013). *Factors of Safety - FOS*. Obtenido de [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com): [https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d\\_1624.html](https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html)
- The Shipyard. (6 de mayo de 2020). *Propeller Cavitation Explained*. Obtenido de [theshipyardblog.com](http://theshipyardblog.com): <https://www.theshipyardblog.com/propeller-cavitation-explained/>
- Tullis, J. P. (1989). *Hydraulics of Pipelines*. New York: WILEY.

- Universidad Politécnica de Valencia. (2022). *Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Disueltos Totales. Procedimientos de medida*. Obtenido de [www.youtube.com: https://www.youtube.com/watch?v=UUvkktuDIIQ&t=315s](https://www.youtube.com/watch?v=UUvkktuDIIQ&t=315s)
- VAMEX. (2020). Catálogo General de Válvulas de Aire. En VAMEX, *Catálogo General de Válvulas de Aire*. México: Válvulas VAMEX S.A. de C.V.
- Zarza, L. F. (2018). *¿Qué es un caudalímetro y cuantos tipos hay?* Obtenido de [www.iagua.es: https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudalimetro-y-cuantos-tipos-hay](https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudalimetro-y-cuantos-tipos-hay)

# **ANEXOS**

## ANEXOS

### ANEXO I: ENSAYO DE CAVITACIÓN

#### AI.I Procesos de laboratorio involucrados en el ensayo de cavitación

En la sección 3.1.1.3 se menciona que el diseño del banco se ha encaminado para habilitarlo para realizar ensayos NPSH3, según los requerimientos establecidos por la norma ISO 9906, los cuales están encaminados principalmente con el objetivo de garantizar que los datos experimentales sean representativos, es decir, que las condiciones de operación del banco sean adecuadas para determinar correctamente las magnitudes de las variables relacionadas con el NPSH3 de la bomba ensayada.

En cuanto a los factores que influyen en el comportamiento del NPSH3, se pueden mencionar los siguientes:

- Presión atmosférica del local donde se realiza el ensayo
- La características del agua que se utilizará como fluido de trabajo.

Por lo tanto, previamente al ensayo NPSH3, se deben realizar pruebas de laboratorio para garantizar que las condiciones del ensayo cumplan con la normativa.

#### AI.I.I Medición de la presión atmosférica

En la sección 2.4.2 del capítulo II se define al NPSH con la ecuación 2.12:


$$NPSH = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

Esta involucra presiones absolutas; por lo cual, para obtener datos confiables de NPSH3 durante los ensayos de cavitación, se debe medir la presión

atmosférica del local donde se realizará el ensayo con un barómetro. Para tal efecto, se ha seleccionado el barómetro digital Viresa CC-4247, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla AI.1:

Tabla AI.1: Especificaciones técnicas de Barómetro seleccionado

Fuente: <https://viresa.com.mx/barometro-digital-port%C3%81til-cc--4198>

Especificaciones técnicas de Barómetro seleccionado		
Marca	Viresa	
Modelo	CC-4247	
Rango de temperatura de trabajo	0°C - 50°C	
Rango de presión barométrica	7.5 – 825.0 mmHg	
Resolución de presión barométrica	0.1 mmHg	
Peso	141 g	

### AI.I.II Verificación de las propiedades físicas del agua que se utilizará durante los ensayos

Tal y como se menciona en la sección 2.7.3, la norma ISO 9906 indica que el agua que se utilizará durante los ensayos de cavitación debe cumplir con las características del “agua fría limpia”, las cuales se especifican en la tabla AI.2

Tabla AI.2: Propiedades del agua fría limpia

AGUA FRÍA LIMPIA		
Propiedad	Unidad	Magnitud máxima
Temperatura	°C	40.0
Viscosidad cinemática	$m^2/s$	$1.75 \times 10^{-6}$
Densidad	$kg/m^3$	1050.0
Densidad de partículas libres no disueltas	$kg/m^3$	2.50
Densidad de partículas disueltas	$kg/m^3$	50

En cuanto a la verificación de la temperatura del agua, ésta se llevará a cabo con los parámetros que indique el caudalímetro ultrasonoro seleccionado para la red de tuberías, ya que este equipo cuenta con la capacidad para detectar la

temperatura de fluido, mediante un transductor adicional a los que se utilizan para medir la velocidad de flujo.

Por otra parte, la densidad se obtendrá de manera experimental, al dividir la masa de una muestra entre el volumen que ésta abarca, es decir, utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho_{agua} = \frac{\text{Masa de la muestra}}{\text{Volumen de la muestra}} \quad (\text{AI. 1})$$

Al igual que la densidad del agua, las densidades de partículas disueltas y de partículas libres no disueltas se determinarán utilizando métodos experimentales, los cuales se detallan en la siguiente sección.







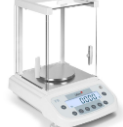


Cabe destacar que según la norma salvadoreña NSO 13.07.01:08 (Tabla AIII.13, Anexo III) el límite permisible de sólidos totales disueltos del agua potable es de  $1000 \text{ mg/l}$ , lo cual equivale a  $1 \text{ kg/m}^3$ , por lo que está por debajo de la magnitud máxima permisible establecido por la ISO 9906 ( $50 \text{ kg/m}^3$ ).

#### **AI.I.II.I Cálculo de densidades de partículas disueltas y de partículas libres no disueltas**

Las densidades en cuestión también se conocen como densidades de sólidos disueltos totales y de sólidos suspendidos totales. Los sólidos disueltos totales (SDT) son la suma de todos los minerales, metales y sales disueltas en una muestra de agua, normalmente se utilizan como indicadores de la calidad del agua. Por el contrario, los sólidos suspendidos totales (SST) son las pequeñas partículas sólidas que permanecen en suspensión y forman una fase externa al agua líquida de la muestra evaluada; normalmente éstos se concentran por sedimentación por el cambio de densidad y también se utilizan como indicadores para la calidad del agua (Universidad Politécnica de Valencia, 2022).

Para verificar la magnitud de estas densidades se vuelve necesario aplicar procesos de laboratorio que requieren los equipos e instrumentos que se muestran en la tabla A1.3:

Tabla A1.3: Instrumentación para determinación de densidades SST y SSD

Instrumentación para determinación de densidades SST y SSD		
Instrumento	Descripción	
Pipeta graduada	Instrumento volumétrico de laboratorio utilizado para transferir con alta precisión volúmenes líquidos entre dos recipientes.	
Probeta graduada	Instrumento volumétrico que permite contener líquidos y medir volúmenes con mayor precisión	
Matraz Kitasato	Es un matraz de vidrio que contiene en su cuello un tubo lateral que permite su conexión a diferentes dispositivos a través de manueras flexibles.	
Placa Petri	Recipiente redondo de vidrio utilizado en laboratorios para cultivar bacterias y otros microorganismos.	
Filtro SST	Son filtros de papel especial utilizados para la determinación de las densidades de sólidos suspendidos en aguas; poseen membranas con capacidad para retener partículas de hasta $0.5 \mu\text{m}$ de diámetro.	
Embudo Buschner	Es un instrumento de laboratorio utilizado para la filtración al vacío o a presión asistida.	
Balanza de alta precisión	Balanzas digitales de laboratorio con capacidad para cuantificar milésimas de gramos.	
Bomba de vacío	Tal y como su nombre lo dice, son bombas especializadas para generar presiones relativas negativas en espacios cerrados. Normalmente se utilizan en procesos de filtración al vacío.	
Horno pequeño de cocina	Comúnmente son utilizados en cocinas domésticas para tostar o recalentar alimentos.	

Al observar los instrumentos involucrados, el proceso para determinar las densidades SST y SDT, en el agua que se utilizará durante las pruebas de cavitación, involucra una filtración al vacío de una muestra extraída del tanque de reserva. Cabe destacar que este proceso se debe realizar utilizando pinzas y guantes de látex para no alterar la composición de las muestras; por lo tanto, los pasos para determinar las densidades son los siguientes:

1. Utilizando la balanza de alta precisión, tomar registro de la masa inicial de filtro SST y de la placa Petri.
2. Tomar una muestra de agua del tanque de reserva e introducir 50 ml en la probeta graduada.



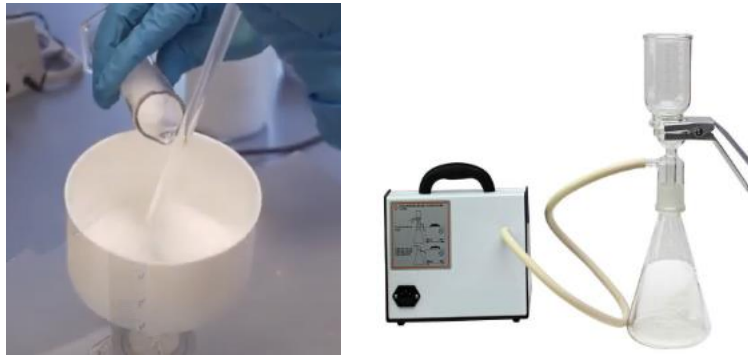
*Figura A1.1: Paso 2 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

3. Introducir un filtro SST en el embudo buschner y acoplar el conjunto a la Matraz Kitasato, la cual debe estar conectada a la bomba de vacío.



*Figura A1.2: Paso 3 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

- Insertar los 50 ml de la probeta en el embudo procurando que el agua se concentre en el centro del filtro; luego activar la bomba para dar inicio al proceso de filtración al vacío.



*Figura A1.3: Paso 4 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

- Una vez se han filtrado por completo los 50 ml de la muestra, transportar 20 ml del matraz a la placa Petri utilizando la pipeta graduada.



*Figura A1.4: Paso 5 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

- Extraer el filtro SST del embudo buschner e introducirlo junto con la placa Petri en el horno de cocina. Dejarlos reposar durante una hora a 105°C para evaporar por completo el agua contenida en ambas muestras

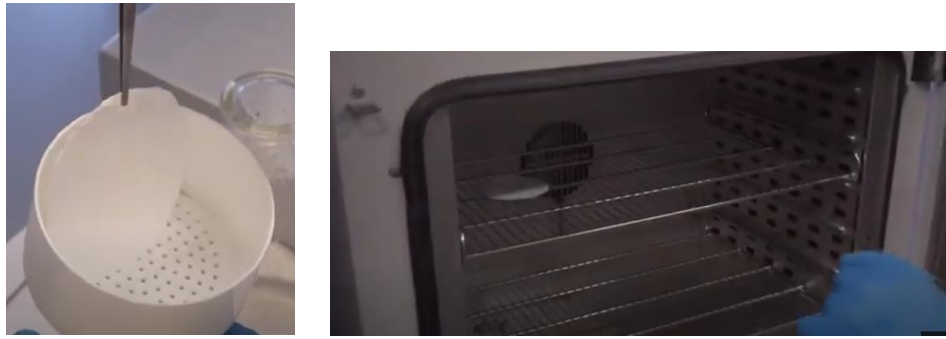


Figura AI.5: Paso 6 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT

7. Después de una hora en el horno y asegurando que el agua se ha evaporado en ambas muestras, tomar registro de las nuevas masas del filtro SST y la placa Petri.

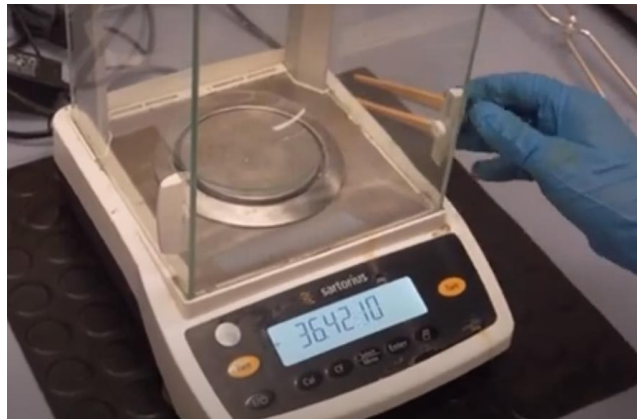


Figura AI.6: Paso 7 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT

8. Las densidades SST y SDT se calcularán con los registros de las masas y utilizando las siguientes fórmulas:

$$\rho_{SST} = \frac{m_{\text{filtro } F} - m_{\text{filtro } i}}{V_P} \quad (AI. 2)$$

$$\rho_{SDT} = \frac{m_{\text{Petri } F} - m_{\text{Petri } i}}{V_M} \quad (AI. 3)$$

Donde:

- $\rho_{SST}$ : Densidad de solidos suspendidos totales

- $m_{filtror F}$ : Masa final del filtro SST
- $m_{filtror i}$ : Masa inicial del filtro SST
- $V_P$ : Volumen de agua en la probeta graduada
- $\rho_{SDT}$ : Densidad de solidos disueltos totales
- $m_{Petror F}$ : Masa final de la placa Petri
- $m_{Petror i}$ : Masa inicial de la placa Petri
- $V_M$ : Volumen de muestra extraída del matraz después de la filtración al vacío

Las densidades resultantes de este proceso deben ser menores que las magnitudes máximas especificadas en la tabla A1.2. La fundación española AQUAE, en colaboración con la OMS, basándose en investigaciones experimentales, han establecido que el parámetro que define la potabilidad de una muestra de agua es la densidad de sólidos disueltos totales (SDT), pues si ésta se encuentra en niveles inadecuados para el consumo humano, necesariamente la densidad de sólidos suspendidos totales (SST) también presentará magnitudes que indicarán que la muestra no es potable. Para tal efecto, ambas organizaciones definieron las siguientes clasificaciones de potabilidad según los niveles de densidad SDT:

- $0.3 \frac{kg}{m^3} - 0.6 \frac{kg}{m^3}$ , Potabilidad aceptable
- $0.6 \frac{kg}{m^3} - 0.9 \frac{kg}{m^3}$ , Potabilidad regular
- $0.9 \frac{kg}{m^3} - 1.2 \frac{kg}{m^3}$ , Potabilidad pobre
- Mas de  $1.2 \frac{kg}{m^3}$ , Potabilidad inaceptable

En nuestro caso, la ISO 9906 establece que la densidad de partículas disueltas totales (SST) no debe superar los  $50 \frac{kg}{m^3}$ , es decir, un valor mucho mayor que la magnitud máxima permisible de los estándares de potabilidad de la

fundación AQUAE. Por lo tanto, durante las pruebas NPSH3, en caso de que el agua utilizada en el banco presente una densidad SDT mayor que la permisible especificada en la tabla A1.2, se deberá proceder a cambiarla por agua potable adecuada para el consumo humano con el filtro del banco, ya que de esa manera se garantiza que el agua utilizada en las pruebas de cavitación cumplirá con los requerimientos de la ISO 9906.

## **A1.11 Aplicación NPSH3**

El desarrollo del ensayo de cavitación NPSH3 requiere de la toma de datos a través de instrumentos de medición y la transformación de estos para obtener la curva característica de la bomba y la curva NPSH3 vs Q; para ello se desarrolló una aplicación de escritorio que sirva a los estudiantes como una herramienta asistida al momento de realizar las pruebas. Por lo tanto, la aplicación se ha desarrollado para cumplir con los siguientes requerimientos:

- Facilitar la tabulación de los datos tomados, proporcionando una interfaz fácil de usar, permitiendo a los estudiantes usuarios realizar cálculos matemáticos repetitivos, como interpolaciones, que alargan el tiempo de ejecución de los ensayos de cavitación.
- Asegurar la consistencia de los ensayos a realizar garantizando que el procesamiento de los datos obtenidos sea correcto.
- Asistir al estudiante en el desarrollo de los ensayos para determinar si el punto de observación en análisis se encuentra bajo los efectos de cavitación, según las condiciones descritas por la norma ISO 9906.
- Plotear automáticamente la curva característica de la bomba a ensayar y la curva NPSH3 vs Q resultante.

- Que sea de accesibilidad simple, de manera que pueda ser usada en equipos de cómputo proporcionados por la universidad o propios del estudiante.

Dado estos requerimientos se decidió que la aplicación se desarrollaría con el lenguaje de programación Dart, utilizando el framework Flutter, que permite el desarrollo de aplicaciones de escritorio, teniendo a su disposición distintas librerías de código libre que permiten trabajar con operaciones matemáticas y la transformación de datos numéricos a gráficas. Dado estos puntos, la aplicación desarrollada es posible ejecutarla en dispositivos con las siguientes características:

*Tabla A1.4: Recursos mínimos para que una PC pueda correr la aplicación NPSH3*

<b>Recursos mínimos para que una PC pueda correr la aplicación NPSH3</b>	
Sistema operativo	Windows (7, 10 o 11), macOS (10.14 o posterior) o Linux
RAM	Mínimo 1GB
Procesador	x86 o x64
Almacenamiento	Requerido un mínimo de 50mb libres

### AI.II.I Desarrollo de la Aplicación NPSH3

Para el desarrollo de la aplicación se siguieron los pasos descritos en la sección 3.1.1.3, que describe el proceso para llevar a cabo el ensayo de cavitación, con lo cual se creó un diagrama de flujo, que describe el procedimiento que llevará a cabo la aplicación, como se muestra en la figura AI.1:

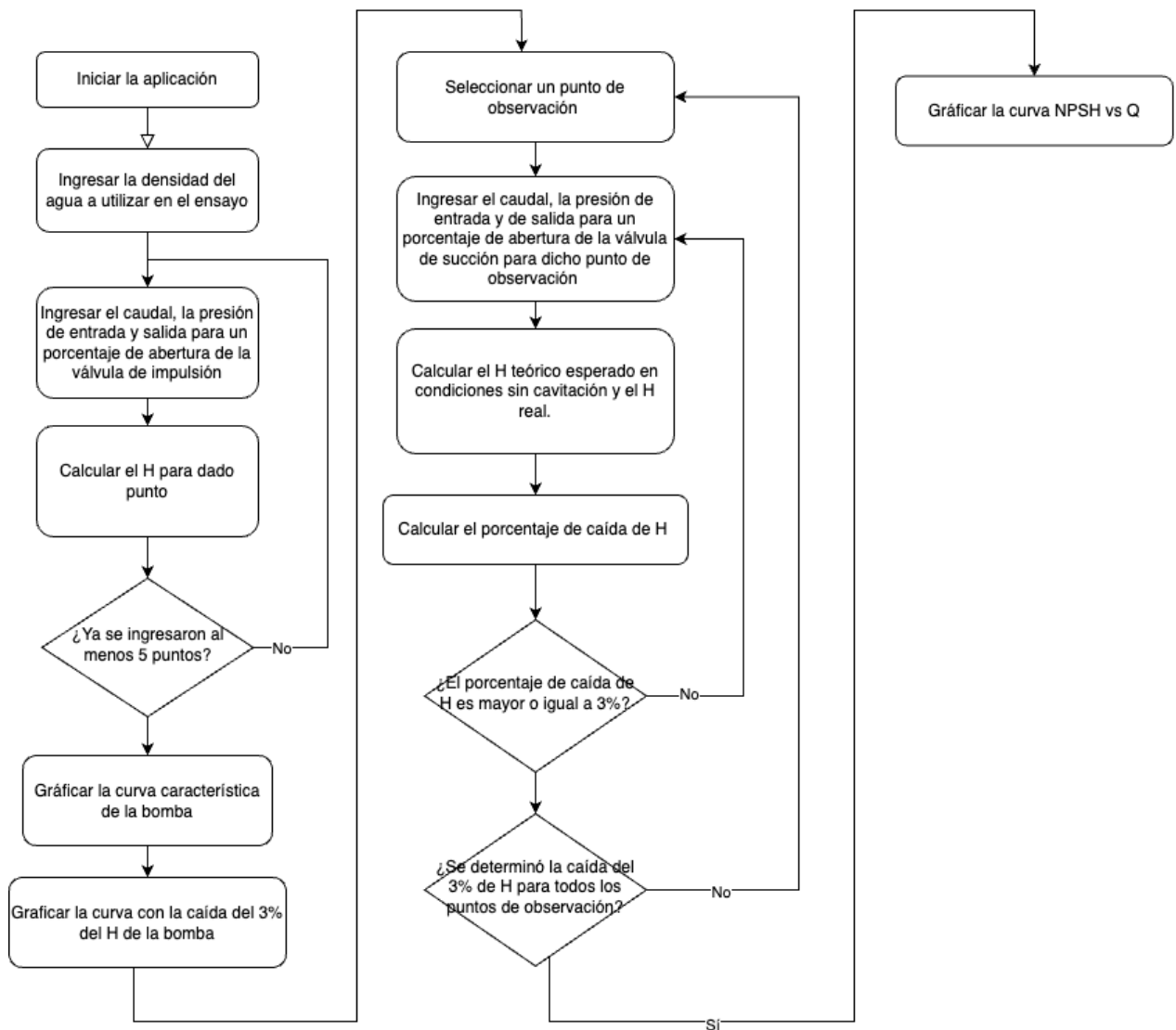


Figura AI.7: Flujograma de la Aplicación NPSH3

Fuente propia

Los cálculos realizados por la aplicación se describen en la tabla AI.5. Para los cálculos que requieren interpolación se utilizó el método de interpolación spline, la interpolación spline es un método de interpolación que utiliza funciones polinómicas de grado bajo en intervalos discretos para crear una función suave que pase por un conjunto de puntos dados, esta interpolación permite crear una curva suave y continua a partir de un conjunto discreto de puntos de datos, el resultado es una aproximación flexible y precisa que se adapta bien a conjuntos de datos complejos y permite una representación más fiel de la relación entre los puntos interpolados. Dicha interpolación se realizó con la librería equations de Dart. Por otra parte, en el siguiente enlace el código de la aplicación:

<https://github.com/rodrigofez/nps3>

Tabla AI.5: Procedimientos lógicos en la programación de la Aplicación NPSH3

Procedimiento	Datos de entrada	Datos de salida	Ecuación/metodología de cálculo
Punto de observación para grafica de curva característica	Presión de entrada Presión de salida Caudal	H neta	$H_{n(Q)} = \frac{P_s}{\rho g} - \frac{P_e}{\rho g}$
Punto bajo condiciones de estrangulamiento para un punto de observación	Presión de entrada Presión de salida Caudal	H neta experimental	$H_{exp(Q)} = \frac{P_s}{\rho g} - \frac{P_e}{\rho g}$
Caída de H	Caudales de todos los puntos de observación  H neta de todos los puntos de observación  Caudal y H neta de punto bajo condiciones de estrangulamiento de válvula de succión	Porcentaje de caída de H	Para calcular la caída de H se necesita primero determinar el H teórico esperado para dado caudal, para ello se realiza una interpolación spline a partir de los valores de H y Q para todos los puntos de observación. Ya obtenido el valor de H interpolado para dado caudal, se procede a calcular la caída de porcentaje entre el H teórico y el H experimental.
Determinación de condición de cavitación	Caudales y su respectiva caída de H para todos los puntos analizados dentro de un punto de observación  Caudal en estado de cavitación y su respectiva caída de H	Caudal donde la caída de H es exactamente 3%	Para graficar la curva NPSH3 vs Q necesitamos los puntos donde la caída de H es del 3%, para ello se realiza una interpolación spline tomando como datos de entrada los todos los caudales y su respectiva caída de presión para todos los puntos analizados dentro de un punto de observación. Con ello interpolamos para un valor de caída de H del 3% y encontramos su respectivo Q.

### AI.III Guía para práctica de laboratorio de ensayo de cavitación

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MECÁNICA DE FLUIDOS



### GUÍA DE LABORATORIO “ENSAYO NPSH3”

Fecha: \_\_\_\_\_

LABORATORIO No: \_\_\_\_\_ GRUPO No: \_\_\_\_\_

INTEGRANTES

CARNET

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### INTRODUCCIÓN

La cavitación es un efecto hidrodinámico que se produce cuando se generan cavidades de vapor dentro de un flujo. Este fenómeno puede ocurrir por aumentos de temperatura o por decrementos significativos de presión, los cuales generalmente se deben a pérdidas energéticas en los sistemas hidráulicos. En el caso de las instalaciones de bombas rotodinámicas, es muy común que esto se presente en las redes de succión, específicamente, en la entrada de estos equipos, ya que en estas ubicaciones se genera un decremento en la presión local para permitir el ingreso del flujo a estas máquinas hidráulicas.

El parámetro utilizado para caracterizar las condiciones de cavitación en bombas rotodinámicas se conoce como “cabeza neta de succión positiva” o NPSH (por sus siglas en inglés); durante esta práctica de laboratorio se utilizará

un banco de pruebas para realizar un ensayo de cavitación a una bomba centrífuga, el cual permitirá obtener los datos necesarios para graficar su curva característica y su curva NPSH vs Q. Por lo cual, el ensayo de cavitación se desarrollará en dos etapas:

1. Caracterización del fluido de trabajo que se utilizará durante el ensayo
2. Ensayo NPSH3.

La guía de laboratorio presenta inicialmente una información teórica general sobre el fenómeno de cavitación y el NPSH; continua con la etapa 1 del ensayo de cavitación, que consiste en la caracterización del fluido de trabajo del ensayo; posteriormente procede con el Ensayo NPSH3 (etapa 2) y, finalmente, concluye con una sección de asignaciones para el grupo de laboratorio.

## **I. FUNDAMENTO TEÓRICO**

En los sistemas hidráulicos de bombeo son innumerables los problemas relacionados con la cavitación, en las bombas produce dos efectos perjudiciales:

1. Disminución de rendimiento.
2. Desgaste de componentes internos por erosión.

La presencia del fenómeno de cavitación en las bombas centrífugas está íntimamente relacionada con:

- a) La instalación de la bomba: dependiendo de sistema de bombeo, las pérdidas en la red de succión pueden provocar que la bomba cavite durante sus tiempos de operación. Asimismo, para instalaciones en succión, la altura de suspensión de la bomba, es decir, la distancia entre la entrada de la bomba y el nivel del líquido en la reserva puede superar la magnitud permitida, lo cual genera caídas de presión que impulsan la cavitación en la entrada de la bomba.

- b) Las condiciones de servicio de la bomba: el caudal de operación de la bomba no debe exceder el máximo permisible para que no se produzca cavitación.

### I.I NPSH requerido y NPSH disponible

Los conceptos de NPSH requerido y NPSH disponible se pueden explicar mejor considerando una instalación de una bomba centrífuga en succión, así como la de la figura I.I:

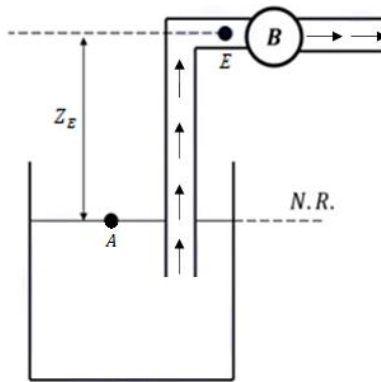


Figura I.I: Instalación de una bomba en succión

Con respecto de la figura I.I se conoce:

- $Z_A$ : Altura del fluido en la reserva, la cual se encuentra abierta a la atmósfera.
- $Z_E$ : Altura de la entrada de la bomba.
- $H_s$ : es la altura de aspiración y se define por  $H_s = Z_E - Z_A$  (cota de la entrada de la bomba sobre el nivel del depósito de aspiración).

Al NPSH disponible es aquél que se determina para una posición dentro de una red de tuberías; en lo que respecta al NPSHd en la entrada de la bomba en la figura A, éste se define bajo la siguiente ecuación:

$$NPSH_d = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (1)$$

Donde:

- $\frac{P_E}{\gamma}$ : Energía de presión en la entrada de la bomba
- $\frac{v_E^2}{2g}$ : Energía de velocidad en la entrada de la bomba
- $\frac{P_v}{\gamma}$ : Energía de presión de vapor

Por otra parte, si se aplica el principio de Bernoulli entre la superficie de la reserva y la entrada de la bomba, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_A - H_{r A-E} = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} + Z_E$$

Si se considera el nivel de referencia en la superficie de la reserva:

- $Z_A = 0$
- $\frac{v_A^2}{2g} = 0$
- $\frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = NPSH_d + \frac{P_v}{2g}$

Por lo tanto:

$$\frac{P_A}{\rho g} - H_{r A-E} = NPSH_d + \frac{P_v}{2g} + Z_E$$

Despejando el  $NPSH_d$ :

$$NPSH_d = \frac{P_A - P_v}{\rho g} - Z_E - H_{r A-E} \quad (2)$$

En el caso de las instalaciones de las bombas en carga, el NPSH disponible se define de manera similar, tal y como se muestra en la figura I.II

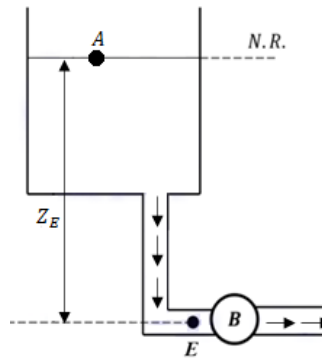


Figura 1.11: Instalación de una bomba en carga

Nuevamente, considerando el nivel de referencia en la superficie (A) y aplicando los principios de Bernoulli entre dicha ubicación y la entrada de la bomba (E), se obtiene:

$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} + Z_A - H_{r A-E} = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} - Z_E$$

$$Z_A = 0$$

$$\frac{v_A^2}{2g} = 0$$

$$\frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = NPSH_d + \frac{P_v}{2g}$$

Por lo tanto:

$$\frac{P_A}{\rho g} - H_{r A-E} = NPSH_d + \frac{P_v}{2g} - Z_E$$

Despejando el  $NPSH_d$ :

$$NPSH_d = \frac{P_A - P_v}{\rho g} + Z_E - H_{r A-E} \quad (3)$$

Al comparar las ecuaciones 2 y 3, se observa que las presiones involucradas se mantendrán constantes, siempre que la temperatura del fluido sea la misma y la reserva se encuentre abierta a la atmósfera para ambos casos. Asimismo, la

altura  $Z_E$  puede que no sea un dato determinante para el comportamiento del  $NPSH_d$ , ya que para algunos casos puede presentar magnitudes despreciables; entonces, las pérdidas  $H_{r A-E}$  son la única variable que depende directamente del caudal de operación, por lo cual, se concluye que la magnitud del  $NPSH_d$  en la entrada de la bomba depende del comportamiento de las pérdidas energéticas de la red de succión.

Por otra parte, El NPSH requerido es el que define las condiciones de cavitación en una ubicación específica, dentro de una red de tuberías. Según la norma ISO 9906, en el caso de las bombas centrífugas, la cavitación se presenta en la entrada de estos equipos cuando las pérdidas en la red de succión provocan que la altura neta de la bomba se reduzca en 3%; el NPSH para estas condiciones se denomina como NPSH3 y cumple con las funciones del NPSH requerido; por este motivo es que la prueba de cavitación que se realiza durante esta práctica de laboratorio se denomina “Ensayo NPSH3”. Para evitar que ocurra cavitación en la entrada de una bomba centrífuga, la red de tuberías debe diseñarse de manera tal que el  $NPSH_d$  en dicha ubicación sea mayor que el  $NPSH_r$ :

$$NPSH_d > NPSH_r$$

En conclusión, El NPSH es una variable que estandariza las condiciones de cavitación para una serie de bombas semejantes, por lo cual, el objetivo principal de los ensayos de cavitación en bombas centrífugas es definir el comportamiento del NPSH requerido, para diferentes caudales de operación, para obtener una curva  $NPSH_r$  vs  $Q$  tal y como la que se presenta en la figura I.III:

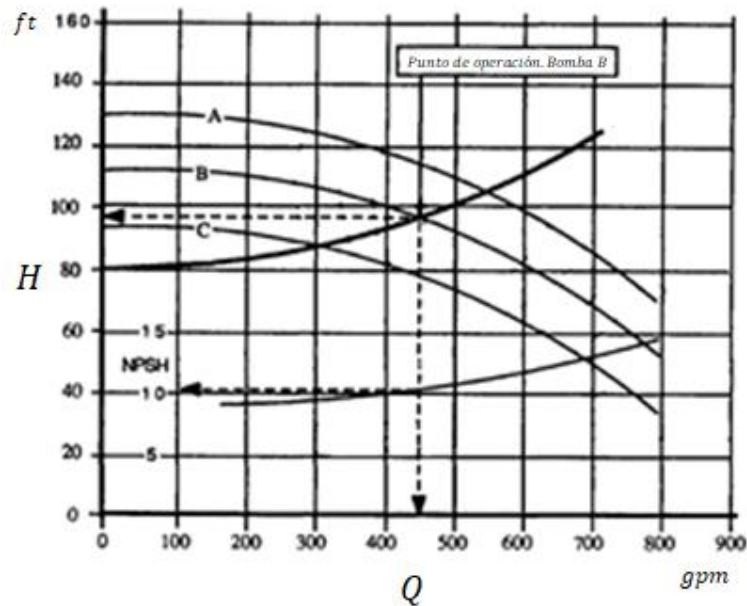


Figura I.III: Curva NPSHr vs Q de una familia de bombas

## II. Ensayo de Cavitación

Al inicio de la guía de laboratorio se menciona que el ensayo de cavitación se realizará en dos etapas:

- Etapa 1: Caracterización del fluido de trabajo del Ensayo NPSH3
- Etapa 2: Ensayo NPSH3

Debido al tiempo requerido para ejecutarlas, se deberán realizar 2 prácticas de laboratorio para el desarrollo de cada una correspondientemente. Sin embargo, antes de iniciar el ensayo de cavitación el grupo de laboratorio debe contar con la instrumentación mencionada en el siguiente listado:

- Barómetro digital portátil
- Termómetro infrarrojo portátil
- Computadora laptop con acceso a la aplicación NPSH3
- Pipeta graduada
- Probeta graduada
- Matraz Kitasato
- Placa Petri

- Filtro SST
- Embudo Buschner
- Balanza de alta precisión
- Bomba de vacío
- Horno pequeño de cocina
- Tubo de 2 in de PVC con tapadera
- Calibrador Vernier
- Cronómetro
- Esfera de vidrio

Una vez el grupo haya comprobado que cuenta con la disponibilidad de todos los instrumentos mencionados anteriormente, puede proceder a ejecutar las etapas del ensayo de cavitación.

### ETAPA 1: Caracterización del fluido de trabajo del Ensayo NPSH3

La ISO 9906 indica que el agua utilizada durante las pruebas de cavitación debe poseer las propiedades adecuadas para ser clasificada como “Agua fría limpia”, la cual presenta las siguientes propiedades:

*Tabla II.1: Magnitudes máximas de propiedades físicas del “Agua fría limpia”*

AGUA FRÍA LIMPIA		
Propiedad	Unidad	Magnitud máxima
Temperatura	°C	40.0
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1050.0
Densidad de partículas libres no disueltas	kg/m <sup>3</sup>	2.50
Densidad de partículas disueltas	kg/m <sup>3</sup>	50
Viscosidad cinemática	m <sup>2</sup> /s	1.75 × 10 <sup>-6</sup>

En las secciones E1.I, E1.II y E1.III se indican los pasos que a seguir para determinar las propiedades que la ISO 9906 considera relevantes para determinar si el agua de la reserva es adecuada para realizar el ensayo NPSH3.

### **E1.I Medición de la temperatura del agua almacenada en el tanque**

A pesar de que los sensores del caudalímetro cuentan con la capacidad para medir la temperatura del flujo de agua que correrá por el banco durante los ensayos de cavitación, también es necesario determinar su temperatura estando en reposo. Esto se realizará utilizando el termómetro infrarrojo EXTECH almacenado en la gaveta de utensilios del banco y siguiendo los siguientes pasos:

1. Encender el termómetro
2. Verificar que las unidades de medición se encuentren en °C.
3. Configurar la emisividad a 0.94, según lo indica el manual de EXTECH, para realizar mediciones en recipientes de polímeros como el polietileno.
4. Realizar la medición de la temperatura apuntando hacia la pared del tanque, con una distancia aproximada de 25 cm:

$$T_{agua} = \underline{\hspace{10em}}$$

### **E1.II Medición y cálculo de las densidades del agua almacenada en el tanque**

Según la Organización Mundial de la Salud, la potabilidad de una muestra de agua se define según el conjunto características físicas, químicas y biológicas que puede presentar, ya sea en su estado natural o después de ser alterada por el accionar humano. Tres de los parámetros principales que sirven para determinar la calidad de una muestra de agua son la densidad, la densidad de partículas libres no disueltas y la densidad de partículas disueltas. Los tres conceptos se pueden definir de la siguiente manera:

- Densidad: Se define como la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.

- Densidad de partícula libres no disueltas: También conocida como densidad de SST (solidos suspendidos totales), considerando una muestra de cualquier fluido, se refiere a la relación entre la masa de los residuos sólidos que no se disuelven y el volumen de la muestra.
- Densidad de partículas disueltas También conocida como densidad de SDT (solidos disueltos totales), volviendo a tomar una muestra de cualquier fluido, se refiere a la relación entre la masa de los residuos sólidos que no se disuelven y el volumen de la muestra.

En el caso de esta práctica de laboratorio, se vuelve necesario medir estas tres variables en una muestra del agua de la reserva del tanque, pues se requiere comprobar si el ensayo NPSH3 se realizará con agua que cumpla con las magnitudes máximas permisibles del “agua fría limpia”, establecidas por la ISO 9906. Los procesos de medición de estas tres variables requerirán la siguiente instrumentación de laboratorio:

### **E1.II.I Medición y cálculo de las densidad del agua del tanque**

Para calcular la densidad del agua que se utilizará en el ensayo NPSH3 se deben seguir los siguientes pasos:

1. Utilizando la balanza de alta precisión, medir y registrar la masa de la probeta graduada:

$$m_{\text{probeta vacía}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

2. Tomar una muestra de agua del tanque de reserva del banco, introducir 100 ml en la probeta graduada y medir nuevamente su masa en la balanza de alta presión:

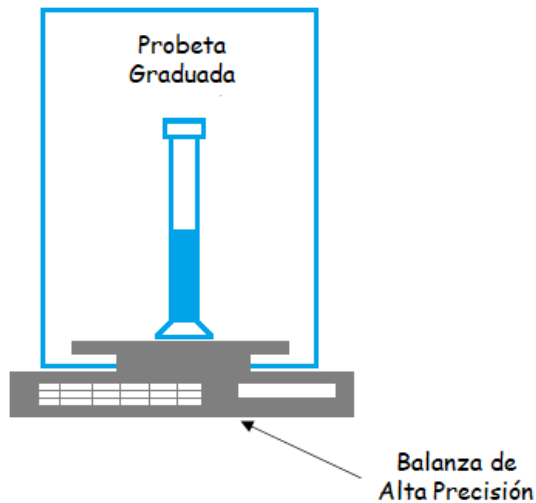


Figura II.1: Paso 2 de la medición y cálculo de la densidad de la muestra de agua

$$m_{\text{probeta con agua}} =$$

3. Calcular la masa del líquido aplicando la siguiente diferencia:

$$m_{\text{agua}} = m_{\text{probeta con agua}} - m_{\text{probeta vacía}}$$

$$m_{\text{agua}} =$$

4. Considerando los factores de conversión de unidades, calcular la densidad del agua con la siguiente ecuación:

$$\rho_{\text{agua}} = \frac{m_{\text{agua}}}{V_{\text{muestra de agua}}} * 1000 \text{ kg/m}^3$$

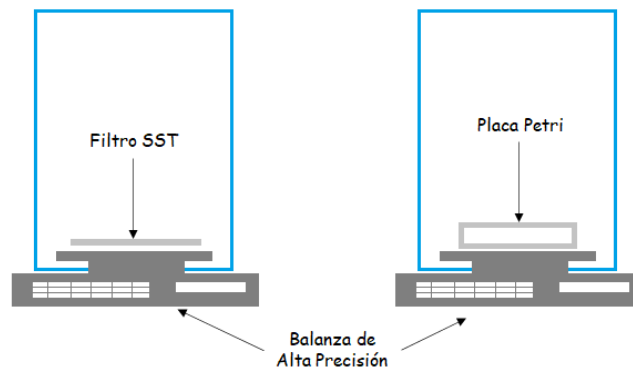
$$\rho_{\text{agua}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

5. Comparar la densidad resultante con la magnitud máxima permisible del “agua fría limpia” (tabla I); en caso de que sea mayor, se debe proceder a cambiar el agua del tanque de reserva por agua recién filtrada.

### E1.II.II Medición y cálculo de las densidades SST y SDT

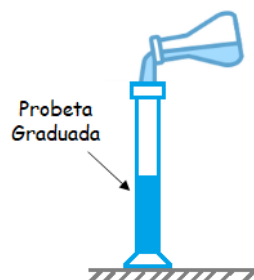
El proceso para determinar las densidades SST y SDT de una muestra de agua consiste básicamente de una filtración al vacío, la cual consiste en excitar el movimiento del fluido de la muestra exponiéndolo a presiones relativas negativas, hasta que traspase un filtro SST que retenga la mayor cantidad posible de partículas suspendidas. En nuestro caso, cabe destacar que este proceso se ha formulado a partir de una práctica de laboratorio impartida por la Universidad Politécnica de Valencia. Por lo tanto, la secuencia de pasos involucrados es la siguiente:

1. Utilizando la balanza de alta precisión, tomar registro de la masa inicial de filtro SST y de la placa Petri.



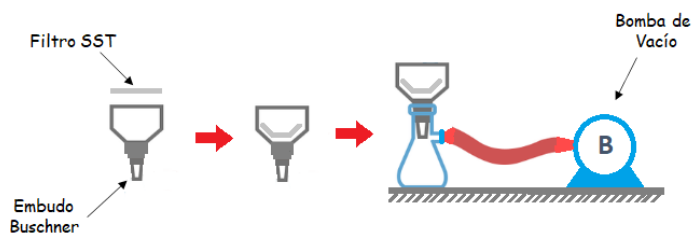
*Figura II.II: Paso 1 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

2. Tomar una muestra de agua del tanque de reserva e introducir 100 ml en la probeta graduada



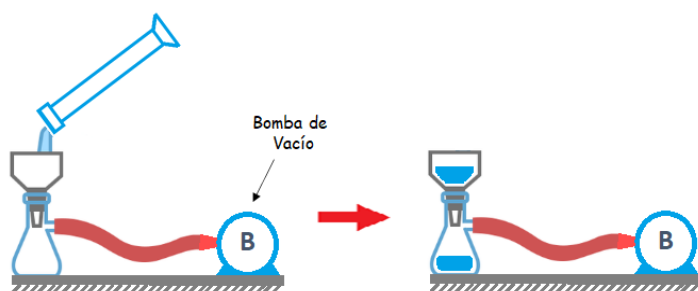
*Figura II.III: Paso 2 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

3. Introducir un filtro SST en el embudo buschner y acoplar el conjunto a la Matraz Kitasato, la cual debe estar conectada a la bomba de vacío.



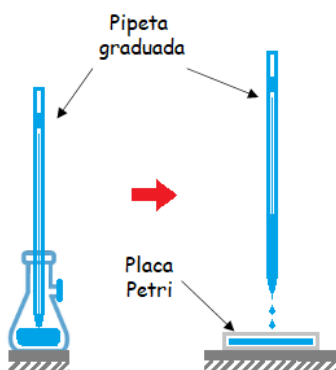
*Figura II.IV: Paso 3 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

4. Insertar los 100 ml de la probeta en el embudo procurando que el agua se concentre en el centro del filtro; luego activar la bomba para dar inicio al proceso de filtración al vacío.



*Figura II.V: Paso 4 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

5. Una vez se han filtrado por completo los 100 ml de la muestra, transportar 20 ml del matraz a la placa Petri utilizando la pipeta graduada.



*Figura II.VI: Paso 5 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT*

- Extraer el filtro SST del embudo buschner e introducirlo junto con la placa Petri en el horno de cocina. Dejarlos reposar durante una hora a  $105^{\circ}\text{C}$  para evaporar por completo el agua contenida en ambas muestras

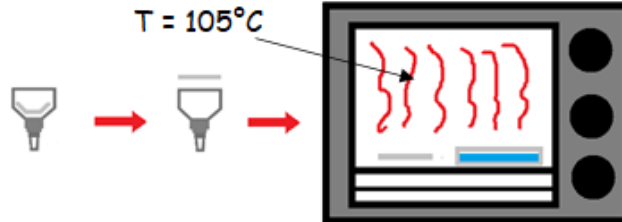


Figura II.VII: Paso 6 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT

- Después de una hora en el horno y asegurando que el agua se ha evaporado en ambas muestras, los residuos que se encontraban suspendidos en la muestra inicial de la probeta se encontrarán reposando sobre el filtro; asimismo, de manera similar sucede con los sólidos que estaban disueltos en la muestra de 20 ml que se insertó en la placa Petri. Por lo tanto, se debe volver a tomar registro de las nuevas masas del filtro SST y la placa Petri en la balanza de alta precisión:

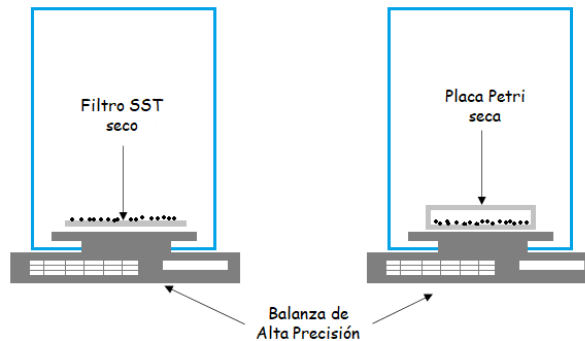


Figura II.VIII: Paso 7 del proceso de determinación de densidades SST Y SDT

- Considerando los factores de conversión  $\left(\frac{g}{ml} \rightarrow \frac{kg}{m^3}\right)$ , las densidades SST y SDT se calcularán con los registros de las masas y los volúmenes de las muestras, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\rho_{SST} = \frac{m_{\text{filtro } F} - m_{\text{filtro } i}}{V_P} * 1000 \frac{kg}{m^3} =$$

$$\rho_{SDT} = \frac{m_{\text{Petri } F} - m_{\text{Petri } i}}{V_M} * 1000 \frac{kg}{m^3} =$$

Donde:

- $\rho_{SST}$ : Densidad de solidos suspendidos totales
- $m_{\text{filtro } F}$ : Masa final del filtro SST
- $m_{\text{filtro } i}$ : Masa inicial del filtro SST
- $V_P$ : Volumen de agua en la probeta graduada
- $\rho_{SDT}$ : Densidad de solidos disueltos totales
- $m_{\text{Petri } F}$ : Masa final de la placa Petri
- $m_{\text{Petri } i}$ : Masa inicial de la placa Petri
- $V_M$ : Volumen de muestra extraída del matraz después de la filtración al vacío (20 ml)

Las densidades resultantes de este proceso deben ser menores que las magnitudes máximas especificadas en la tabla II.I. En caso de ser mayores, se debe proceder al cambio de agua, en la red de tuberías y el tanque de reserva, por agua potable adecuada para el consumo humano; puesto que según la fundación AQUAE y la OMS, ésta debería presentar densidades SST que rondan por los valores de  $0.3 \frac{kg}{m^3}$  a  $0.3 \frac{kg}{m^3}$ . De esta manera se garantizará que el agua utilizada durante la prueba NPSH3 cumplirá con los estándares establecidos por la ISO 9906.

### E1.III Medición y cálculo de la Viscosidad Cinemática del agua del tanque

Para llevar a cabo el cálculo de la viscosidad cinemática del agua, primero se debe determinar la viscosidad dinámica realizando una prueba de velocidad descenso con el agua del tanque. La prueba de descenso involucra los siguientes pasos:

1. Utilizando el calibrador vernier, medir el diámetro de la esfera:

$$D_{esfera} = \text{_____}$$

2. Utilizando la balanza de alta precisión, medir la masa de la esfera:

$$m_{esfera} = \text{_____}$$

3. Calcular el volumen y la densidad de la esfera

$$V_{esfera} = \frac{\pi}{6} D_{esfera}^3 =$$

$$\rho_{esfera} = \frac{m_{esfera}}{V_{esfera}} =$$

4. El tubo de PVC que se utilizará durante la prueba de descenso tiene una longitud de 1.50 m. Por lo tanto, utilizando el sistema de drenaje del banco, llenar el tubo con agua del tanque hasta el límite de su nivel.

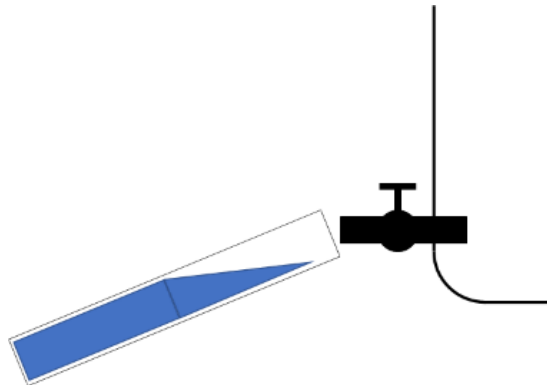


Figura II.IX: Llenado del tubo de PVC

5. Posicionar verticalmente el tubo lleno de agua, introducir la esfera en el extremo abierto y cronometrar el tiempo que tarda en caer libremente a través del tubo, hasta llegar a la tapadera del extremo cerrado.

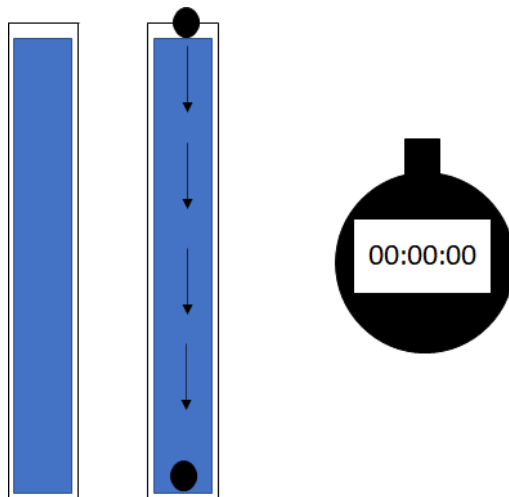


Figura II.X: Cronometraje del tiempo de caída de la canica.

6. Regresar el agua almacenada del tubo al tanque de reserva para extraer la esfera.
7. Tomando en cuenta que el recorrido de la caída es de  $L = 1.50 \text{ m}$  y que la velocidad es la relación entre la distancia y el tiempo ( $v_{caida} = \frac{L}{T}$ ), repetir este proceso 5 veces para calcular y calcular una velocidad de caída promedio:

Tabla II.II: Registros de velocidades de caída de la canica

No. Intento	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
1		
2		
3		
4		
5		
Promedio (m/s)		

8. Recordando que en la sección E1.II.I se calculó la densidad del agua del tanque, calcular la viscosidad dinámica aplicando la siguiente ecuación, indicada por la institución estadounidense Heatxperts, especializada en mantenimiento de calderas:

$$\mu = \frac{2(\rho_{agua} - \rho_{esfera}) * g * r_{esfera}^2}{9 * v_{prom}}$$

Donde:

- ❖  $v_{prom}$ : velocidad promedio de descenso
- ❖  $g$ : gravedad, con un valor de  $9.81 \text{ m/s}^2$
- ❖  $r_{esfera}$ : radio de la esfera

Por lo tanto:

$$\mu = \underline{\hspace{10em}}$$

9. Con la viscosidad dinámica, se procede a determinar la viscosidad cinemática con la siguiente ecuación:

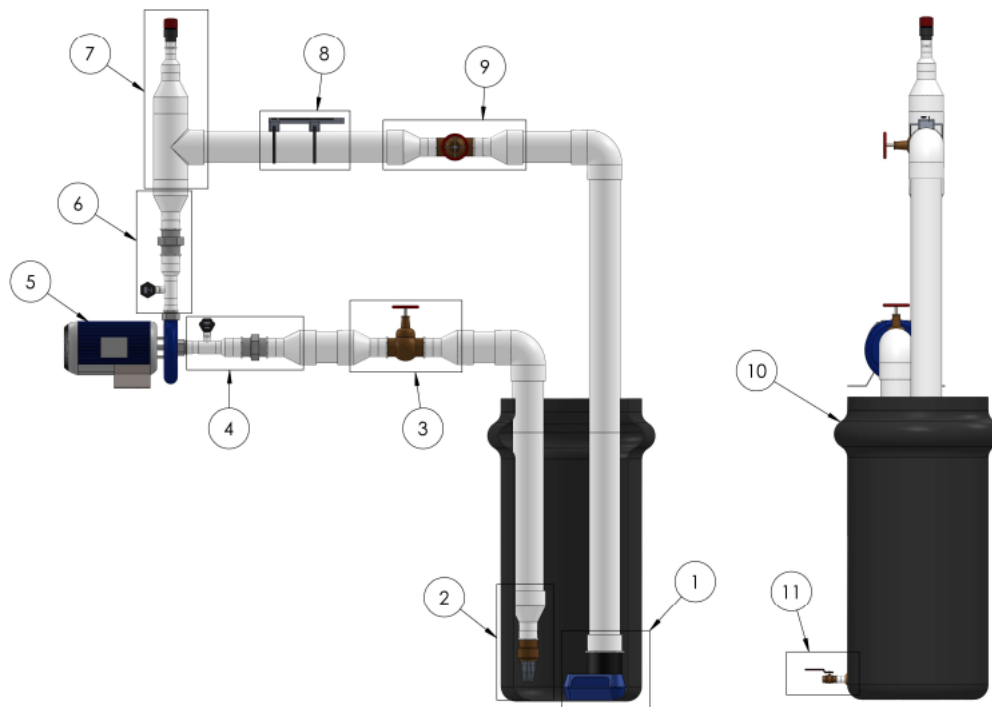
$$v = \frac{\mu}{\rho_{agua}} =$$

$$v = \underline{\hspace{10em}}$$

10. De manera similar a las densidades, si la viscosidad cinemática es mayor que la magnitud máxima permisible por la ISO 9906 ( $v_{max} = 1.75 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ ), se debe proceder a cambiar el agua de tanque por agua potable para el consumo humano.

## Etapa 2: Ensayo NPSH3

Tal y como se explicó en la sección I.I de esta guía, el NPSH3 cumple con las funciones del NPSHr y, según lo que indica la ISO 9906, corresponde con las condiciones de operación donde la altura neta H de la bomba experimenta un decremento del 3% por la presencia de cavitación. Por lo tanto, antes de entrar en detalle la secuencia de pasos del ensayo NPSH3, es necesario presentar instalaciones del banco de ensayos que se utilizará para llevarlo a cabo:



*Figura II.XI: Instalaciones del banco de ensayos para pruebas de cavitación*

Donde:

1. Instalación del reductor de turbulencias
2. Instalación de la válvula de Pie
3. Instalación de la válvula reguladora V1 (Red de succión)
4. Instalación del vacuómetro: medidor de presiones relativas negativas
5. Bomba centrífuga
6. Instalación del manómetro: medidor de presiones relativas positivas

7. Instalación de la válvula desairadora
8. Instalación de los sensores del caudalímetro
9. Instalación de la válvula reguladora V2 (red de impulsión)
10. Tanque de reserva
11. Instalación de drenaje del tanque

Tomando en cuenta el funcionamiento del banco, la ISO 9906 establece que se deben tomar 5 puntos de observación para monitorear las condiciones de operación con cavitación para poder graficar la curva NPSH3 vs Q; cada uno de estos puntos se definirá en según el caudal inicial que será disminuido por el aumento de las pérdidas energéticas en el banco. Por lo tanto, los resultados que deberían obtenerse después del ensayo NPSH3 se muestran en las gráficas de la figura II.XII:

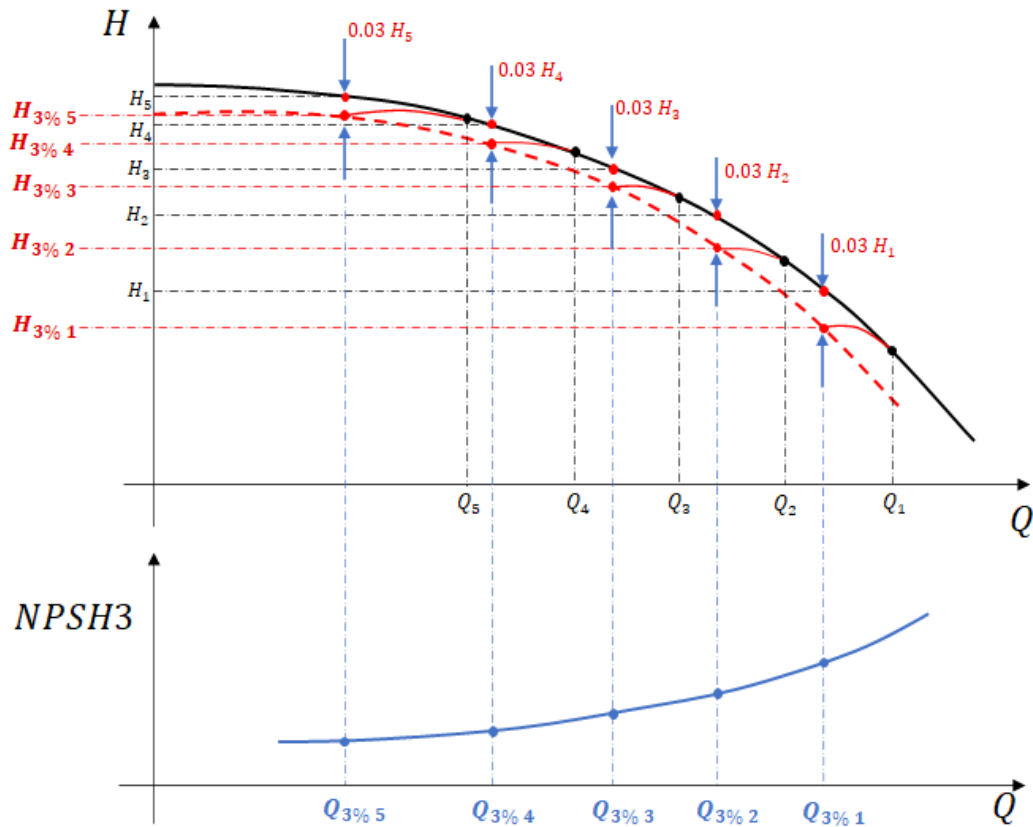


Figura II.XII: Gráfica NPSH3 vs Q resultante del ensayo NPSH3

Es necesario explicar los términos presentados en la figura III.II para detallar lo que se llevará a cabo durante los ensayos; denominando con “n” al número del punto de observación, las variables de la gráfica anterior representan lo siguiente

- La curva característica de la bomba se representa con la línea continua de color negro.
- La curva característica con el decremento del 3% se marca con la línea discontinua roja.
- La curva NPSH3 vs Q se marca con la línea continua azul.
- $Q_n$ : Caudal inicial del punto de observación.
- $Q_{3\%n}$ : Caudal al cual ocurre el decremento del 3% en la altura neta.
- $H_n$ : Altura neta de la bomba cuando opera con el caudal  $Q_{3\%n}$  sin cavitación
- $H_{3\%n}$ : Altura neta de la bomba bajo condiciones de cavitación; difiere con  $H_n$  en un porcentaje de 3%
- $0.03 H_n$ : Diferencia entre  $H_n$  y  $H_{3\%n}$ ; señalizada en la figura II.XII con las flechas de color azul.

Considerando el modelo del banco en la figura II.XI y los esquemas de la figura II.XII, para cada punto de observación el caudal inicial  $Q_n$  será estrangulado, cerrando las válvulas reguladoras, hasta alcanzar el caudal  $Q_{3\%n}$ , con el cual la bomba opera bajo condiciones de cavitación y presenta la altura útil  $H_{3\%n}$ . Si la bomba operase sin cavitación con el caudal  $Q_{3\%n}$ , la altura neta que presentaría sería la de  $H_n$ ; sin embargo, la presencia de cavitación provoca el decremento que equivale al 3% de  $H_n$ . Entonces, el criterio para determinar que la cavitación estará presente en la entrada de la bomba, para un caudal específico, consiste en confirmar que la altura neta resultante del estrangulamiento difiera en un 3% del valor del valor que debería presentar, si la bomba estuviese operando con el mismo caudal en condiciones libres de cavitación. Es importante aclarar que durante los procesos de diseño se estimó

que el banco puede operar en condiciones libres de cavitación con caudales que varíen entre 40 y 100 GPM.

Cabe destacar que este ensayo se debe realizar con el apoyo de la aplicación “NPSH3 APP”, la cual se ha desarrollado para asistir a los laboratoristas al momento de determinar las alturas netas previas al decremento del 3%; por lo tanto, el ensayo NPSH3 se dividirá en las siguientes fases:

1. Inspección del estado de las instalaciones del banco de pruebas.
2. Medición de presiones de entrada y salida de la bomba para el ploteo de la curva característica de la bomba ensayada.
3. Monitoreo de las variables involucradas el cálculo y ploteo de la curva NPSH3 vs Q.
4. Preguntas teóricas

#### **E2.I FASE NO. 1: inspección del estado de las instalaciones del banco de pruebas**

Antes de iniciar el ensayo NPSH3, se deben tomar ciertas medidas para garantizar el funcionamiento correcto del banco de pruebas y obtener datos confiables; por lo cual, se deben verificar los siguientes lineamientos:

- El sistema eléctrico del banco de pruebas se ha diseñado para poder ensayar bombas centrífugas de hasta 7.5 hp de potencia nominal. Por lo tanto, se debe confirmar en la placa de la bomba ensayada que su potencia nominal no exceda esta magnitud.
- En la tabla II.III se presentan enlistados los distintos componentes del sistema eléctrico del banco y en la figura II.XIII se muestra un esquema del circuito integrado del tablero:

*Tabla II.III: Protecciones del tablero trifásico.*

<b>Componentes del Sistema eléctrico</b>	
N°	Componente
1	Protección termomagnética trifásica 0.5 Hp
2	Protección termomagnética trifásica 2 Hp

3	Protección termomagnética trifásica 4 Hp
4	Protección termomagnética trifásica 6 Hp
5	Protección termomagnética trifásica 7.5 Hp
6	Protección Monofásica 3A
7	Contacto normalmente Abierto (stop)
8	Contacto normalmente cerrado (start)
9	Contactador
10	Bornera

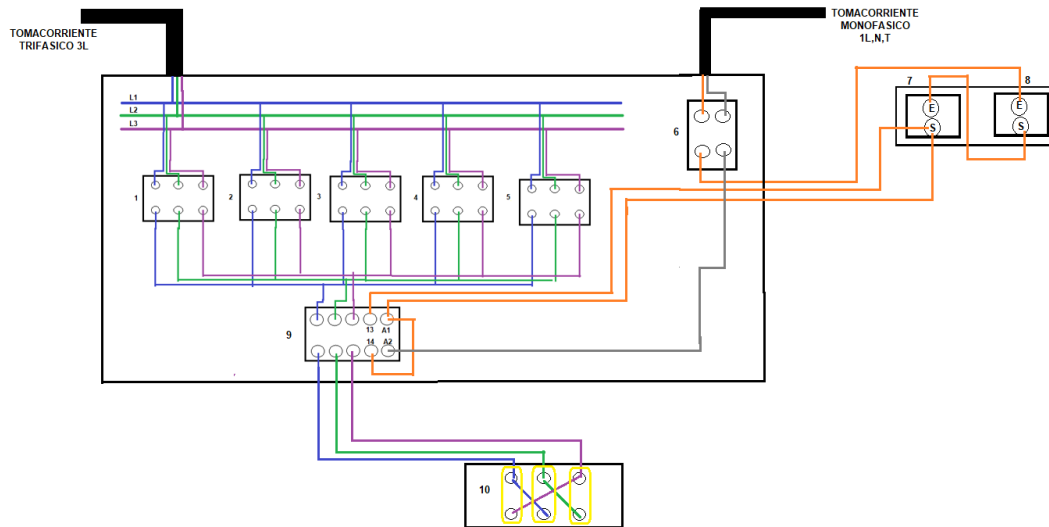


Figura II.XIII: Figura 2.51: Circuito integrado del tablero trifásico del banco.

Ya que en el tablero los componentes se encuentran señalizados con el número que se les ha asignado en la tabla II.III y luces led para confirmar su activación, se debe verificar lo siguiente:

- ❖ La protección monofásica de 3A (No. 6) debe encontrarse activada, para permitir el paso de corriente hacia el circuito de START/STOP y dar inicio a la operación de la bomba ensayada.
- ❖ El contactador trifásico (No. 9) debe encontrarse activado para permitir el paso de corriente hacia el motor de la bomba.
- ❖ El objetivo de conectar las protecciones termomagnéticas en paralelo consiste en mantener activada solamente la que corresponda con la potencia nominal de la bomba ensayada para garantizar el buen estado de las conexiones del sistema

eléctrico, ya sea durante el inicio de la operación del motor de la bomba o cuando se presenten sobrecargas; por lo cual, se debe verificar que la protección activada debe ser la correspondiente con la potencia nominal del motor.

- En cuanto al caudalímetro, se debe verificar lo siguiente:
  - ❖ Los sensores deben estar sujetos a la tubería correctamente, es decir, sin presentar juego y separados con la distancia indicada por la unidad de mando portátil.
  - ❖ En la unidad de mando portátil, se deben configurar correctamente las especificaciones de la tubería del banco en donde se encuentran instalados los sensores; entre los datos principales que se deben verificar se encuentran el diámetro externo, el espesor y el material de la tubería.
- Verificar que las instalaciones de la red de tuberías no tengan fugas; en caso de presentarse este inconveniente, avisar al personal encargado del mantenimiento del equipo.
- Confirmar que las válvulas reguladoras se encuentren completamente abiertas antes de iniciar los tiempos de operación de la bomba.

## **E2.II FASE NO.2: Ploteo de la curva característica de la bomba ensayada**

Para realizar el ploteo de la curva característica de la bomba ensayada se requerirá del apoyo de la aplicación NPSH3 en la PC portátil, además de realizar la siguiente secuencia de pasos:

1. Iniciar la aplicación NPSH3 e ingresar la información solicitada sobre los datos de los integrantes del grupo que realizarán el ensayo y la bomba que se ensayará.

- Utilizando el barómetro digital y el termómetro infrarrojo, medir de la temperatura del agua en el tanque de reserva y la presión atmosférica en el local; tomar registro de ambas magnitudes:

$$T_{agua} = \underline{\hspace{2cm}} \quad P_{atm} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- Utilizando la aplicación NPSH3, ingresar el dato de la densidad del agua del tanque, calculado durante la etapa E1.II.I, el dato de la temperatura del agua en el tanque y la presión atmosférica; de esta manera la aplicación NPSH3 tendrá los datos necesarios para poder realizar los cálculos de la curva característica de la bomba y el NPSH3. Tomar nota del dato de presión atmosférica indicado por la aplicación:

$$P_{vapor} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- Tanto en la red de impulsión como en la de succión se ha instalado el mismo modelo de válvula de globo, por lo tanto, antes de iniciar la operación de la bomba, contar el número de vueltas las manecillas de dichas válvulas para completar su recorrido de abertura.

$$N^{\circ} vueltas = \underline{\hspace{2cm}}$$

- Aplicando la siguiente fórmula, calcular los grados de giro que disminuirán la abertura de la válvula en un 5%:

$$^{\circ} Giro = 0.05 * N^{\circ} vueltas * 360^{\circ}$$

$$^{\circ} Giro = \underline{\hspace{2cm}}$$

- Iniciar la operación de la bomba con las válvulas reguladoras completamente abiertas
- Tomando en cuenta la densidad del agua que se calculó en la II.II.I, realizar las lecturas de presión, tanto en la entrada como en la salida de la bomba, y aplicar los principios de Bernoulli entre ambas ubicaciones para calcular la altura neta:

$$H = \frac{P_S - P_E}{\rho_{agua} * g} =$$

$$H = \underline{\hspace{2cm}}$$

Donde

- ❖  $H$ : Altura neta de la bomba
- ❖  $P_S$ : Presión en la salida de la bomba
- ❖  $P_E$ : Presión en la entrada de la bomba
- ❖  $\rho_{agua}$ : Densidad del agua del tanque de reserva
- ❖  $g$ : Gravedad ( $g = 9.81m/s^2$ )

Utilizando la aplicación NPSH3 app, repetir el procedimiento, según lo indique la aplicación, disminuyendo la abertura de la válvula V2 de la red de impulsión en un porcentaje del 5% por cada medición. Registrar los valores de altura neta correspondiente para cada caudal dentro de la aplicación NPSH3 y en la tabla II.IV:

*Tabla II.IV: Datos de altura neta para la curva característica de la bomba ensayada*

<b>Curva característica de la bomba</b>		
<b>% de ab. de V2</b>	<b>Caudal (GPM)</b>	<b>H neta (m)</b>
100 %		
95 %		
90 %		
85 %		
80 %		
75 %		
70 %		
65 %		
60 %		
55 %		
50 %		
45 %		
40 %		
35 %		
30 %		
25 %		

8. Plotear la curva característica de la bomba utilizando la aplicación NPSH3 app.



Figura II.IV: Curva característica de la bomba ensayada

### E2.III FASE NO.3: Cálculo de las magnitudes de NPSH3

En base a las indicaciones de la ISO 9906, para calcular las distintas magnitudes del NPSH3, se debe llevar a cabo la siguiente secuencia de pasos:

1. Establecer 5 puntos de observación, distinguiéndolos por los por los caudales iniciales que serán estrangulados con la válvula V1 en la tubería de succión. Estos caudales se obtienen seleccionando 5 rangos de apertura de la válvula V2 y deben poseer magnitudes que varíen entre 50 y 100 GPM, puesto que el caudal que corresponda al decremento del 3% de la altura neta no debe ser menor de 40 GPM. Para facilitar esta selección, se debe tomar como referencia los caudales resultantes y porcentajes de abertura que se registraron en la tabla II.V:

Tabla II.V: Caudales iniciales de los puntos de observación

Caudales iniciales de los puntos de observación					
P. de O.	1	2	3	4	5
%Apertura V2					
Q inicial (GPM)					

2. En el banco de pruebas, ajustar la válvula V2 al porcentaje de abertura del P.O. #1. Comprobar que el caudal inicial indicado por el caudalímetro coincida con el que se ha registrado en la tabla II.V y seleccionarlo en la aplicación NPSH3, para que ésta lo tome como referencia para los cálculos de NPSH3, en la opción



*Figura II.XV: Selección del caudal inicial del P.O.#1 en la aplicación NPSH3*

3. Proceder el estrangulamiento del flujo disminuyendo la abertura de la válvula V1, en la tubería de succión; tomar mediciones de las presiones de entrada y salida de la bomba cada vez que la abertura de dicha válvula se disminuya en un 5% y registrarlas en la aplicación NPSH3, para calcular los valores de la altura neta H.

Básicamente, los valores de altura neta que se registraron en la sección III.II de la fase 2 del ensayo NPSH3, se pueden clasificar como valores teóricos, puesto que éstos se presentaron bajo condiciones libres de cavitación; sin embargo, en el caso de este proceso de estrangulación, se les denominará como valores experimentales, ya que se están registrando en condiciones de operación donde las pérdidas energéticas se están aumentando gradualmente, hasta provocar la cavitación en la entrada de la bomba ensayada.

Por lo tanto, la aplicación realizará los cálculos necesarios para determinar el caudal donde la altura neta experimental se diferencie en un 3% de la teórica. Por lo cual, la aplicación muestra la tabla de interfaz con el usuario que se muestra en la figura II.XVI, para realizar dichos cálculos:

% Ap. Vs	Caudal	H teórico (m)	PE (kPa)	PS (kPa)	H neta exp. (m)	ΔH %
100.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
95.00	0	0.000	0	0	0.000	0.000

Figura II.XVI: Cálculo de diferencia porcentual de alturas netas, en aplicación NPSH3

Donde:

- % Ap. Vs: Se refiere al porcentaje de abertura de la válvula V1, es decir, la válvula reguladora en la tubería de succión.
- Caudal: Es el caudal que se registra después de ajustar la válvula V1 al porcentaje de abertura indicado (estrangulamiento)
- $H_{teórico}$ : Altura neta calculada para condiciones libre de cavitación (sección III.II/Fase 2)
- $P_E$ : Presión en la entrada de la bomba
- $P_S$ : Presión en la salida de la bomba
- $H_{neta\ exp.}$ : Altura neta calculada después del estrangulamiento
- $\Delta H$ : Diferencia porcentual entre la altura neta teórica y la experimental.

Por consiguiente, después de cada estrangulamiento, se deben registrar los valores de caudal, presión de entrada y presión de salida en la aplicación, para que ésta desarrolle los cálculos necesarios para determinar el caudal con el cual la bomba ensayada presenta decremento del 3% en su altura neta.

4. Repetir los pasos 2 y 3 con los puntos de observación restantes; por cada P.O. registrar en la tabla III.IV los datos de  $P_E$ ,  $P_S$  y  $H_{neta\ exp.}$  para el caudal que presente el 3% del decremento en la altura neta, ya que con estos valores se procederá al cálculo del NPSH3:

Tabla II.VI: Datos experimentales para el cálculo del NPSH3

Datos experimentales para el cálculo del NPSH3				
P.O.	Caudal 3% (GPM)	$P_E$ (kPa)	$P_S$ (kPa)	$H_{neta\ exp.}$ (m)
1				
2				
3				
4				
5				

5. En base a los valores de la Tabla III.IV, calcular el NPSH3 de cada caudal 3%, desarrollando la ecuación 1, utilizando las presiones en la entrada y la presión de vapor que se registró al principio de la sección III.II:

$$NPSH_d = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

6. Registrar los valores de NPSH3 en la tabla III.V y graficar la curva NPSH3 vs Q, en la figura III.VII:

Tabla II.VII: datos de NPSH3

Datos de NPSH3		
P.O.	Caudal 3% (GPM)	NPSH3 (m)
1		
2		
3		
4		
5		



Figura II.VII: curva NPSH3 vs Q





Estudiantes

Rodrigo Fernando López Pérez

Eliseo Andrés Sánchez Blanco

Juan Francisco Torrez Meléndez

Datos

Bomba

Franklin Electric AG 7.5 HP

Densidad (kg/m<sup>3</sup>)

1050

Temperatura (C)

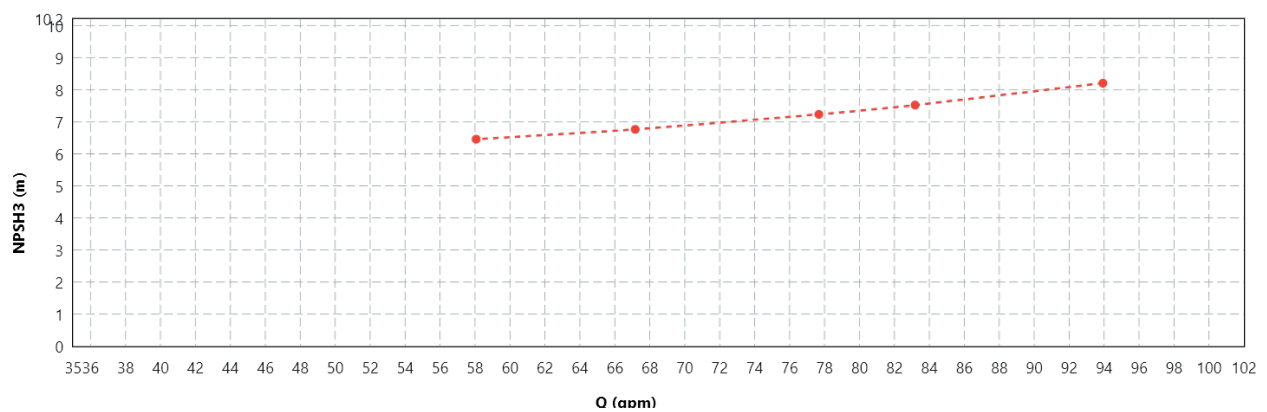
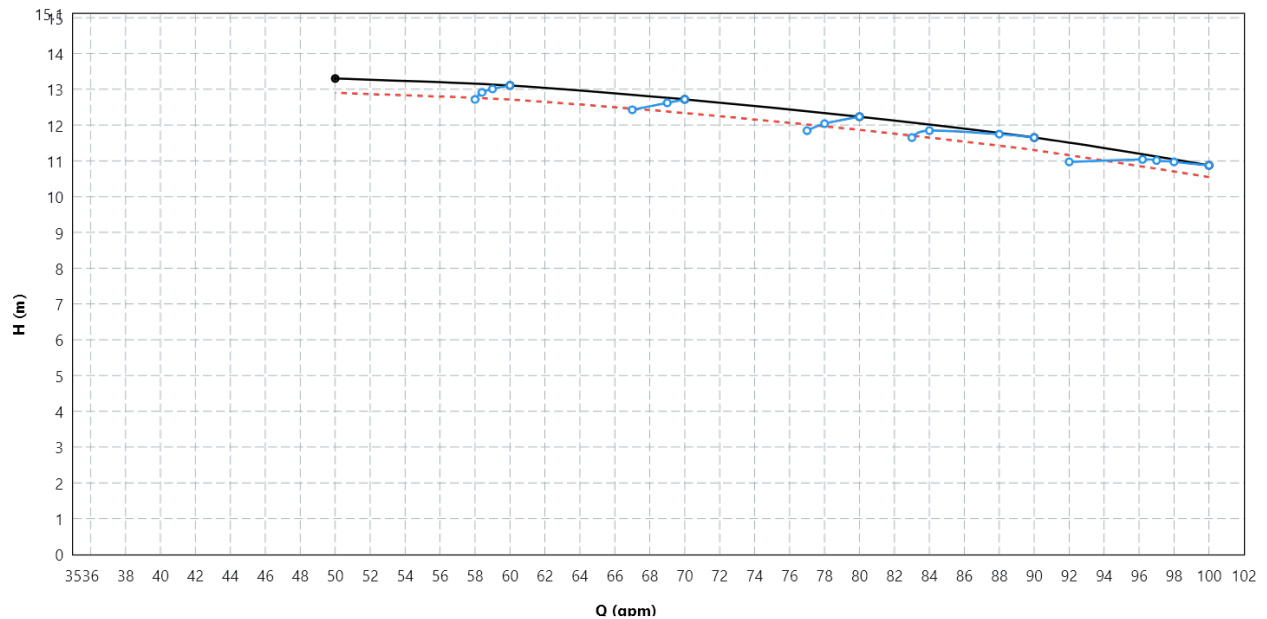
25.0

Presión de Vapor (kPa)

3.1733605306948474

Presión atmosférica (kPa)

101.0



## Curva NPSH3 vs Q

### Puntos de observación

% Ap. Vi	Caudal	PE (kPa)	PS (kPa)	H neta (m)
100.00	100.00	12.00	100.00	10.87
95.00	90.00	20.00	100.00	11.65
90.00	80.00	26.00	100.00	12.23
85.00	70.00	31.00	100.00	12.72
80.00	60.00	35.00	100.00	13.11
75.00	50.00	37.00	100.00	13.30

### Punto de observación 1

% Ap. Vs	Caudal (gpm)	H teórico (m)	PE (kPa)	PS (kPa)	H neta exp. (m)	Delta H (%)
100.00	100.00	10.87	12.00	100.00	10.87	0.00
95.00	98.00	11.03	13.00	100.00	10.97	0.53
90.00	97.00	11.11	13.40	100.00	11.01	0.87
85.00	96.20	11.17	13.70	100.00	11.04	1.16
80.00	92.00	11.49	13.00	100.00	10.97	4.56

### Punto de observación 2

% Ap. Vs	Caudal (gpm)	H teórico (m)	PE (kPa)	PS (kPa)	H neta exp. (m)	Delta H (%)
100.00	90.00	11.65	20.00	100.00	11.65	0.00
95.00	88.00	11.77	21.00	100.00	11.75	0.17
90.00	84.00	12.00	22.00	100.00	11.84	1.29
85.00	83.00	12.06	20.00	100.00	11.65	3.38

### Punto de observación 3

% Ap. Vs	Caudal (gpm)	H teórico (m)	PE (kPa)	PS (kPa)	H neta exp. (m)	Delta H (%)
100.00	80.00	12.23	26.00	100.00	12.23	0.00
95.00	78.00	12.33	24.00	100.00	12.04	2.36
90.00	77.00	12.38	22.00	100.00	11.84	4.31

*Punto de observación 4*

<i>% Ap. Vs</i>	<i>Caudal (gpm)</i>	<i>H teorico (m)</i>	<i>PE (kPa)</i>	<i>PS (kPa)</i>	<i>H neta exp. (m)</i>	<i>Delta H (%)</i>
100.00	70.00	12.72	31.00	100.00	12.72	0.00
95.00	69.00	12.76	30.00	100.00	12.62	1.07
90.00	67.00	12.83	28.00	100.00	12.43	3.18

*Punto de observación 5*

<i>% Ap. Vs</i>	<i>Caudal (gpm)</i>	<i>H teorico (m)</i>	<i>PE (kPa)</i>	<i>PS (kPa)</i>	<i>H neta exp. (m)</i>	<i>Delta H (%)</i>
100.00	60.00	13.11	35.00	100.00	13.11	0.00
95.00	59.00	13.13	34.00	100.00	13.01	0.89
90.00	58.40	13.14	33.00	100.00	12.91	1.71
85.00	58.00	13.14	31.00	100.00	12.72	3.25

## **ANEXO II: Plan de mantenimiento**

### **All.I Metodología a aplicar**

Para el diseño del banco de ensayos se ha propuesto un plan de mantenimiento preventivo basado en la metodología del Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF), en donde se han tomado en cuenta todos los sistemas que lo componen el prototipo (Miño Ormazá, 2015).

#### **All.I.I Análisis de modos y efectos de falla**

El AMEF es un método de análisis que ayuda a encontrar los modos en los que se puede presentar una falla dentro de un sistema/equipo; asimismo, permite determinar los efectos de éstas en los procesos operativos, medio ambiente y seguridad. Esta metodología sigue el siguiente orden lógico (Miño Ormazá, 2015):

1. Inicialmente, se determina el nivel de análisis al cual se aplicará el AMEF al equipo o sistema.
2. Posteriormente se procede a determinar las funciones primarias y secundarias del sistema o equipo que se esté analizando.
3. Luego se determinan las fallas funcionales en base a las funciones encontradas en el paso anterior.
4. Después se determinan las causas de las fallas funcionales, que son conocidas como “modos de falla” y se describen los efectos que implican.
5. Finalmente, se establecen las tareas de mantenimiento, junto con su frecuencia, para prevenir la presencia de los modos de falla.

### **All.I.II Medidas preventivas de mantenimiento**

Una vez determinados los modos de falla de cada uno de los equipos, sistemas o elementos que componen el equipo que se analiza, el siguiente paso es determinar las medidas preventivas que permiten evitar el fallo o minimizar sus efectos. Las medidas preventivas que se pueden tomar son de tres tipos:

1. Tareas de mantenimiento
2. Mejoras de la instalación
3. Cambios en los procedimientos de operación.

Para efectos prácticos, nuestro plan de mantenimiento se basará en medidas preventivas de tipo 1, es decir, se establecerán el mayor número de tareas de mantenimiento con su respectiva periodicidad (Miño Ormaza, 2015).

### **All.I.III Tareas de mantenimiento**

Son los trabajos de mantenimiento que se ejecutan con el fin de evitar el fallo de un equipo o minimizar sus efectos. De manera general, las tareas de mantenimiento se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Inspecciones visuales.
- Lubricación.
- Limpiezas técnicas.
- Ajustes mecánicos.
- Cambio de piezas.
- Análisis predictivo de parámetros: Termografía, Ultrasonido, análisis de vibraciones, etc.

#### **All.I.IV Metodología AMEF aplicada al prototipo del banco de ensayos para pruebas de cavitación**

En la sección All.I.I se menciona que el AMEF se desarrolla en 5 etapas para elaborar un plan de mantenimiento (García Guiné, 2011); la primera etapa consiste en establecer el nivel de análisis que se aplicará al equipo en cuestión, en este caso, la metodología se aplicará al banco de ensayos de manera general; por lo cual, se ha optado por analizar 3 sistemas que componen al prototipo:

##### **A. Sistema hidráulico**

La función principal del sistema hidráulico es impulsar el caudal por la red de tuberías, permitiendo la regulación del caudal por medio de las válvulas y la toma de datos a través de la instrumentación instalada:

Este sistema cuenta con los siguientes elementos:

- Bomba Centrífuga
- Válvulas de globo
- Caudalímetro
- Manómetro y Vacuómetro
- Válvula de pie
- Válvula desairadora
- Reductor de turbulencias
- Tanque de Reserva
- Sistema de tuberías
- Filtro de abastecimiento de agua

##### **B. Sistema estructural**

La función principal del sistema estructural es proveer soporte y estabilidad para los distintos componentes que conforman el banco de ensayos.

El sistema estructural está conformado por los siguientes elementos:

- Elementos estructurales: para los cuales se han seleccionado tubos estructurales de sección cuadrada de material ASTM A500 Grado A y láminas de acero A36 de chapa 16 (espesor de 1.5 mm).

- Sujeciones: Se han realizado utilizando soldadura SMAW con electrodo de uso convencional AWS-E6013 y pernos de diversas medidas para el ajuste de los soportes de las tuberías.
- Rodos industriales, con diámetro de 75 mm y 100 kg de capacidad.

### **C. Sistema eléctrico**

El sistema eléctrico es el encargado de energizar el banco de ensayo, por medio de una alimentación eléctrica proveniente de un tomacorriente trifásico de 220 V. Además, cuenta con un circuito monofásico a 110 V que se utilizará para controlar la operación de la bomba, utilizando una botonera; asimismo, este mismo circuito sirve para energizar equipos auxiliares que se utilizarán durante los ensayos de cavitación. El sistema eléctrico es muy importante debido a que protege el motor de la bomba de una sobre corriente, brindando mayor vida útil a los componentes eléctricos, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Protecciones termomagnéticas.
- Contactor
- Botonera
- Tomacorriente de alimentación a 220 V.
- Tomacorriente doble a 110 V

Tomando en cuenta los componentes de los sistemas descritos anteriormente, las etapas 2, 3 y 4 del AMEF (sección AII.1.1) aplicado al banco de pruebas se desarrollan en las tablas AII.1, AII.2 y AII.3. Posteriormente, la etapa 5, donde se establecen las tareas de mantenimiento, se presenta entre las tablas AII.4 y AII.5, donde se identifican por un correlativo asociado con la función del elemento en cuestión, su falla funcional y el modo de falla que pueda presentar (García Guiné, 2011).

Tabla AII.1: AMEF Sistema hidráulico

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA							
SISTEMA: SISTEMA HIDRÁULICO							
ELEMENTO	FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA	
Bomba Centrífuga	1	Impulsar el caudal de agua por la red de tuberías	A	Incapacidad de mantener caudal requerido	1	Fallo de acople del rotor con impulsor	Fluctuación en el caudal de agua
					2	Obstrucción en la entrada	Comportamiento inesperado en el flujo
					3	Rodamientos muy desgastados	Disminución en el rendimiento/parada del motor
					4	Desalineación del motor	Vibraciones anormales
					5	Desbalanceo en el rotor	Falla catastrófica del motor
					6	Obstrucción en el ventilador del motor	Sobrecalentamiento del motor
					7	Ejes deformados o desgastados	Falla completa del motor
					8	Fallo de conexión eléctrica	Paro del flujo
					9	Insuficiente lubricación del motor	Parada del motor por sobrecalentamiento
			B	Fugas de agua	1	Sellos desgastados	Pérdida de eficiencia del sistema
					2	Acoples desajustados	Daño a componentes eléctricos por contacto con agua
Válvulas de globo	2	Regular el caudal en el sistema	A	Fugas de agua	1	Sellos en mal estado	Ineficiencia en la recirculación
			B	Incapacidad de detener el flujo	1	Asiento bloqueado o en mal estado	Imposibilidad de controlar el flujo
Caudalímetro	3	Medir el caudal	A	Medición incorrecta o fluctuaciones en la medición	1	Sensores desplazados de su posición original	Datos inexactos para análisis
					2	Parametrización incorrecta	Datos inexactos para el análisis
			B	No hay medición	1	Baterías agotadas	Imposibilidad de obtener datos

Manómetro y Vacuómetro	4	Medir presión	A	Medición incorrecta	1	Manómetro/Vacuómetro dañado	Datos inexactos para análisis
				No hay medición	2	Baterías agotadas	Imposibilidad de obtener datos
Válvula de pie	5	Mantiene el cebado de la bomba y evita vacíos en la tubería de succión	A	Incapacidad para mantener el cebado de la bomba y la tubería de succión	1	Falla en el mecanismo de la válvula de pie	Inoperatividad de la bomba
				No permite el flujo en la red de tuberías	2	Obstrucción en la válvula de pie	Imposibilidad de utilizar el banco
Válvula desairadora	6	Facilitar el egreso de aire de la tubería de impulsión durante los inicios de operación; Mantiene el sistema libre de aire durante los tiempos de operación y evita presiones de vacíos al final de las operaciones.	A	Incapacidad de alivio	1	Falla en la válvula desairadora	Condiciones afectan los resultados del ensayo
					2	Obstrucción en la línea de alivio	Inoperatividad del banco de ensayos
Reductor de turbulencias	7	Reducir turbulencias	A	Alta turbulencia	1	Reductor de turbulencias defectuoso	Alteración en las condiciones del ensayo que puede resultar en resultados inexactos
Tanque de Reserva	8	Almacenar agua en óptimas condiciones	A	Incapacidad de retener el volumen	1	Grietas o fisuras en el tanque	Insuficiente cantidad de agua para el ensayo y riesgo de accidentes
				Agua contaminada	2	Depósitos, incrustaciones, corrosión o contaminación en la superficie interior del tanque	Condiciones insuficientes para realizar el ensayo y posibles daños en los componentes.
	9	Facilitar drenaje	A	Incapacidad de drenado	1	Obstrucción en la válvula de esfera	Dificultad en las tareas de mantenimiento
					2	Manguera de drenado en mal estado	Dificultad en las tareas de mantenimiento
Sistema de tuberías	10	Transportar agua hacia/desde la bomba	A	Fugas en las conexiones	1	Uniones en mal estado	Pérdida de agua y posible daño a componentes eléctricos

			B	Obstrucción en la red	1	Acumulación de sedimentos o depósitos	Reducción del caudal y aumento de la presión en la tubería
			C	Desplazamiento de las posiciones originales	1	Flexión en las tuberías	Posible debilitación en las conexiones.
Filtro de abastecimiento de agua	11	Garantizar las condiciones necesarias del agua para el ensayo	A	Agua contaminada	1	Filtro en mal estado	Condiciones insuficientes para realizar el ensayo y posibles daños en los componentes.
			B	No existe flujo	1	Válvulas en mal estado u obstruidas	Incapacidad de llenar el tanque para realizar el ensayo

Tabla AII.2: AMEF Sistema estructural

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA							
SISTEMA: SISTEMA ESTRUCTURAL							
ELEMENTO	FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA	
Elementos estructurales	12	Proveer soporte y estabilidad	A	Pérdida de estabilidad	1	Deformación en la estructura	Vibraciones excesivas
					2	Elementos debilitados por corrosión	Posible colapso del sistema
					3	Mal estado de la superficie de los rodos	Riesgo para la seguridad del operador
Sujeciones	13	Unir los distintos elementos estructurales	A	Pérdida de estabilidad	1	Desgaste en cordones de soldadura	Riesgo de colapso del sistema
					2	Sujeciones por tornillos flojas	Desalineación de componentes y posible daño a la bomba o tuberías
Rodos industriales	14	Proveer movilidad	A	Incapacidad de movilización	1	Rodos bloqueados	Dificultad en el posicionamiento del banco y riesgo de accidentes.

Tabla AII.3: AMEF Sistema eléctrico

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA							
SISTEMA: SISTEMA ESTRUCTURAL							
ELEMENTO	FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA	
Interruptor termomagnético	15	Proteger los equipos eléctricos a un sobrecalentamiento o sobre corriente	A	Protección de equipo activada	1	Protección activada	El equipo no enciende
					2	Sobrecalentamiento del motor	El equipo se apaga luego de funcionar un periodo de tiempo
			A	Falso contacto	1	Contactos no apretados	El equipo enciende en algunas ocasiones
					2	Cables no conectados a protección	El equipo dejó de trabajar sin sobrecalentamiento aparente
Contactor	16	Encargado de establecer o interrumpir la alimentación de la bomba según convenga	A	Bobina defectuosa	1	Bobina quemada	Contactador no hace la maniobra de paso de corriente
			A	Contactos dañados	1	Contactos fusionados	El contactador no hace la maniobra de paro
Botonera	17	Encargado de mandar la señal hacia el contactador para parar y arrancar el motor	A	Pulsador no se activa	1	Cable suelto	El equipo no enciende
					2	Botón dañado	El equipo no enciende
			A	Pulsador no se detiene	1	Botón atascado	El equipo no para
					2	Falla en circuito de control	Equipo no para
Toma corriente doble	18	Alimentación de dispositivos auxiliares	B	Holgura en los contactos	1	Contactos desconectados	Equipos auxiliares sin energía

Tabla AII.4: Modos de falla, categoría de riesgo y selección de tareas

ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLAS, CATEGORÍA DE RIESGO Y SELECCIÓN DE TAREAS						
SISTEMA: BANCO DE ENSAYOS DE CAVITACIÓN						
Código de función	Falla funcional	Modo de falla	Detección	Categoría de riesgo	Tarea	Frecuencia
1	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Inspeccionar visualmente el impulsor por desgaste y limpiar cualquier obstrucción detectada	Correctivo
		2	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Limpiar la tubería de entrada de la bomba para eliminar residuos y asegurar un flujo adecuado	Trimestral
		3	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Revisar el estado de los cojinetes y reemplazarlos si se detecta desgaste significativo	Anual
		4	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Verificar la alineación del motor con herramientas de precisión y realinear si es necesario	Correctiva
		5	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Balancear el rotor utilizando un equipo de balanceo para evitar vibraciones	Correctiva
		6	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Limpiar el ventilador del motor.	Trimestral
		7	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Inspeccionar visualmente los ejes por deformaciones o desgaste y reemplazarlos si es necesario.	Correctiva
		8	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Inspección de la conexión eléctrica	Anual
		9	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Lubricación del motor según manual de fabricante.	Anual
	B	1	Detectable a simple vista	Moderado	Inspección de sellos y reemplazo de ser necesario	Trimestral
		2	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Inspeccionar acoples y ajustarlos de ser necesario	Trimestral

2	A	1	Detectable a simple vista	Alto	Revisar sellos en válvulas y reemplazarlos de ser necesario	Correctiva
	B	1	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Revisar estado de las válvulas y reemplazar válvula si es necesario	Correctiva
3	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Verificar que la distancia entre los sensores del caudalímetro sea de 20 cm, en caso de no ser así moverlos a su posición correspondiente.	Mensual
		2	Detectable a simple vista	Leve	Revisar los parámetros configurados, realizar el proceso de parametrización indicado por el manual del caudalímetro en caso de presentar valores inexactos.	Mensual
	B	1	Detección a simple vista	Leve	Verificar la vida de la batería, recargarla o reemplazarla de ser necesario	Mensual
4	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Verificar la instalación del manómetro/vacuómetro, reemplazarlo de ser necesario	Trimestral
		2	Detectable en una inspección de rutina	Leve	Verificar la vida de la batería y reemplazar de ser necesario.	Mensual
5	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Reemplazar válvula de pie.	Correctivo
		2	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Drenar el agua del banco, desmontar válvula de pie, desmontar filtro y retirar residuos.	Trimestral
6	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Verificar el estado de la válvula de desaire y reemplazar de ser necesaria	Correctivo
		2	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Limpiar obstrucciones en la línea de desaire.	Trimestral
7	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Verificar el estado del reductor de turbulencias y su instalación.	Trimestral
8	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Revisar superficie exterior del tanque, en caso de presentar fisuras de tamaño pequeño limpiar la superficie y realizar una soldadura plástica, en caso de tener fisuras de gran tamaño reemplazar tanque.	Correctivo
		2	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Drenar agua del tanque, revisar superficie interior del tanque y en caso de presentar sedimentos o	Mensual

					contaminantes limpiar utilizando un cepillo de cerda de nylon.	
9	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Verificar estado de la válvula y reemplazarla de ser necesario	Correctiva
		2	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Verificar estado de manguera, en caso de presentar fisuras reemplazar o retirar parte afectada dependiendo de la zona afectada. Reemplazar acoples en caso de estar en mal estado.	Correctivo
10	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Inspección de la condición de las uniones y acoples de las tuberías	Trimestral
	B	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Desmontar red de tuberías (desacoplar uniones universales), verificar interior de tuberías y realizar limpieza utilizando un cepillo de cerdas de nylon, limpiar con agua y finalmente realizar el montaje de la red.	Anual
	C	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Verificar que no exista flexión en las tuberías, verificar que la altura de los soportes sea la adecuada y corregir de ser necesario.	Mensual
11	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Cambio de filtro de carbono.	Trimestral
	B	1	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Inspeccionar válvula, limpieza y reemplazo de ser necesario	Correctivo
12	A	1	Detectable a simple vista	Alto	Inspeccionar y reparar daños en la estructura	Correctiva
		2	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Identificar zonas con recubrimiento en mal estado o descubiertas, limpiar zona afectada y aplicar recubrimiento para proteger la superficie.	Correctiva
		3	Detectable en una inspección de rutina	Leve	Verificar el estado superficial de los rodos, limpiar incrustaciones o sedimentos que afecten la estabilidad, reemplazar de ser necesario.	Trimestral
13	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Inspección de los cordones de soldadura, de encontrarse en malas condiciones retirar partes afectadas y realizar el refuerzo necesario.	Correctiva

		2	Detectable en una inspección de rutina	Alto	Apretar y asegurar sujeciones por tornillos sueltas	Correctiva
14	A	1	Detectable en una inspección de rutina	Moderado	Verificar estado de los rodos, limpieza y lubricación.	Trimestral
15	A	1	Inspección de rutina	Alta	Reestablecer protección	Correctivo
		2	Inspección de rutina	Alta	Revisar instalación eléctrica garantizando protección adecuada	Correctivo
	A	1	Inspección de rutina	Alta	Aprete de contactos	Correctivo
		2	Inspección de rutina	Alta	Revisar circuito eléctrico y reconectar cables sueltos	Correctivo
16	A	1	Inspección de rutina	Alta	Cambio de bobina o contactor	Correctivo
	A	1	Inspección de rutina	Alta	Si la fusión es ligera limar ambos contactos, si la fusión es tipo soldadura cambiar contactor	Correctivo
17	A	1	Inspección de rutina	Alta	Conectar cable suelto	Correctivo
		2	Inspección de rutina	Alta	Cambio de pulsador	Correctivo
	A	1	Inspección de rutina	Alta	Cambio de pulsador	Correctivo
		2	Inspección de rutina	Alta	Reestablecer el circuito de control a su configuración inicial	Correctivo
18	A	1	Inspección de rutina	Alta	Verificar y corregir conexión eléctrica del tomacorriente	Correctivo

Tabla AII.5: Propuesta de plan de mantenimiento

F	FF	MF	Descripción de la tarea	Correctiva	Mensual	Trimestral	Anual
1	A	1	Inspeccionar visualmente el impulsor por desgaste y limpiar cualquier obstrucción detectada	✓			
		2	Limpiar la tubería de entrada de la bomba para eliminar residuos y asegurar un flujo adecuado			✓	
		3	Revisar el estado de los cojinetes y reemplazarlos si se detecta desgaste significativo				✓
		4	Verificar la alineación del motor con herramientas de precisión y realinear si es necesario	✓			
		5	Balancear el rotor utilizando un equipo de balanceo para evitar vibraciones	✓			
		6	Limpiar el ventilador del motor.			✓	
		7	Inspeccionar visualmente los ejes por deformaciones o desgaste y reemplazarlos si es necesario.	✓			
		8	Inspección de la conexión eléctrica	✓			
		9	Lubricación del motor según manual de fabricante.				✓
		B	1	Inspección de sellos y reemplazo de ser necesario			✓
		2	Inspeccionar conexiones y ajustarlas de ser necesario			✓	
2	A	1	Revisar sellos en válvulas y reemplazarlos de ser necesario	✓			
	B	1	Revisar estado de las válvulas y reemplazar válvula si es necesario	✓			
3	A	1	Verificar que la distancia entre los sensores del caudalímetro sea de 20 cm, en caso de no ser así moverlos a su posición correspondiente.		✓		
		2	Revisar los parámetros configurados, realizar el proceso de parametrización indicado por el manual del caudalímetro en caso de presentar valores inexactos.		✓		
	B	1	Verificar la vida de la batería, recargarla o reemplazarla de ser necesario		✓		
4	A	1	Verificar la instalación del manómetro/vacuómetro, reemplazarlo de ser necesario			✓	
		2	Verificar la vida de la batería y reemplazar de ser necesario.		✓		
5	A	1	Reemplazar válvula de pie.			✓	
		2	Drenar el agua del banco, desmontar válvula de pie, desmontar filtro y retirar residuos.			✓	
6	A	1	Verificar el estado de la válvula de desaire y reemplazar de ser necesaria	✓			
		2	Limpiar obstrucciones en la línea de desaire.			✓	
7	A	1	Verificar el estado del reductor de turbulencias y su instalación.			✓	
8	A	1	Revisar superficie exterior del tanque, en caso de presentar fisuras de tamaño pequeño limpiar la superficie y realizar una soldadura plástica, en caso de tener fisuras de gran tamaño reemplazar tanque.	✓			

		2	Drenar agua del tanque, revisar superficie interior del tanque y en caso de presentar sedimentos o contaminantes limpiar utilizando un cepillo de cerda de nylon.		✓		
9	A	1	Verificar estado de la válvula y reemplazarla de ser necesario	✓			
		2	Verificar estado de manguera, en caso de presentar fisuras reemplazar o retirar parte afectada dependiendo de la zona afectada. Reemplazar acoples en caso de estar en mal estado.	✓			
10	A	1	Inspección de la condición de las uniones y acoples de las tuberías			✓	
	B	1	Desmontar red de tuberías (desacoplar uniones universales), verificar interior de tuberías y realizar limpieza utilizando un cepillo de cerdas de nylon, limpiar con agua y finalmente realizar el montaje de la red.				✓
11	A	1	Desarmar el purificador de ozono y reemplazar el filtro.			✓	
	B	1	Desarmar el purificador, inspeccionar válvulas y remover obstrucciones presentes, de estar en mal estado hacer el cambio de la pieza.	✓			
12	A	1	Verificar que no exista flexión en las tuberías, verificar que la altura de los soportes sea la adecuada y corregir de ser necesario.	✓			
		2	Inspeccionar y reparar daños en la estructura	✓			
		3	Identificar zonas con recubrimiento en mal estado o descubiertas, limpiar zona afectada y aplicar recubrimiento para proteger la superficie.				✓
13	A	1	Inspección de los cordones de soldadura, de encontrarse en malas condiciones retirar partes afectadas y realizar el refuerzo necesario.	✓			
		2	Apretar y asegurar sujeciones por tornillos sueltas	✓			
14	A	1	Verificar el estado superficial de los rodos, limpiar incrustaciones o sedimentos que afecten la estabilidad, reemplazar de ser necesario.				✓
		2	Verificar estado de los rodos, limpieza y lubricación.	✓			
15	A	1	Reestablecer protección	✓			
		2	Revisar instalación eléctrica garantizando protección adecuada	✓			
	A	1	Aprete de contactos	✓			
		2	Revisar circuito eléctrico y reconectar cables sueltos	✓			
16	A	1	Cambio de bobina o contactor	✓			
	A	1	Si la fusión es ligera limar ambos contactos, si la fusión es tipo soldadura cambiar contactor	✓			
17	A	1	Conectar cable suelto	✓			
		2	Cambio de pulsador	✓			
	A	1	Cambio de pulsador	✓			
		2	Reestablecer el circuito de control a su configuración inicial	✓			
18	A	1	Verificar y corregir conexión eléctrica del tomacorriente	✓			

A partir del contenido presentado en las tablas AII.1, AII.2, AII.3, AII.4 y AII.5, el plan de mantenimiento se implementa según los siguientes pasos:

1. Realizar la inspección rutinaria del equipo
2. Si algún componente presenta alguna falla, iniciar el AMEF identificando la función y la falla funcional de dicho componente en las tablas All.1, All.2 o All.3, según el sistema correspondiente.
3. Identificar el modo de falla que el componente presenta.
4. Una vez se ha identificado la función del componente, la falla funcional y el modo de falla, se debe proceder a formular un código correlativo que servirá para determinar la tarea de mantenimiento a realizar, según lo indicado por las tablas All.4 y All.5; por ejemplo: Durante una inspección de funcionamiento el caudalímetro no presentó lecturas y, en base al AMEF, el código resultante de la inspección es 3B1, cuyos caracteres indican lo siguiente, según la tabla All.1:
  - 3: La función es "medir el caudal", la cual es realizada por el caudalímetro
  - B: La falla funcional es "no hay medición"
  - 1: El modo de falla consiste en que la batería podría estar completamente descargada o que su tiempo de vida útil caducó
5. Con el código correlativo identificar el riesgo de la falla en la tabla All.4, para establecer por prioridades el orden en que se realizarán las tareas de mantenimiento, en caso de que el banco de ensayo presente más fallas.
6. En base al correlativo, identificar en la tabla All.5 la tarea de mantenimiento que se deberá ejecutar para corregir la falla funcional del componente en cuestión.

## Anexo III: Tablas y datos representativos

Tabla AIII.1: Dimensiones de la bomba de referencia y características de sus motores

Fuente adaptada de: Franklin Electric. Catálogo Bombas Centrífugas: Serie AG acoplada a motor.

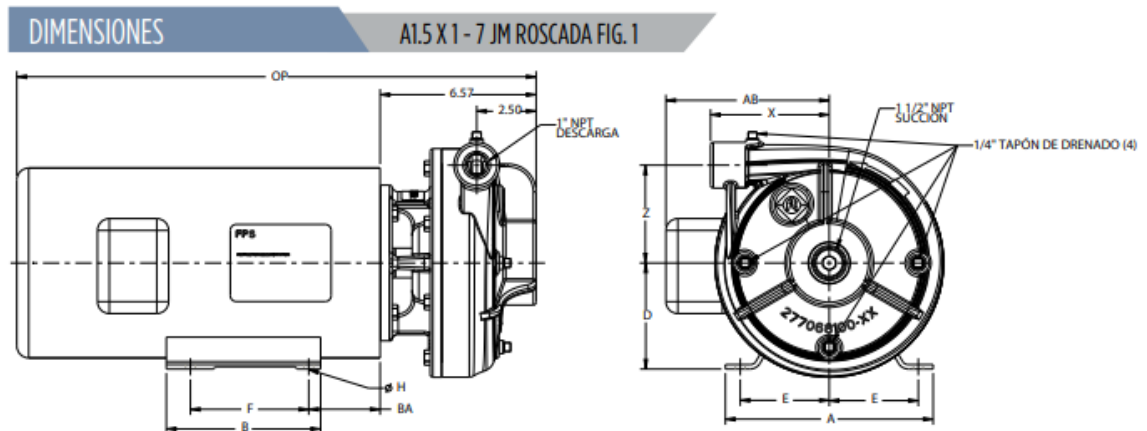


FIG	Conexión	Carcasa de Motor	AK Fit	HP	Fase	Dimensiones [pulgadas]										
						A	B	D	E	F	ØH	X	Z	AB	BA	OP
1	Roscada	TEFC	4.5	3	1	6.54	6.50	3.50	2.75	5.00	0.34	5.00	4.12	5.87	2.75	19.99
					3	6.46	6.14	3.50	2.75	5.00	0.34	5.00	4.12	6.18	2.56	17.62
				5	1	8.66	6.97	4.50	3.75	5.50	0.41	5.00	4.12	7.84	2.76	16.68
					3	8.66	6.97	4.50	3.75	5.50	0.41	5.00	4.12	7.56	2.77	19.33
				7.5	1	8.66	6.97	4.50	3.75	5.50	0.41	5.00	4.12	7.56	2.77	19.33
					3	8.66	6.97	4.50	3.75	5.50	0.41	5.00	4.12	7.56	2.77	19.33

### ESPECIFICACIONES DEL MOTOR

#### CERRADO CON ABANICO DE ENFRIAMIENTO - JM

Carcasa	HP	Fase	Voltaje	Factor de Servicio	Eje	AK Fit	Tamaño Eje	FLA	SFA	No. Parte	Wt. [lbs]
TEFC	3	1	115/208-230	1.15	143/5JM	4.5	7/8	26.0/14.0-13.0	29.9/16.1-15	104220000	62
		3	208-230/460	1.15	143/5JM	4.5	7/8	8.16-7.52/3.76	9.4-8.6/4.3	104220001	52
	5	1	208-230	1.15	182/4JM	4.5	7/8	23.0-21.9	26.5-25.2	104220002	92
		3	208-230/460	1.25	182/4JM	4.5	7/8	13.0-11.8/5.90	16.3-14.8/7.4	104220003	88
	7.5	1	208-230	1.15	213JM	8.5	7/8	33.4-29.8	38.4-34.3	104220004	143
		3	208-230/460	1.15	182/4JM	4.5	7/8	18.8-17.0/8.48	21.6-19.6/9.8	104220005	93
	10	1	208-230	1.15	215JM	8.5	7/8	43.2-38.8	49.7-44.6	104220006	155
		3	208-230/460	1.25	213/5JM	8.5	7/8	26.1-23.6/11.8	32.6-29.5/14.8	104220007	143
	15	3	208-230/460	1.15	213/5JM	8.5	7/8	37.2-33.6/16.8	42.8-38.6/19.3	104220008	163
	20	3	208-230/460	1.25	254/6JM	8.5	1 1/4	51.3-47.4/23.7	64.1-59.3/29.6	104220009	265
	30	3	208-230/460	1.25	284/6JM	12.5	1 1/4	74.5-67.4/33.7	93.1-84.3/42.1	104220011	375
	40	3	208-230/460	1.15	284/6JM	12.5	1 1/4	101-91.2/45.6	116.2-104.9/52.4	104220012	410
	50	3	208-230/460	1.25	324JM	12.5	1 1/4	125-113/56.5	156.3-141.3/70.6	104220013	549
	60	3	208-230/460	1.15	326JM	12.5	1 1/4	153-138/69	176-158.7/79.4	104220014	584
	75	3	208-230/460	1.25	364/5JM	12.5	1 1/4	182-165/82.5	227.5-206.3/103.1	104220015	847

Tabla AIII.2: Velocidades flujo máximas recomendadas

Fuente: Blanco, E. Velarde S. Fernández J. (1994) *Sistemas de Bombeo*. Universidad de Oviedo. Gijón, España

FLUIDO	UTILIZACIÓN	VELOCIDAD m/s
:Agua	Agua en general	aspiración impulsión
		0.5 - 1.5 1.0 - 3.0
	Distribución en poblaciones	línea principal red de distribución
		1.0 - 2.0 0.5 - 1.2
	Turbinas	baja altura gran altura
		3.0 3.0 - 7.0
Bombas de alimentación de calderas	aspiración	0.3 - 0.5
	impulsión	2.0 - 2.5
	Con sólidos en suspensión	0.5 - 2.0
Aceites	Ligeros	1.0 - 2.0
	Pesados (dependiendo de la necesidad)	0.5 - 2.0
Aire	Baja presión	12 - 15
	Alta presión	20 - 25

Tabla AIII.3: TABLA 11-6 de coeficientes de pérdidas para válvulas de pie

Fuente: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Capítulo 11.

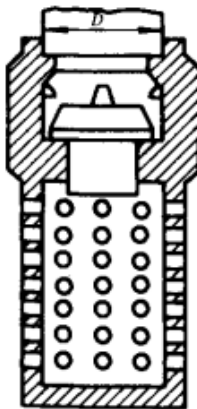


TABLA 11-6

$D$ mm	$\zeta$	$D$ mm	$\zeta$
40	12,0	200	5,2
50	10,0	250	4,4
65	8,8	300	3,7
80	8,0	350	3,4
100	7,0	400	3,1
125	6,5	450	2,8
150	6,0	500	2,5

Tabla AIII.4: "Tabla 6.2" Coeficientes representativos de pérdidas de cabeza,  $K$ , para diferentes accesorios

Fuente: V.L.Streeter, E.B.Wylie, K.E.Bedford. *Mecánica de Fluidos*. 9ª Edición. Capítulo 6. Mc Graw Hill.

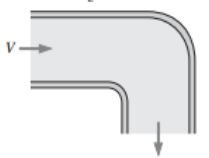
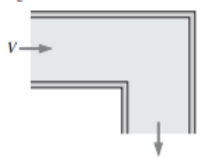
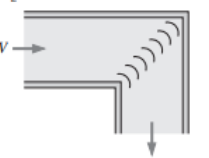
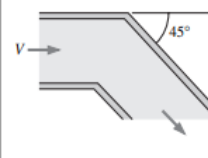
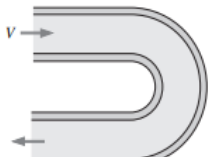
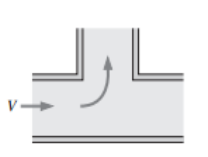
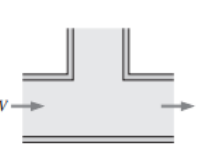
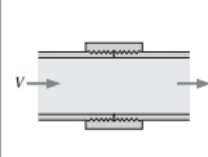
Tabla 6.2 Coeficientes representativos de pérdidas de cabeza,  $K$ , para diferentes accesorios [19,20]

Accesorio	$K$
Válvula de globo (completamente abierta)	10.0
Válvula de ángulo (completamente abierta)	5.0
Válvula de cheque (completamente abierta)	2.5
Válvula de compuerta (completamente abierta)	0.19
Codo en U	2.2
Tec estándar	1.8
Codo estándar	0.9
Codo de radio medio	0.75
Codo de radio largo	0.60

Tabla AIII.5: Tabla 8-4 de factores  $K$  de pérdidas representativos para accesorios de tuberías

Fuente: J.A. Çengel. *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. Capítulo 8. Mc Graw Hill.

TABLA 8-4 (CONCLUSIÓN)

<p><b>Codos y ramificaciones</b> Codo suave de 90°: Embridado: <math>K_L = 0.3</math> Roscado: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p>Codo esquinado de 90° (sin álabes directores): <math>K_L = 1.1</math></p> 	<p>Codo esquinado de 90° (con álabes directores): <math>K_L = 0.2</math></p> 	<p>Codo roscado de 45°: <math>K_L = 0.4</math></p> 								
<p>Codo de retorno de 180°: Embridado: <math>K_L = 0.2</math> Roscado: <math>K_L = 1.5</math></p> 	<p>Conexión en T (flujo deriv.): Embridado: <math>K_L = 1.0</math> Roscado: <math>K_L = 2.0</math></p> 	<p>Conexión en T (flujo en línea): Embridado: <math>K_L = 0.2</math> Roscado: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p>Unión roscada: <math>K_L = 0.08</math></p> 								
<p><b>Válvulas</b></p> <table border="0"> <tr> <td>Válvula de globo, totalmente abierta: <math>K_L = 10</math></td> <td>Válvula de compuerta, totalmente abierta: <math>K_L = 0.2</math></td> </tr> <tr> <td>Válvula de ángulo, totalmente abierta: <math>K_L = 5</math></td> <td>1/4 cerrada: <math>K_L = 0.3</math></td> </tr> <tr> <td>Válvula de bola, totalmente abierta: <math>K_L = 0.05</math></td> <td>3/4 cerrada: <math>K_L = 2.1</math></td> </tr> <tr> <td>Válvula de charnela: <math>K_L = 2</math></td> <td>4 cerrada: <math>K_L = 17</math></td> </tr> </table>				Válvula de globo, totalmente abierta: $K_L = 10$	Válvula de compuerta, totalmente abierta: $K_L = 0.2$	Válvula de ángulo, totalmente abierta: $K_L = 5$	1/4 cerrada: $K_L = 0.3$	Válvula de bola, totalmente abierta: $K_L = 0.05$	3/4 cerrada: $K_L = 2.1$	Válvula de charnela: $K_L = 2$	4 cerrada: $K_L = 17$
Válvula de globo, totalmente abierta: $K_L = 10$	Válvula de compuerta, totalmente abierta: $K_L = 0.2$										
Válvula de ángulo, totalmente abierta: $K_L = 5$	1/4 cerrada: $K_L = 0.3$										
Válvula de bola, totalmente abierta: $K_L = 0.05$	3/4 cerrada: $K_L = 2.1$										
Válvula de charnela: $K_L = 2$	4 cerrada: $K_L = 17$										

\* Ésos son valores representativos para coeficientes de pérdida. Los valores reales dependen principalmente del diseño y la fabricación de los accesorios y pueden diferir considerablemente de los valores dados (en especial para las válvulas). En el diseño final se deben usar los datos reales del fabricante.

Tabla AIII.6: Tabla de reacciones para viga biempotrada con carga repartida

Fuente: "Elaboración de fórmulas analíticas y tablas de cálculo para las estructuras metálicas de acero según la normativa Eurocódigo 3" (Fernández, 2015)

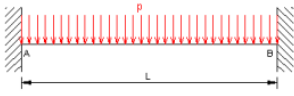

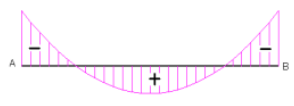
<p><b>Viga biempotrada con carga repartida</b></p> <p>Esfuerzos aplicados</p>  <p>Diagrama de esfuerzos cortantes</p>  <p>Diagrama de momento flector</p> 	<p>Reacciones</p> $R_A = R_B = \frac{pL}{2}$ <p>Esfuerzos cortantes</p> $T_A = R_A \quad T_{AB} = \frac{p}{2}(L - 2x)$ $T_B = -R_B$ <p>Momentos Flectores</p> $M_A = M_B = -\frac{pL^2}{12}$ $M_{AB} = -\frac{p}{12}(L^2 - 6Lx + 6x^2)$ $M(x = L/2) = \frac{pL^2}{24}$ $M(x = 0,2113L) = 0$
<p>Ecuación de la elástica</p> $w_{AB}(x) = \frac{pL^3x}{24EI} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2$	
<p>Flecha máxima</p> $\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{pL^4}{384EI} \quad x = \frac{L}{2}$	

Tabla AIII.7: Recomendaciones generales de factores de seguridad

Fuente: *The Engineering Toolbox. Factors of Safety.* (The Engineering ToolBox, 2013)

### General recommendations

Applications	Factor of Safety - FOS -
For use with highly reliable materials where loading and environmental conditions are not severe and where weight is an important consideration	1.3 - 1.5
For use with reliable materials where loading and environmental conditions are not severe	1.5 - 2
For use with ordinary materials where loading and environmental conditions are not severe	2 - 2.5
For use with less tried and for brittle materials where loading and environmental conditions are not severe	2.5 - 3
For use with materials where properties are not reliable and where loading and environmental conditions are not severe, or where reliable materials are used under difficult and environmental conditions	3 - 4

Tabla AIII.8: Especificaciones de tuberías de PVC

Fuente: Catálogo de especificaciones y listado de precios. (2011) Amanco

ESPECIFICACIONES ASTM D - 2241 (IPS) - (PVC1120)														
Diámetro nominal		SDR	Presión trabajo		Largo en metros	Diám. medio exterior		Espesor mín. de pared		Diám. medio interior		Presión ruptura		Peso aprox. P/tubo
mm	Pulg		Lbs/Pulg <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>		mm	Pulg	mm	Pulg	mm	Pulg	Kg/cm <sup>2</sup>	Lbs/Pulg <sup>2</sup>	
12	1/2	13.5	315	22.1	6	21.34	0.840	1.57	0.062	18.20	0.716	70.3	1000	0.874
18	3/4	17	250	17.6	6	26.67	1.050	1.57	0.062	23.53	0.926	56.2	800	1.111
25	1	17	250	17.6	6	33.40	1.315	1.96	0.077	29.48	1.161	56.2	800	1.744
31	1 1/4	17	250	17.6	6	42.16	1.660	2.49	0.098	37.18	1.464	56.2	800	2.793
38	1 1/2	17	250	17.6	6	48.26	1.900	2.84	0.112	42.58	1.676	56.2	800	3.646
50	2	17	250	17.6	6	60.33	2.375	3.56	0.140	53.21	2.095	56.2	800	5.707
62	2 1/2	17	250	17.6	6	73.03	2.875	4.29	0.169	64.45	2.537	56.2	800	8.340
75	3	17	250	17.6	6	88.90	3.500	5.23	0.206	78.44	3.088	56.2	800	12.361
100	4	17	250	17.6	6	114.30	4.500	6.73	0.265	100.84	3.970	56.2	800	20.453
150	6	17	250	17.6	6	168.28	6.625	9.91	0.390	148.46	5.845	56.2	800	44.344
200	8	17	250	17.6	6	219.08	8.625	12.9	0.508	193.28	7.609	56.2	800	75.159
250	10	17	250	17.6	6	273.05	10.750	16.05	0.632	240.95	9.480	56.2	800	118.323
300	12	17	250	17.6	6	323.85	12.750	19.05	0.750	285.75	11.25	56.2	800	166.564
25	1	26	160	11.2	6	33.40	1.315	1.52	0.060	30.36	1.195	35.2	500	1.370
31	1 1/4	26	160	11.2	6	42.16	1.660	1.62	0.064	38.92	1.532	35.2	500	1.872
38	1 1/2	26	160	11.2	6	48.26	1.900	1.85	0.073	44.56	1.754	35.2	500	2.429
50	2	26	160	11.2	6	60.33	2.375	2.31	0.091	55.71	2.193	35.2	500	3.796
62	2 1/2	26	160	11.2	6	73.03	2.875	2.79	0.110	67.45	2.655	35.2	500	5.552
75	3	26	160	11.2	6	88.90	3.500	3.43	0.135	82.04	3.230	35.2	500	8.307
100	4	26	160	11.2	6	114.30	4.500	4.39	0.173	105.52	4.154	35.2	500	13.647
150	6	26	160	11.2	6	168.28	6.625	6.48	0.255	155.32	6.115	35.2	500	29.681
200	8	26	160	11.2	6	219.08	8.625	8.43	0.332	202.22	7.961	35.2	500	50.285
250	10	26	160	11.2	6	273.05	10.750	10.49	0.413	252.07	9.924	35.2	500	77.962
300	12	26	160	11.2	6	323.85	12.750	12.45	0.490	298.95	11.770	35.2	500	109.758
385	15	26	160	11.2	6	388.62	15.300	14.95	0.588	358.75	14.124	35.2	500	157.960
31	1 1/4	32.5	125	8.8	6	42.16	1.660	1.52	0.060	39.12	1.540	28.1	400	1.760
38	1 1/2	32.5	125	8.8	6	48.26	1.900	1.52	0.060	45.21	1.780	28.1	400	2.010
50	2	32.5	125	8.8	6	60.33	2.375	1.85	0.073	56.62	2.229	28.1	400	3.062
62	2 1/2	32.5	125	8.8	6	73.03	2.875	2.24	0.088	68.55	2.699	28.1	400	4.482
75	3	32.5	125	8.8	6	88.90	3.500	2.74	0.108	83.41	3.284	28.1	400	6.676
100	4	32.5	125	8.8	6	114.30	4.500	3.51	0.138	107.29	4.224	28.1	400	11.011
150	6	32.5	125	8.8	6	168.28	6.625	5.18	0.204	157.91	6.217	28.1	400	23.922
200	8	32.5	125	8.8	6	219.08	8.625	6.73	0.265	205.61	8.095	28.1	400	40.450
250	10	32.5	125	8.8	6	273.05	10.750	8.41	0.331	256.24	10.088	28.1	400	62.994
300	12	32.5	125	8.8	6	323.85	12.750	9.96	0.392	303.94	11.966	28.1	400	88.553
31	1 1/4	41	100	7.0	6	42.16	1.660	1.24	0.049	39.67	1.592	22.1	315	1.450
38	1 1/2	41	100	7.0	6	48.26	1.900	1.24	0.049	45.77	1.802	22.1	315	1.666
50	2	41	100	7.0	6	60.33	2.375	1.47	0.058	57.38	2.259	22.1	315	2.532
62	2 1/2	41	100	7.0	6	73.03	2.875	1.78	0.070	69.47	2.735	22.1	315	3.600
75	3	41	100	7.0	6	88.90	3.500	2.16	0.085	84.58	3.330	22.1	315	5.309
100	4	41	100	7.0	6	114.30	4.500	2.79	0.110	108.71	4.280	22.1	315	8.821
150	6	41	100	7.0	6	168.28	6.625	4.11	0.162	160.05	6.301	22.1	315	19.130
200	8	41	100	7.0	6	219.08	8.625	5.33	0.210	208.41	8.205	22.1	315	32.277
250	10	41	100	7.0	6	273.05	10.750	6.65	0.262	259.74	10.226	22.1	315	50.195
300	12	41	100	7.0	6	323.85	12.750	7.9	0.311	308.05	12.128	22.1	315	71.739

Tabla AIII.9: Propiedades flexionantes para filetes de soldadura

Fuente: Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica. Capítulo 9. Mc Graw Hill.

**Table 9-2**  
Bending Properties of Fillet Welds\*


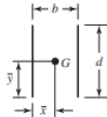
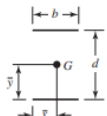
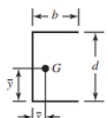
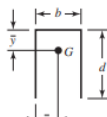
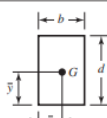
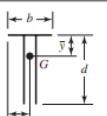
Weld	Throat Area	Location of G	Unit Second Moment of Area
1. 	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{12}$
2. 	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{6}$
3. 	$A = 1.414hb$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{bd^2}{2}$
4. 	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{12}(6b + d)$
5. 	$A = 0.707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$
6. 	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d)$
7. 	$A = 0.707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$

Tabla AIII.10: Propiedades mínimas del metal de aporte en soldaduras

Fuente: Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica. Capítulo 9.

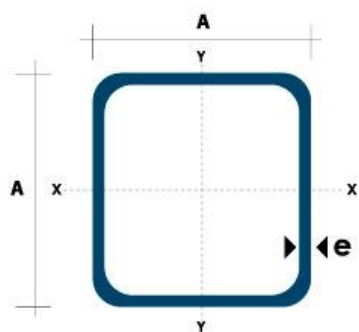
**Tabla 9-3**

Propiedades mínimas del metal de aporte

Número de electrodo AWS*	Resistencia a la tensión, kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia, kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

Tabla AIII.11: Especificaciones de tuberías estructurales cuadradas

Fuente: Catálogo: Tubo estructural cuadrado. DIPAC.



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Esesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm2	I cm4	W cm3	I cm3
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84



[www.dipacmanta.com](http://www.dipacmanta.com)

Tabla AIII.12: Características de cables según la SIGET

Fuente: Manual de Especificaciones Técnicas de los materiales y equipos utilizados para la Construcción de Líneas Areas de Distribución de Energía Eléctrica SIGET (2021)

CALIBRE AWG/MCM	AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL (mm <sup>2</sup> )	Nº DE HILOS	ESPESOR DE AISLAMIENTO (mm.)	ESPESOR DE CUBIERTA (mm.)	Ø EXTERNO TOTAL (mm.)	PESO TOTAL (kg/km)	RESISTENCIA ELECTRICA C.D. MAX. 30°C (Ω / km)	CAPACIDAD DE CORRIENTE MAXIMA (A.)
18	0.82	10	0.38	0.10	2.16	11	22.7	14
16	1.31	16	0.38	0.10	2.46	16	14.2	18
14	2.08	1	0.38	0.10	2.59	23	8.81	25
12	3.31	1	0.38	0.10	3.02	34	5.57	30
10	5.26	1	0.51	0.10	3.81	55	3.49	40
8	8.37	1	0.76	0.13	5.04	89	2.19	55
6	13.30	1	0.76	0.13	5.89	136	1.37	75
14	2.08	7	0.38	0.10	2.81	24	8.98	25
12	3.31	7	0.38	0.10	3.29	36	5.68	30
10	5.26	7	0.51	0.10	4.15	58	3.56	40
8	8.37	7	0.76	0.13	5.48	95	2.23	55
6	13.30	7	0.76	0.13	6.44	145	1.40	75
4	21.15	19	1.02	0.15	8.09	229	0.881	95
3	26.66	19	1.02	0.15	8.80	283	0.700	110
2	33.63	19	1.02	0.15	9.59	351	0.554	130
1	42.41	19	1.27	0.18	11.04	449	0.443	150
1/0	53.51	19	1.27	0.18	12.05	558	0.348	170
2/0	67.44	19	1.27	0.18	13.17	693	0.277	195
3/0	85.03	19	1.27	0.18	14.43	863	0.220	225
4/0	107.22	19	1.27	0.18	15.85	1077	0.174	260
250	126.68	37	1.52	0.20	18.08	1278	0.148	290
300	152.01	37	1.52	0.20	19.48	1520	0.123	320
350	177.35	37	1.52	0.20	20.78	1762	0.1052	350
400	202.68	37	1.52	0.20	21.97	2003	0.0919	380
500	253.36	37	1.52	0.20	24.16	2483	0.0738	430
600	304.03	61	1.78	0.23	26.70	2992	0.0617	475
750	380.03	61	1.78	0.23	29.39	3712	0.0491	535
1000	506.71	61	1.78	0.23	33.30	4906	0.0369	615

Tabla AIII.13 Límites permisibles de características físicas y organolépticas del agua potable

Fuente: NORMA SALVADOREÑA NSO 13.07.01:08

#### 4.2 REQUISITOS DE CALIDAD FÍSICOS Y QUÍMICOS

Tabla 2. Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Parámetro	Unidades	Límite máximo permisible
Color verdadero	Pt-Co	15
Olor	-	No rechazable
pH	-	8,5 <sup>1)</sup>
Sabor	-	No rechazable
Sólidos totales disueltos	mg/l	1 000 <sup>2)</sup>
Turbidez	UNT	5 <sup>3)</sup>
Temperatura	°C	No rechazable

<sup>1)</sup> Límite mínimo permisible 6,0 unidades

<sup>2)</sup> Por las condiciones propias del país.

<sup>3)</sup> Para el agua tratada en la salida de planta de tratamiento de aguas superficiales, el límite máximo permisible es 1.

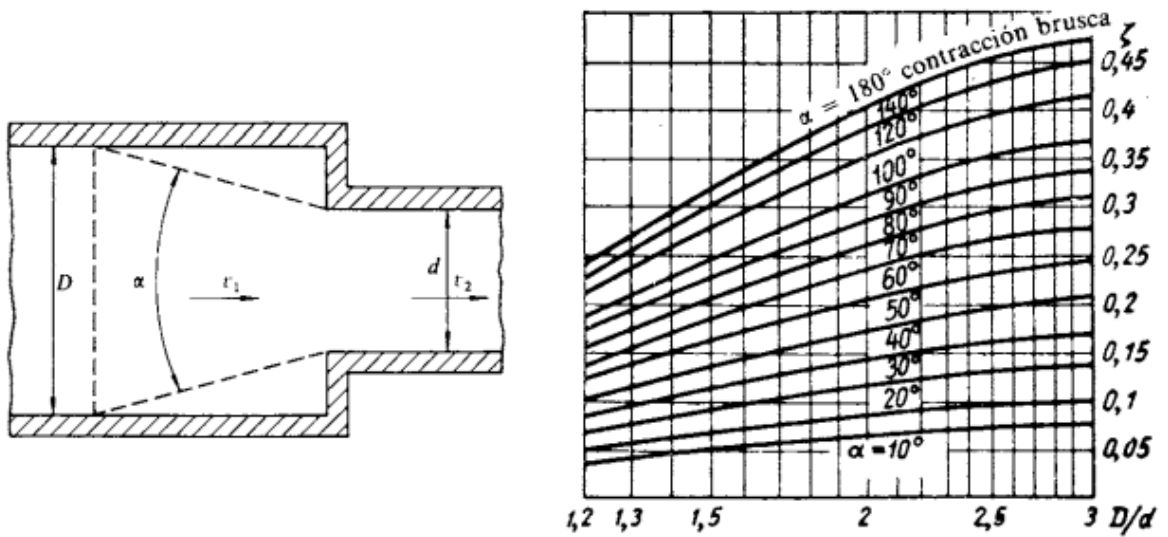


Figura AIII.1: Factores de pérdida para reductores de sección transversal

Fuente: C. Mataix. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Capítulo 11. 2ª Edición

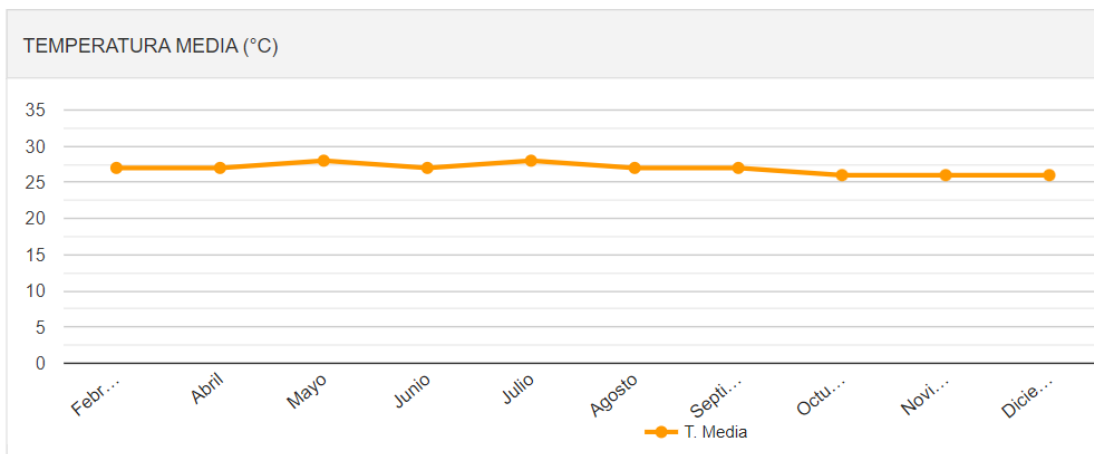


Figura AIII.2: Temperatura media en San Salvador, año 2023

Fuente: Meteored, *Histórico del Tiempo en San Salvador*, <https://www.tiempo.com/el-salvador/san-salvador/historico>

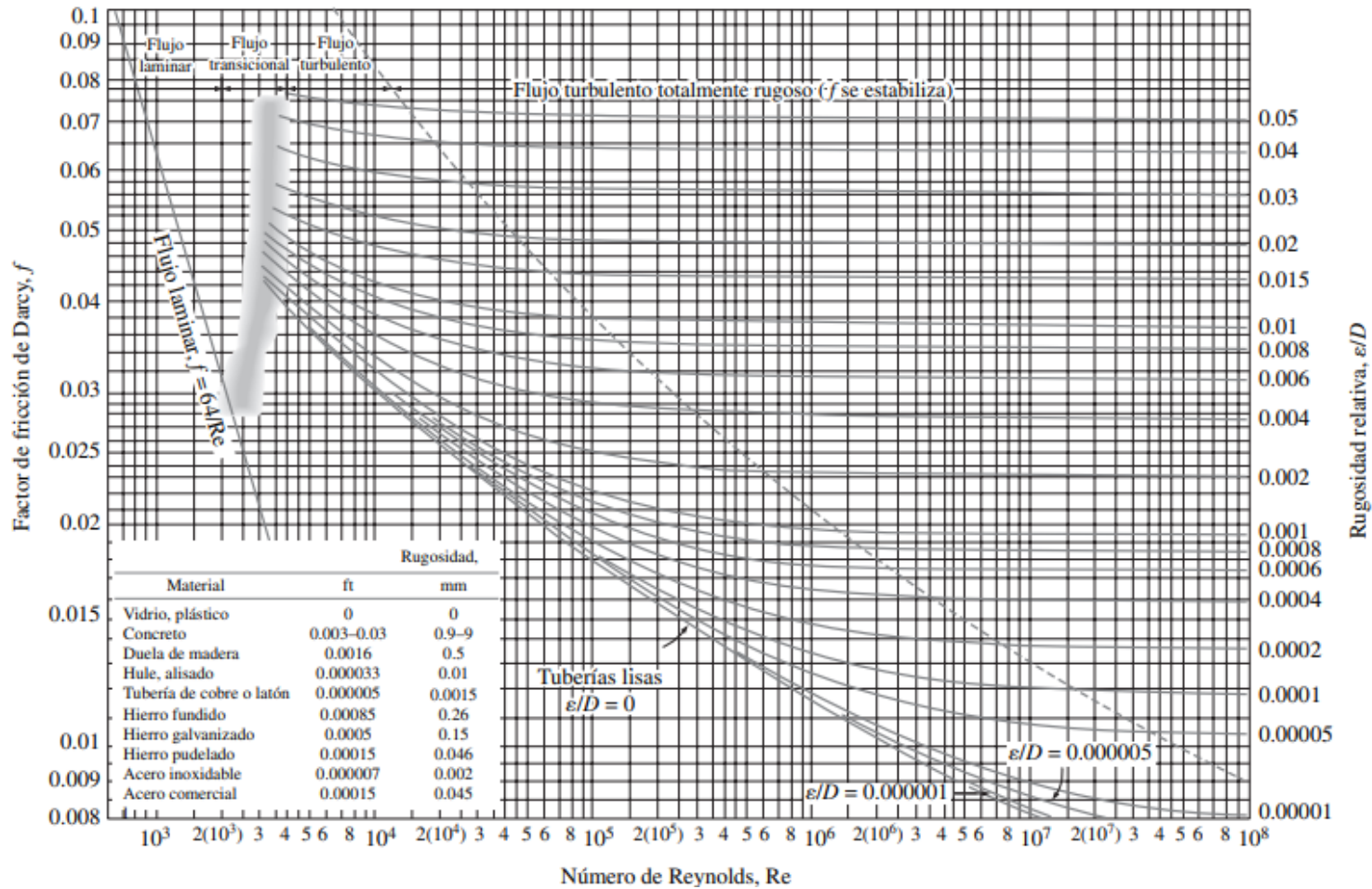
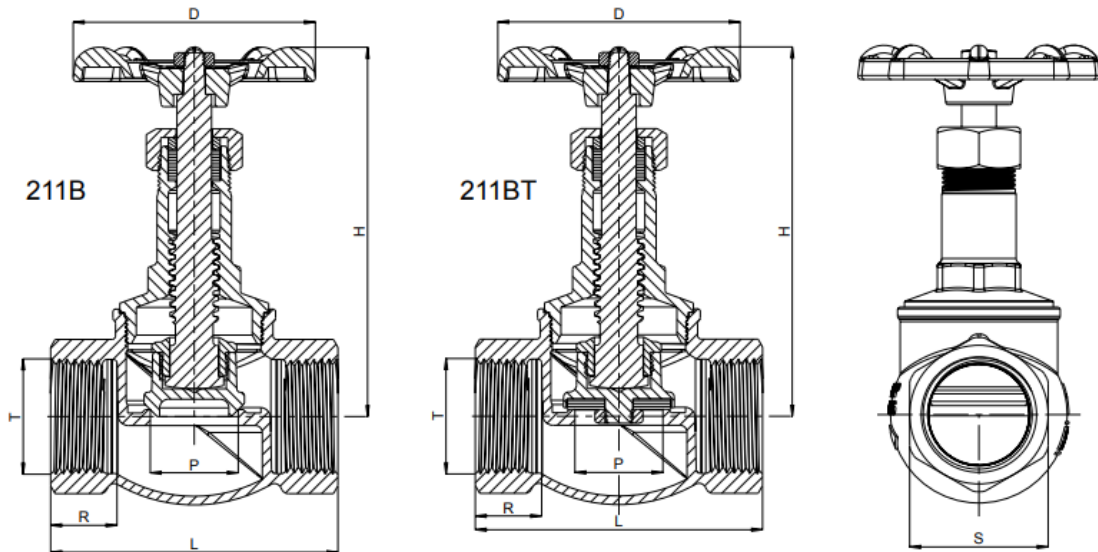


Figura AIII.3: diagrama de moody

Fuente: J.A. Cengel. *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. Capítulo 8. Mc Graw Hi

## Anexo IV: Especificaciones de componentes

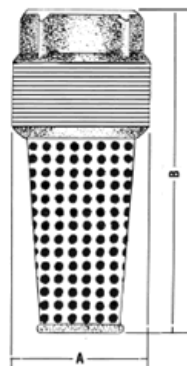


	T	D		H (Close)		H (Open)		L		P		R		S		Cv	Wt. (211B)		Wt. (211BT)	
		[in]	[mm]	[in]	[mm]	[in]	[mm]	[in]	[mm]	[in]	[mm]	[in]	[mm]	[in]	[mm]		[lb]	[kg]	[lb]	[kg]
1/2"	1/2 - 14 NPT	2.36	60	3.28	83.5	3.60	91	2.32	59	0.59	15.0	0.57	14.5	1.06	27	3.73	0.75	0.34	0.75	0.34
3/4"	3/4 - 14 NPT	2.76	70	3.64	92.5	4.00	102	2.64	67	0.75	19.1	0.61	15.7	1.30	33	6.35	1.05	0.48	1.07	0.49
1"	1 - 11.5 NPT	2.76	70	4.21	107	4.70	120	3.26	83	1.00	25.4	0.75	19.0	1.57	40	11.6	1.72	0.78	1.73	0.78
1 1/4"	1 1/4 - 11.5 NPT	3.35	85	4.88	124	5.50	140	3.58	91	1.26	32.0	0.75	19.0	2.00	50	21.2	2.50	1.13	2.52	1.14
1 1/2"	1 1/2 - 11.5 NPT	3.94	100	5.51	140	6.20	158	3.97	101	1.50	38.0	0.77	19.5	2.20	56	26.8	3.43	1.56	3.45	1.56
2"	2 - 11.5 NPT	3.94	100	5.98	152	6.90	174	4.88	124	2.00	50.0	0.87	22.0	2.67	68	46.5	5.35	2.43	5.40	2.45

Figura AIV.1: Dimensiones de las válvulas de globo RED-WHITE

Fuente adaptada de: Especificaciones de la Válvula de globo RED-WHITE 211B,  
<https://redwhitevalvecorp.com/product/211bbronze-globe-valve/>

## Foot Valves

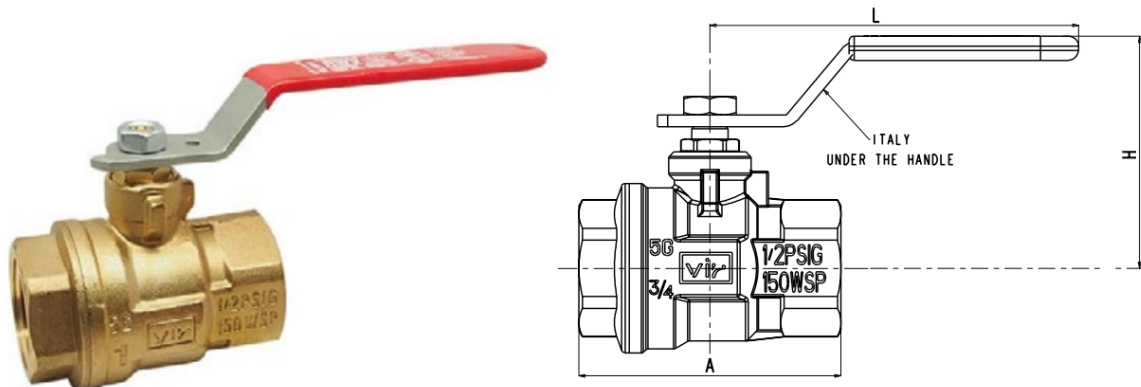


### IMPORT VALVES

Part No.	A Diameter In.	B Length In.
7402	1 1/2	3 1/2
7403	1 7/8	4 1/2
7405	2 1/16	4 7/8
7406	2 3/8	6
7407	3 1/16	6 3/8

Figura AIV.2: Dimensiones de las válvulas de pie SIMMONS

Fuente adaptada de: Especificaciones de las válvulas de pié SIMMONS,  
<https://www.simmonsmsg.com/index.php/specifications/dimensions/>



Size	Φ	A [in]	C [in]	H [in]	L [in]	P [in]	Cv	Wt. [lb]
1/4"	1/4 - 18 NPT	1.73	0.45	1.55	3.19	0.39	8	0.34
3/8"	3/8 - 18 NPT	1.73	0.45	1.55	3.19	0.39	8	0.32
1/2"	1/2 - 14 NPT	2.13	0.55	2.13	3.60	0.59	15	0.58
3/4"	3/4 - 14 NPT	2.56	0.59	2.26	3.60	0.79	30	0.86
1"	1 - 11.5 NPT	2.92	0.71	2.57	4.98	0.98	60	1.34
1 1/4"	1 1/4 - 11.5 NPT	3.39	0.73	2.79	4.98	1.26	110	2.14
1 1/2"	1 1/2 - 11.5 NPT	3.90	0.77	3.28	5.57	1.57	130	3.12
2"	2 - 11.5 NPT	4.45	0.81	3.58	5.57	1.97	360	4.82
2 1/2"	2 1/2 - 8 NPT	6.02	1.18	4.70	11.07	2.56	450	9.78
3	3 - 8 NPT	6.81	1.22	5.15	11.07	3.15	620	13.9
4	4 - 8 NPT	7.64	1.32	5.64	11.07	3.94	1200	20.4

Figura AIV.3: Dimensiones de las válvulas de esfera RED-WHITE

Fuente adaptada de: Especificaciones de la Válvula de esfera RED-WHITE 5044F,

<https://redwhitevalvecorp.com/pdfs/5044F.pdf>

**TUBERÍA PARA AGUA POTABLE**




DIÁMETRO NOMINAL Tubo 6 m. con campana	315 PSI, SDR 13.5	250 PSI, SDR 17	160 PSI, SDR 26	125 PSI, SDR 32.5	100 PSI, SDR 41	80 PSI, SDR 51	63 PSI, SDR 64
1/2"	<b>915076</b> \$6.18						
3/4"		<b>915098</b> \$7.88					
1"		<b>915105</b> \$11.55	<b>915176</b> \$9.13				
1 1/4"		<b>915116</b> \$18.71	<b>915189</b> \$12.38				
1 1/2"		<b>915119</b> \$24.41	<b>915194</b> \$16.18				
2"		<b>915121</b> \$38.28	<b>915198</b> \$25.20	<b>915258</b> \$22.93	<b>915321</b> \$17.41		<b>914931</b> \$16.54
2 1/2"		<b>915126</b> \$65.96	<b>915205</b> \$43.88				
3"		<b>915131</b> \$92.62	<b>915210</b> \$61.65	<b>915266</b> \$49.75	<b>915331</b> \$37.44	<b>915356</b> \$30.59	<b>914884</b> \$23.67
4"		<b>916472</b> \$152.29	<b>915155</b> \$101.60	<b>915218</b> \$81.73	<b>915276</b> \$62.75	<b>915337</b> \$52.01	<b>914881</b> \$38.72
6"		<b>915091</b> \$344.70	<b>915163</b> \$219.92	<b>915225</b> \$180.22	<b>915288</b> \$135.66		<b>914882</b> \$85.47
8"		<b>915099</b> \$593.16	<b>915170</b> \$396.16	<b>915231</b> \$318.59	<b>915296</b> \$243.35		<b>914883</b> \$135.70
10"		<b>915108</b> \$1,064.46	<b>915179</b> \$711.76	<b>915239</b> \$516.25	<b>915300</b> \$487.84		
12"		<b>915112</b> \$1,088.99	<b>915185</b> \$867.17		<b>915305</b> \$687.40		
15"				<b>916696</b> \$590.00			

Figura AIV.4: Oferta de tuberías de agua potable, Amanco.


Fuente: Catálogo de especificaciones y listado de precios. (2011) Amanco

**REDUCTOR SCH 40**  
Campana Cementada




X	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	6"	8"
1/2"	913110 \$0.32	908840 \$0.47	913120 \$0.87	913126 \$1.01	913134 \$1.94	913144 \$6.76	913155 \$5.02			
		908841 \$0.47	913122 \$0.87	913128 \$1.01	913136 \$1.94	913145 \$6.99	913156 \$7.22			
3/4"			913124 \$0.87	913130 \$1.01	913138 \$1.94	913147 \$5.84	913157 \$6.63			
				913132 \$1.01	913140 \$2.00	913149 \$5.84	913159 \$7.31			
1"					913142 \$1.94	913151 \$6.78	913160 \$6.64			
1 1/4"										
1 1/2"										
2"						913153 \$7.01	913162 \$7.24	913098 \$10.41	913108 \$29.42	
2 1/2"							913164 \$7.33	913099 \$15.92		
3"								913101 \$12.60	913109 \$29.49	
4"									913107 \$31.08	913112 \$102.84
6"										913113 \$102.84

**TE REDUCTORA**  
Campana Cementada




X	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	6"	8"
1/2"	914483 \$1.21	914492 \$1.58	914497 \$3.20	914501 \$3.72	914508 \$5.34	914517 \$11.88	914522 \$17.21	914474 \$33.68		
		914493 \$1.58	914499 \$3.20	914503 \$3.72	914510 \$5.34	914518 \$11.31	914472 \$17.25	914475 \$33.68		
3/4"										
1"			914500 \$3.20	914504 \$4.45	914512 \$5.29	914375 \$13.20	914523 \$17.21	914476 \$33.68		
1 1/4"				914506 \$4.45	914514 \$5.29	914519 \$11.91	914525 \$17.25			
1 1/2"					914515 \$5.29	914520 \$11.91	914526 \$17.21	914477 \$33.68		
2"						914521 \$11.88	914378 \$17.21	914478 \$37.33	914481 \$90.26	
3"								914479 \$37.33	914482 \$90.26	
4"									914480 \$90.26	914485 \$155.12
6"										914486 \$349.18

**ADAPTADOR MACHO**  
Rosca/Campana cementada




Unid x Caja	CÓDIGO	DIÁMETRO	PRECIO
1,200	909159	1/2"	\$0.30
600	909163	3/4"	\$0.42
400	909165	1"	\$0.70
360	909166	1 1/4"	\$1.10
150	909167	1 1/2"	\$1.20
160	909168	2"	\$1.89
75	909169	2 1/2"	\$4.99
45	909170	3"	\$6.79
24	909158	4"	\$9.42
	909162	6"	\$39.95
	909164	8"	\$118.20

**ADAPTADOR HEMBRA**  
Rosca/Campana Cementada




Unid x Caja	CÓDIGO	DIÁMETRO	PRECIO
800	909106	1/2"	\$0.41
480	909109	3/4"	\$0.54
300	909111	1"	\$0.93
200	909112	1 1/4"	\$1.21
150	909113	1 1/2"	\$1.46
100	909114	2"	\$1.89
40	909115	2 1/2"	\$5.83
28	909116	3"	\$10.20
16	909105	4"	\$10.92
	909108	6"	\$39.43
	909110	8"	\$74.52

**CODO 90°**  
Campana Cementada




Unid x Caja	CÓDIGO	DIÁMETRO	PRECIO
500	908582	1/2"	\$0.32
350	908585	3/4"	\$0.70
200	908579	1"	\$1.21
125	908581	1 1/4"	\$1.93
80	908580	1 1/2"	\$2.39
40	908889	2"	\$3.81
	908583	2 1/2"	\$11.21
15	908584	3"	\$11.77
6	908586	4"	\$21.14
	909882	6"	\$57.86
	909884	8"	\$160.70

**UNIÓN UNIVERSAL**  
Con rosca



CÓDIGO	DIÁMETRO	PRECIO
915722	1/2"	\$7.39
915728	1"	\$10.98
915730	1 1/4"	\$18.86
915723	1 1/2"	\$28.62
908958	2"	\$36.70
915732	2 1/2"	\$56.46
915734	3"	\$65.73
915726	4"	\$66.32

**TEE**  
Campana Cementada

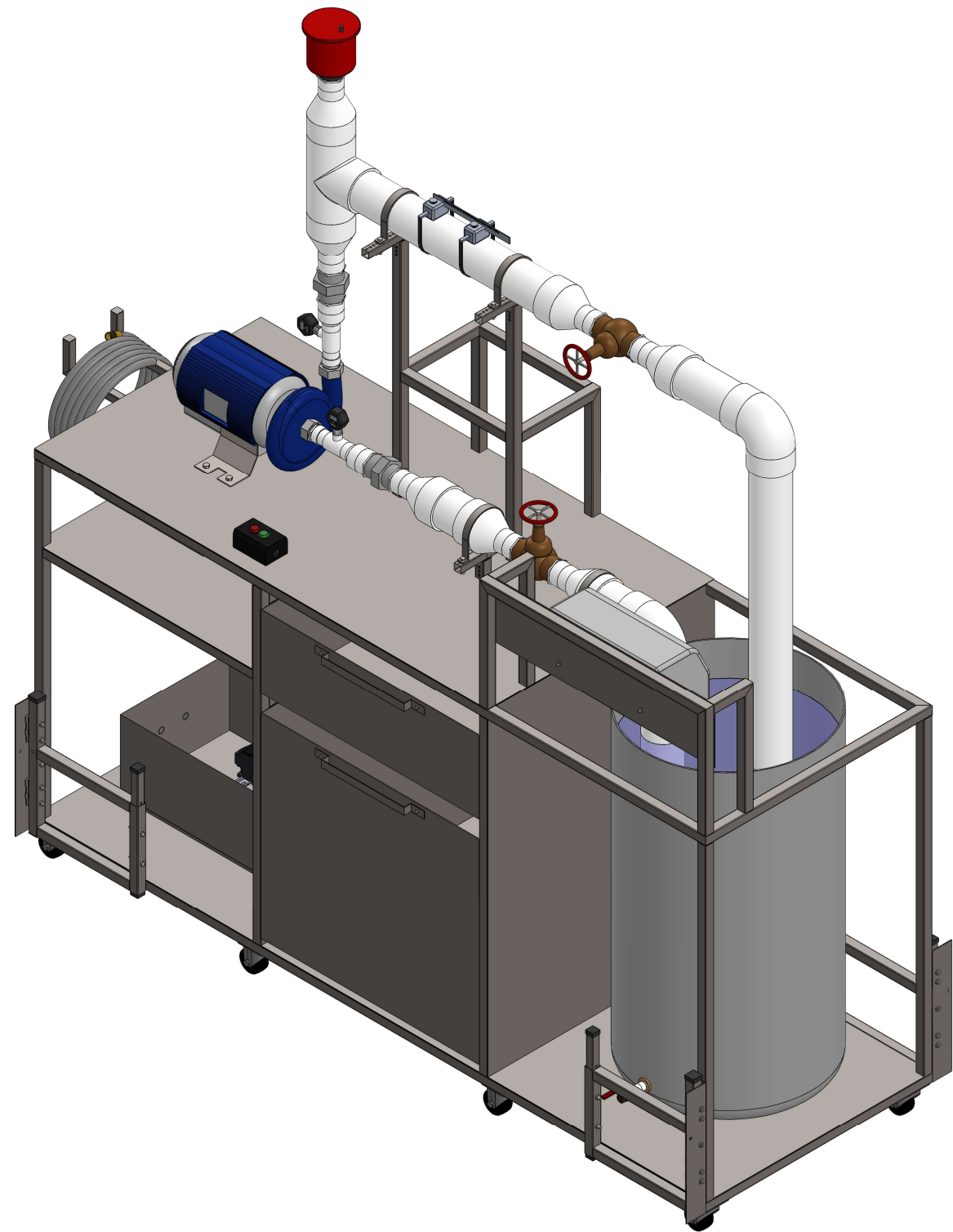


Unid x Caja	CÓDIGO	DIÁMETRO	PRECIO
400	914355	1/2"	\$0.63
225	914360	3/4"	\$0.89
125	914363	1"	\$1.42
80	914367	1 1/4"	\$2.25
50	914369	1 1/2"	\$2.95
25	914371	2"	\$4.33
22	914373	2 1/2"	\$14.00
11	914376	3"	\$16.19
6	914352	4"	\$31.21
	914358	6"	\$90.78
	914362	8"	\$227.85

Figura AIV.5: Oferta de accesorios para tuberías de agua potable, Amanco.

Fuente: Catálogo de especificaciones y listado de precios. (2011) Amanco

# **Anexo V: Planos de diseño**

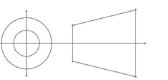


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

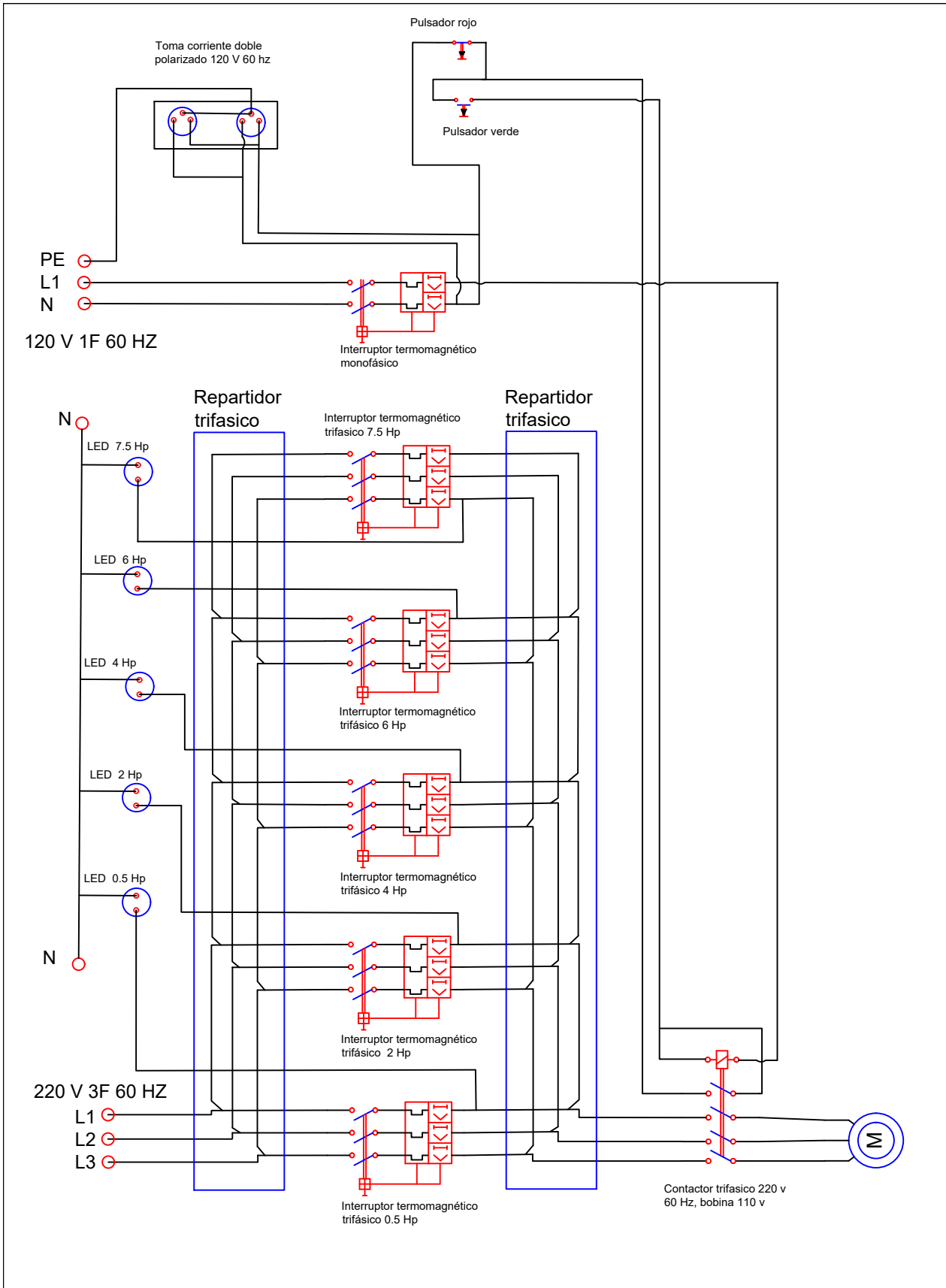
Escala  
1:16

## Banco de ensayos para pruebas de cavitación



Plano 1/29



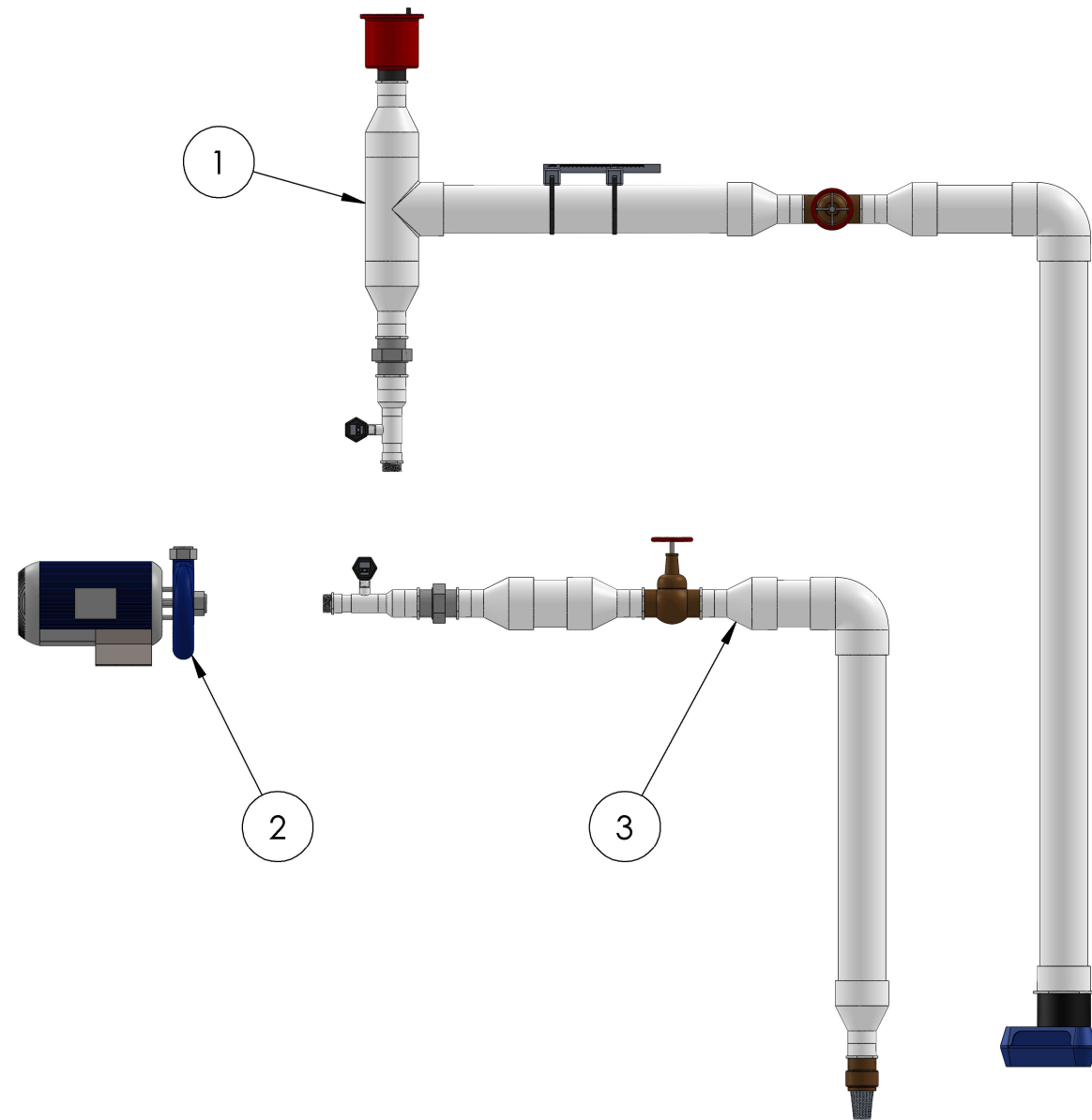


Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas

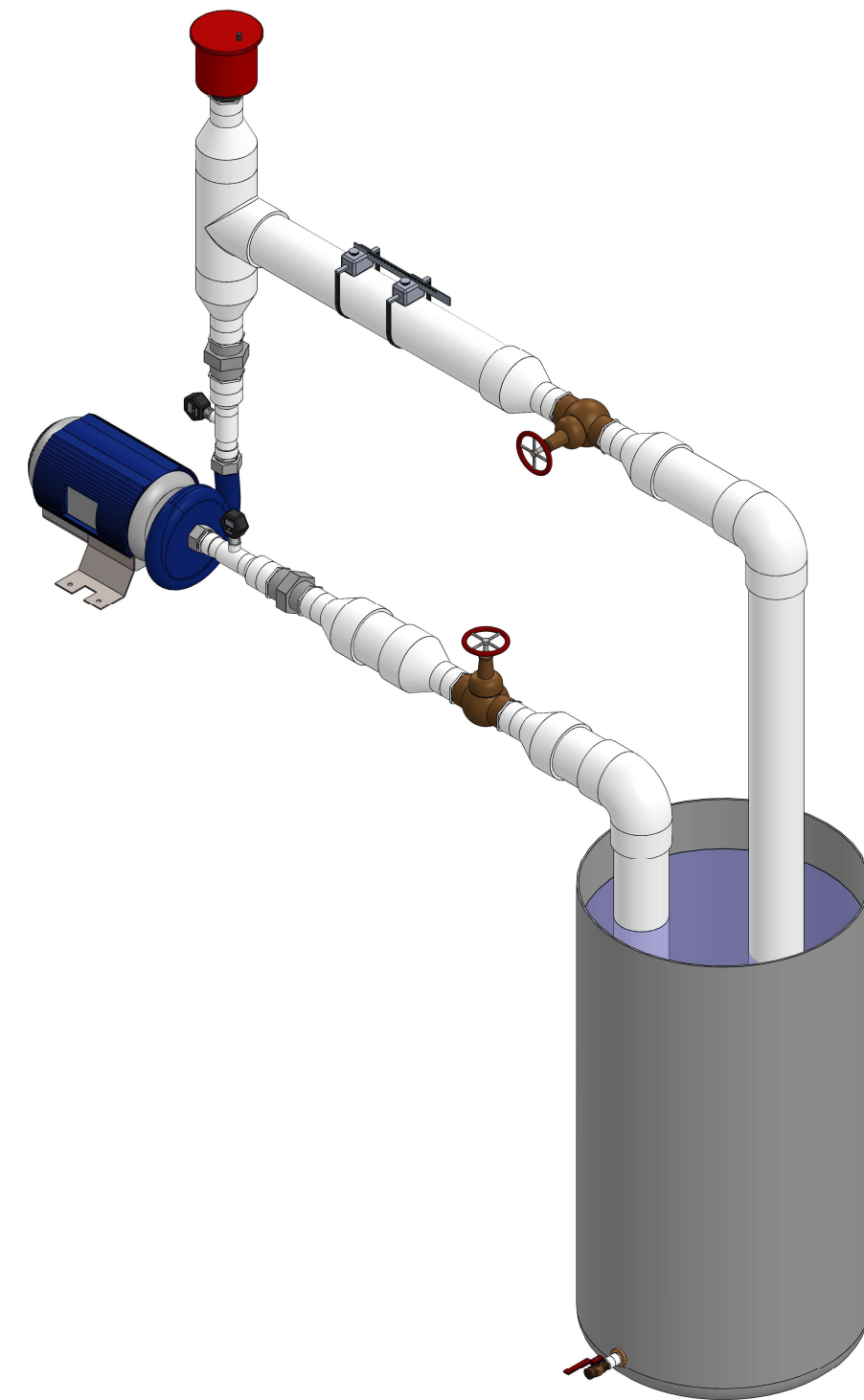
Escala  
 Sin escala

### DIAGRAMA MULTIFILAR

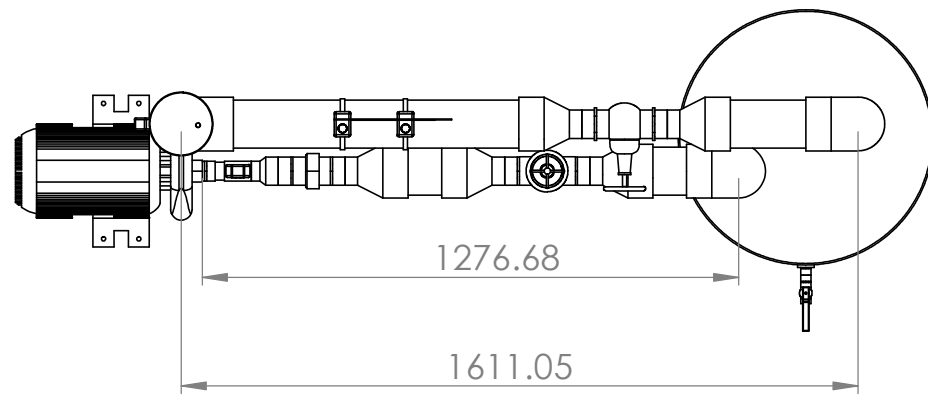


Vista Explosionada  
Escala 1: 17

Nº	COMPONENTE
1	Red de tuberías de impulsión
2	Bomba centrífuga
2	Red de tuberías de succión
4	Tanque de reserva

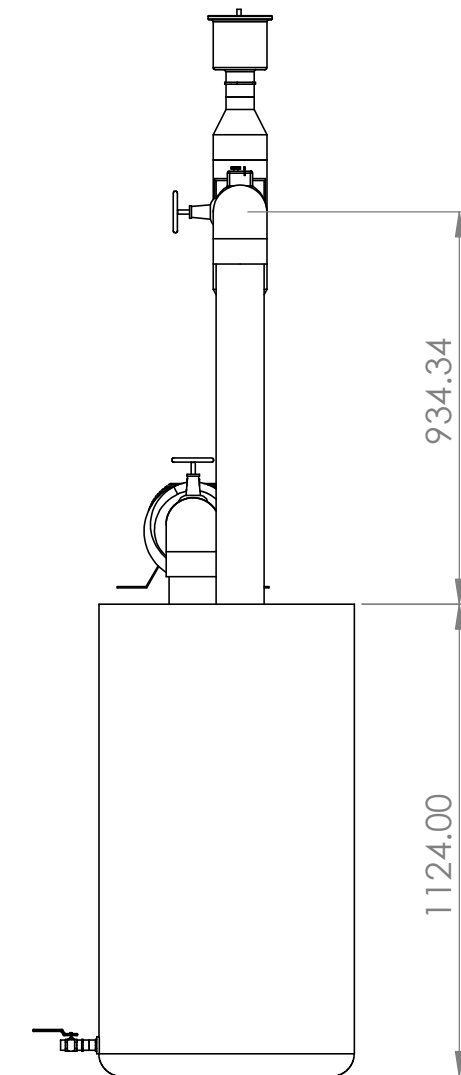
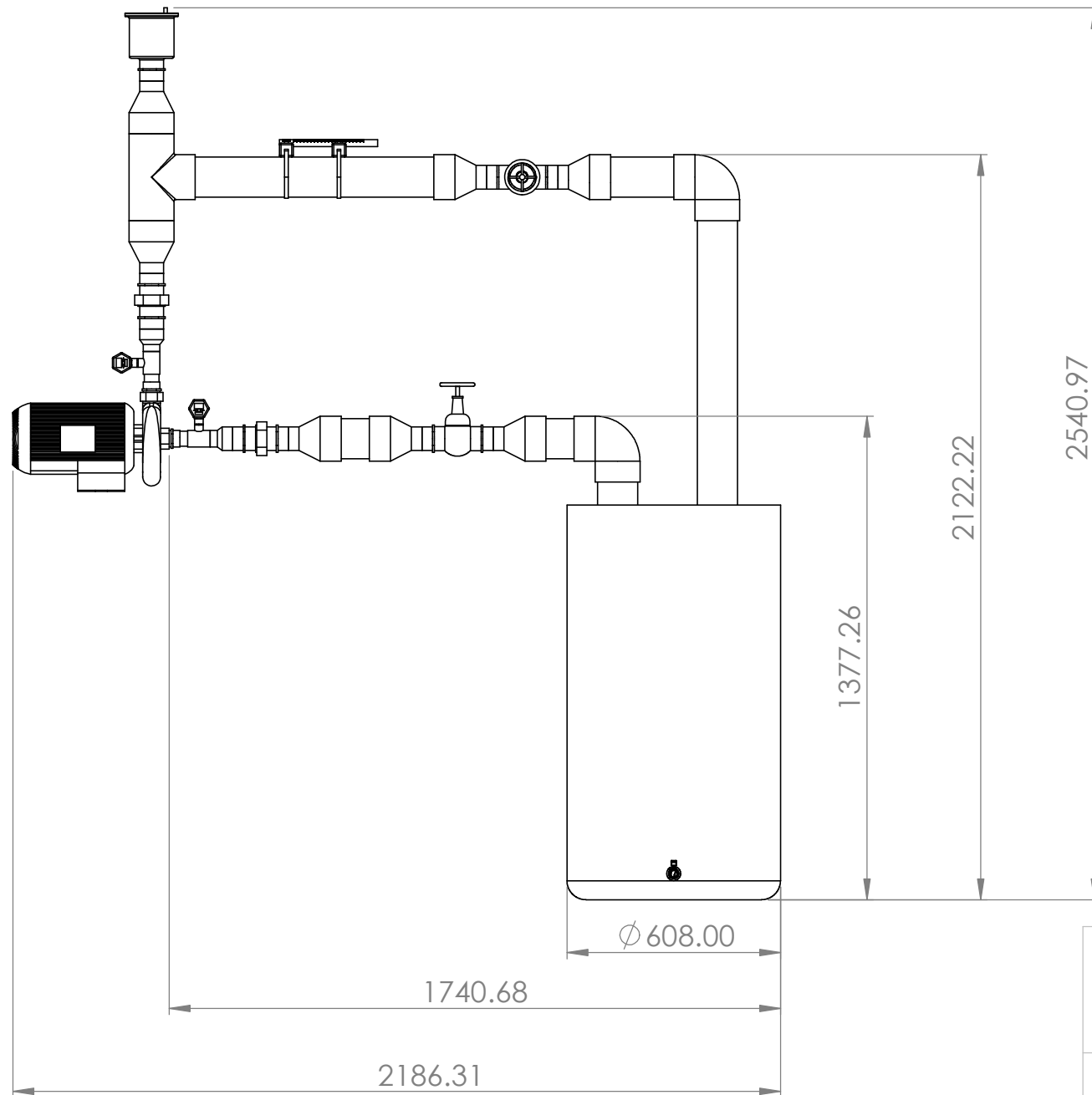


	Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica Departamento de Sistemas Fluidomecánicos	Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas
	Escala 1:15	<b>Red de tuberías</b>



**Nota:**

- Tuberías con 4 in de diámetro nominal
- Cotas en milímetros

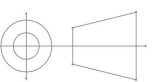


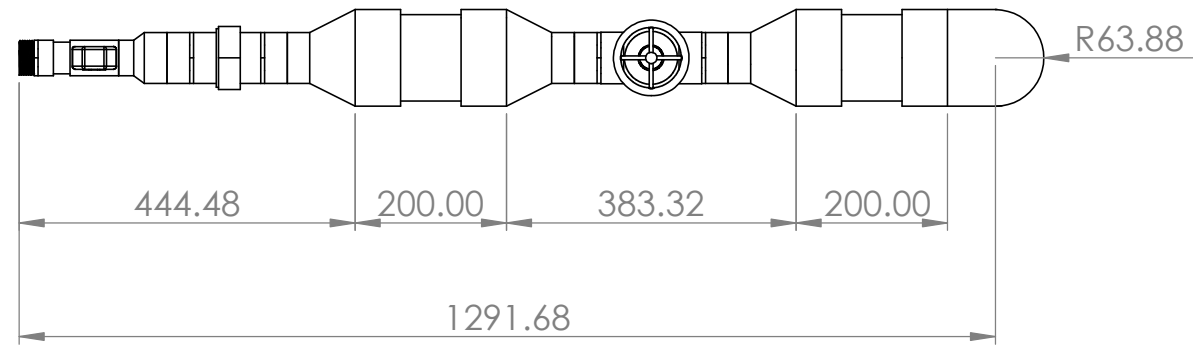
Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
 1:18

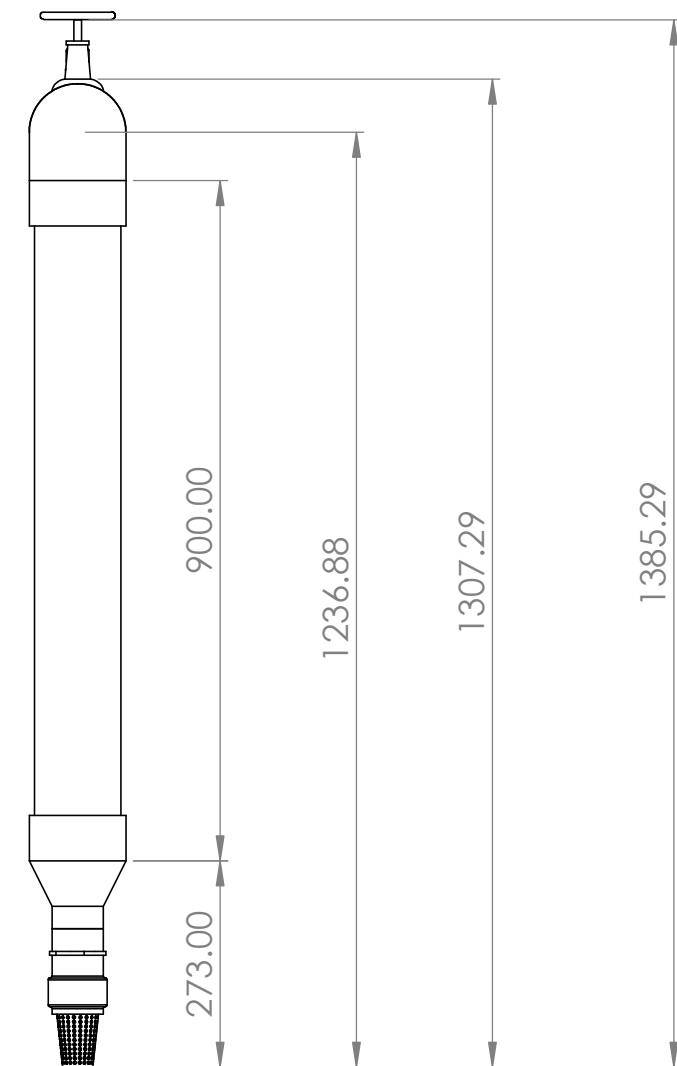
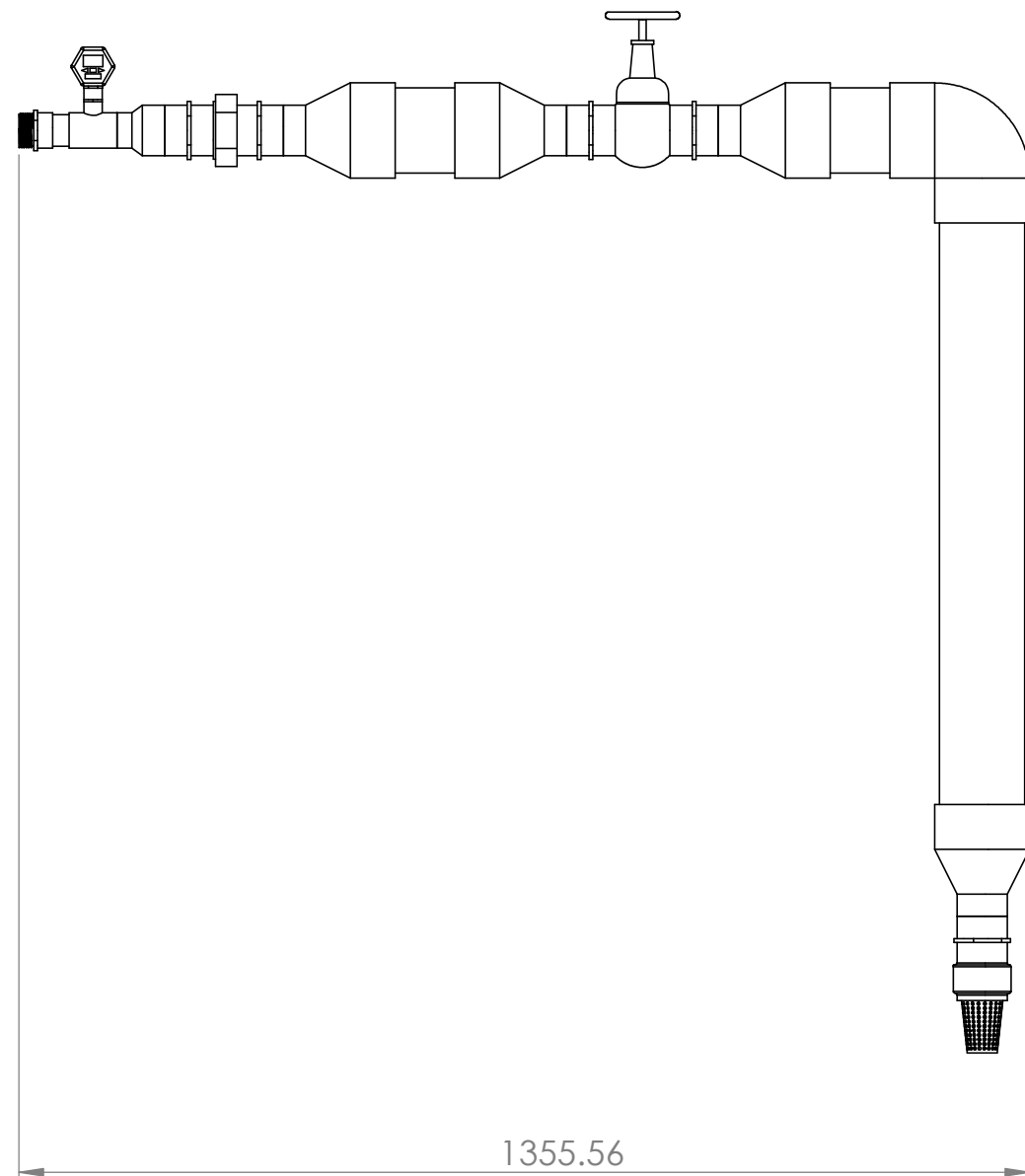
**Red de tuberías: Dimensiones**





**Nota:**

- Tuberías con 4 in de diámetro nominal
- Cotas en milímetros

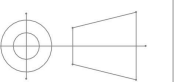


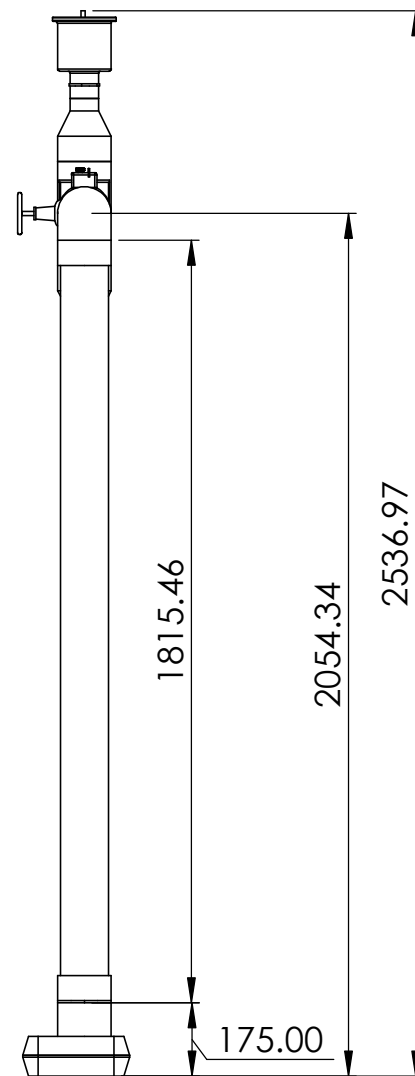
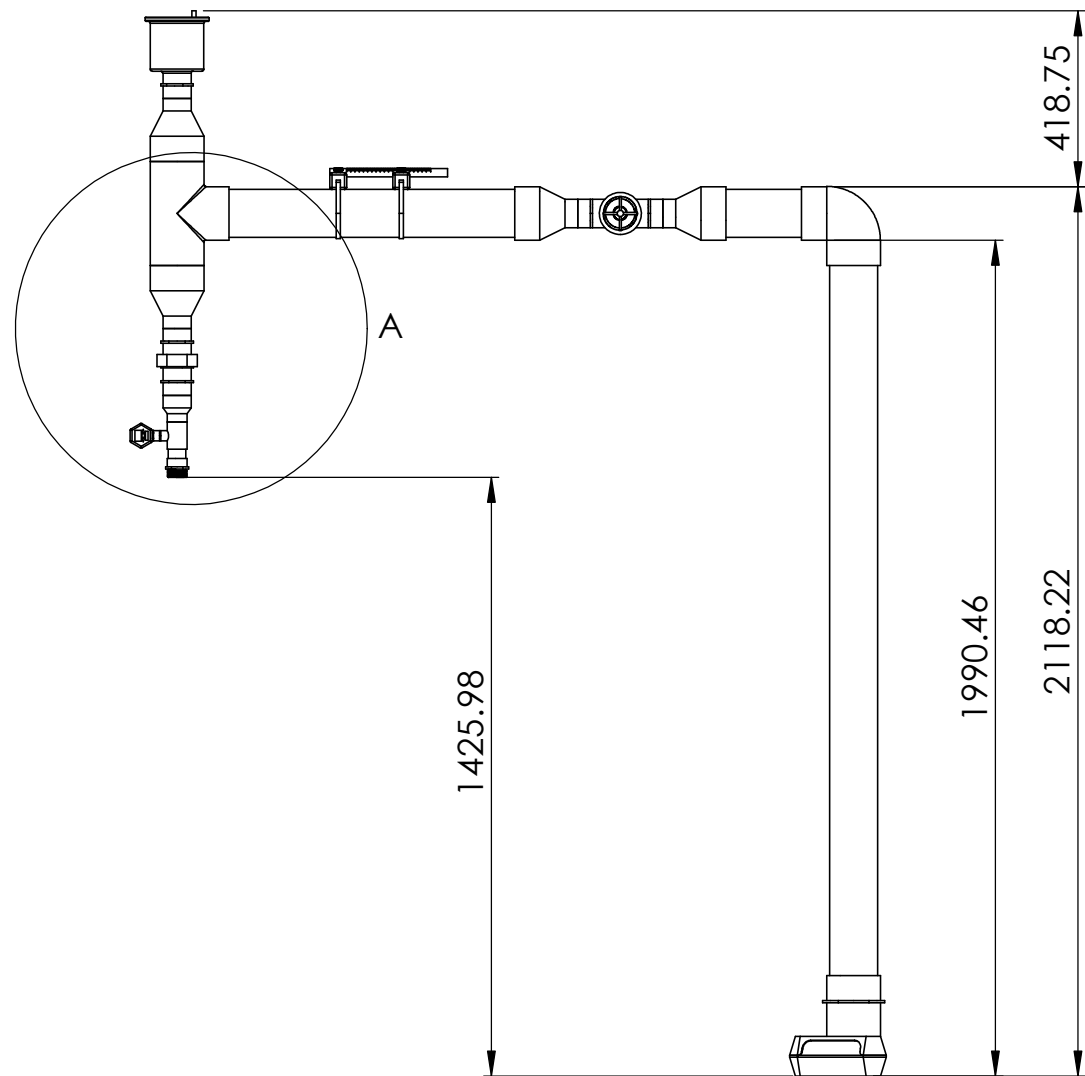
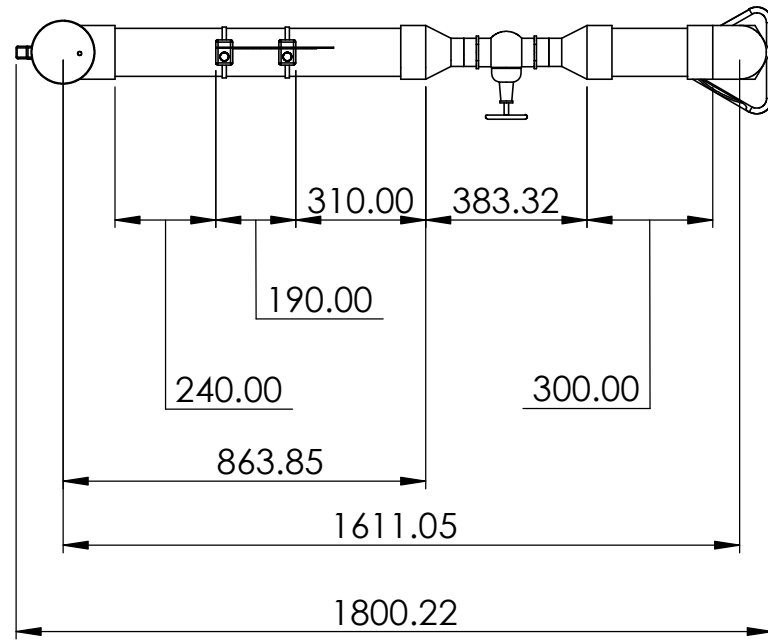
Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
 1:10

**Tubería de succión: Dimensiones**

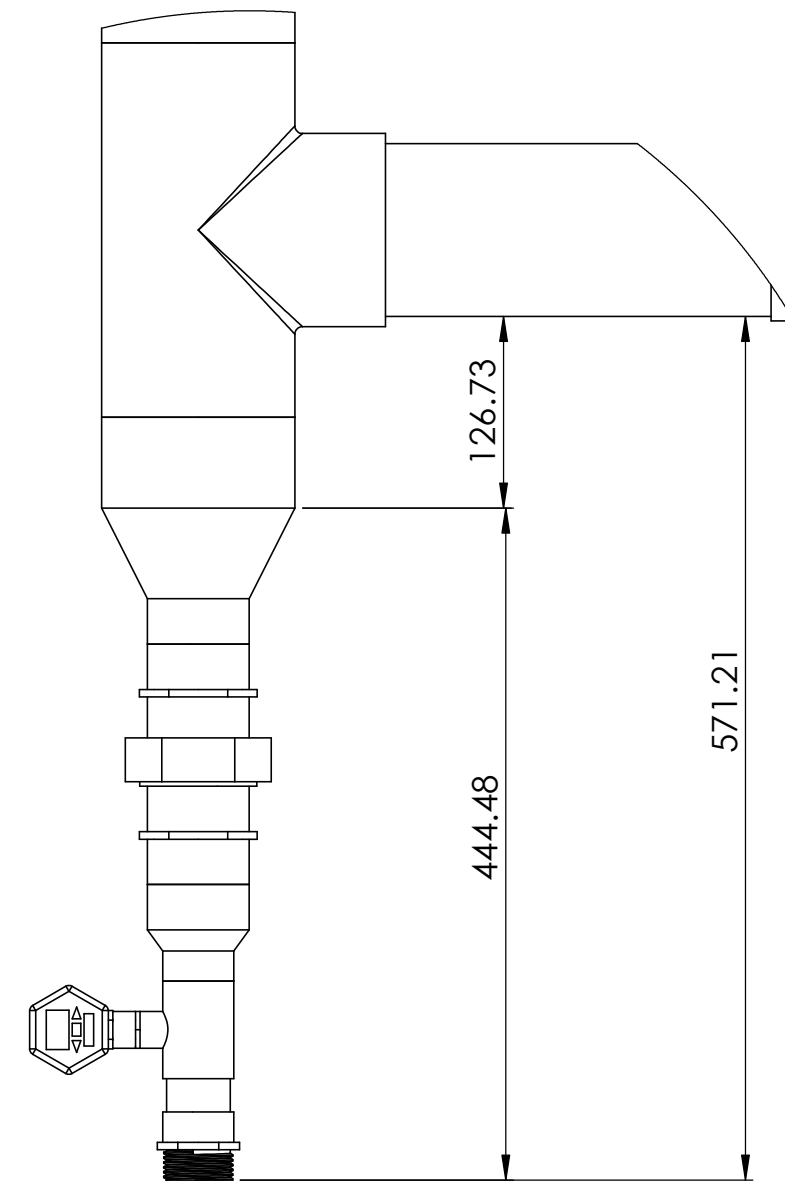




Notas:

- Tuberías de PVC con 4 in de diámetro nominal
- Cotas en milímetros

DETALLE A  
ESCALA 1 : 5

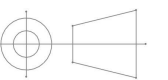


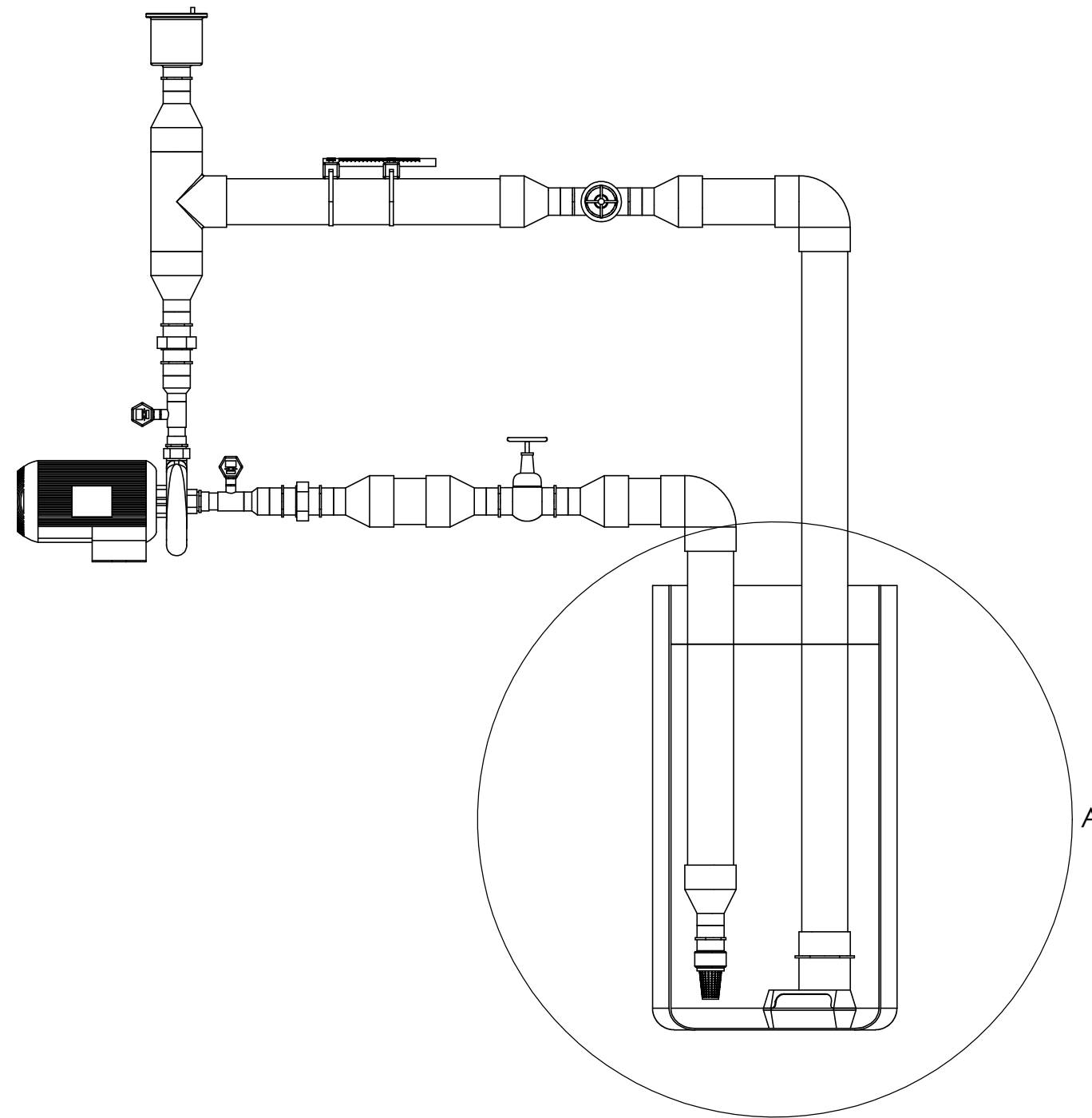
Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
1:18

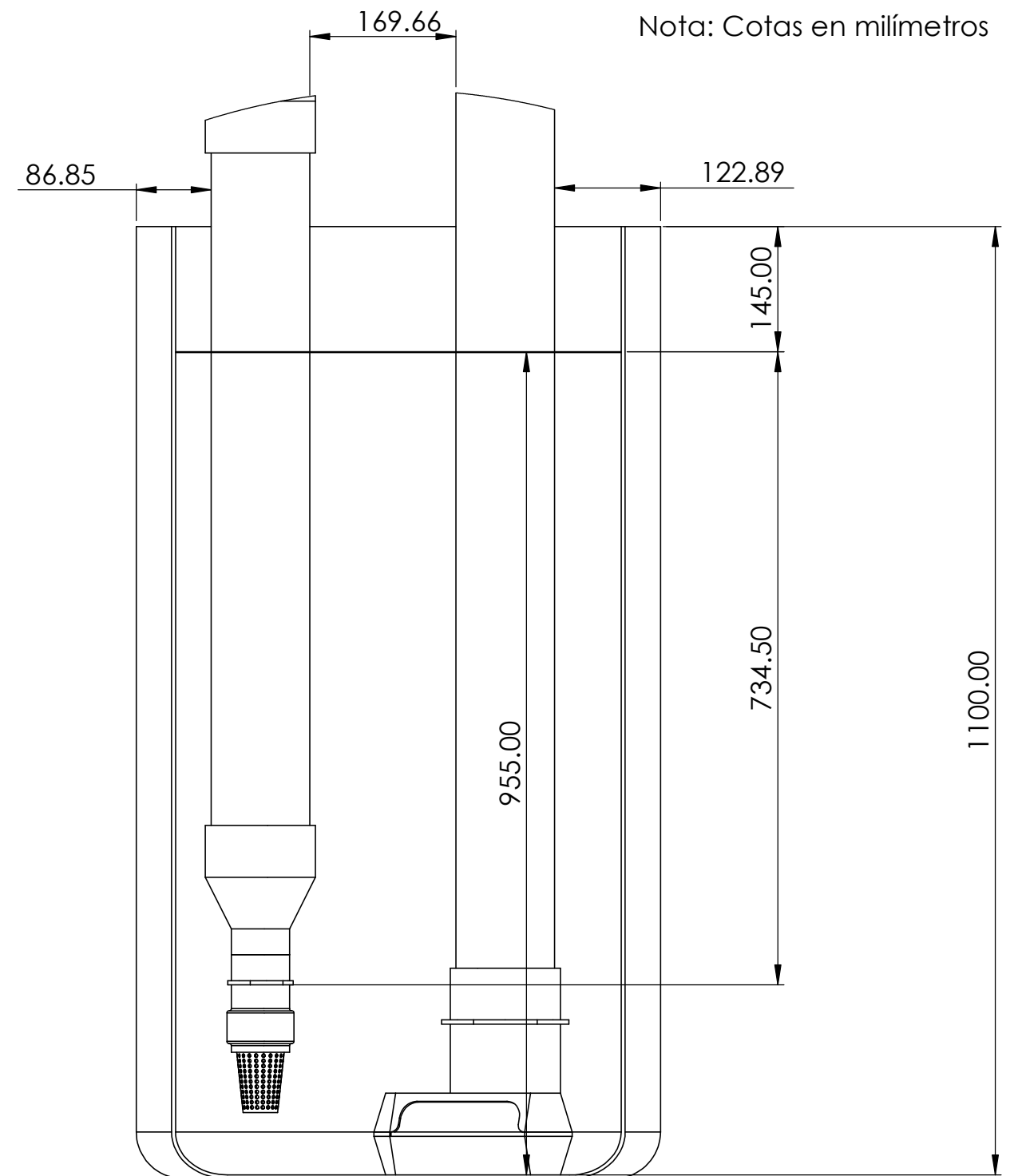
### Tubería de impulsión: Dimensiones





DETALLE A  
ESCALA 1 : 7

Nota: Cotas en milímetros

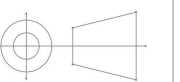


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

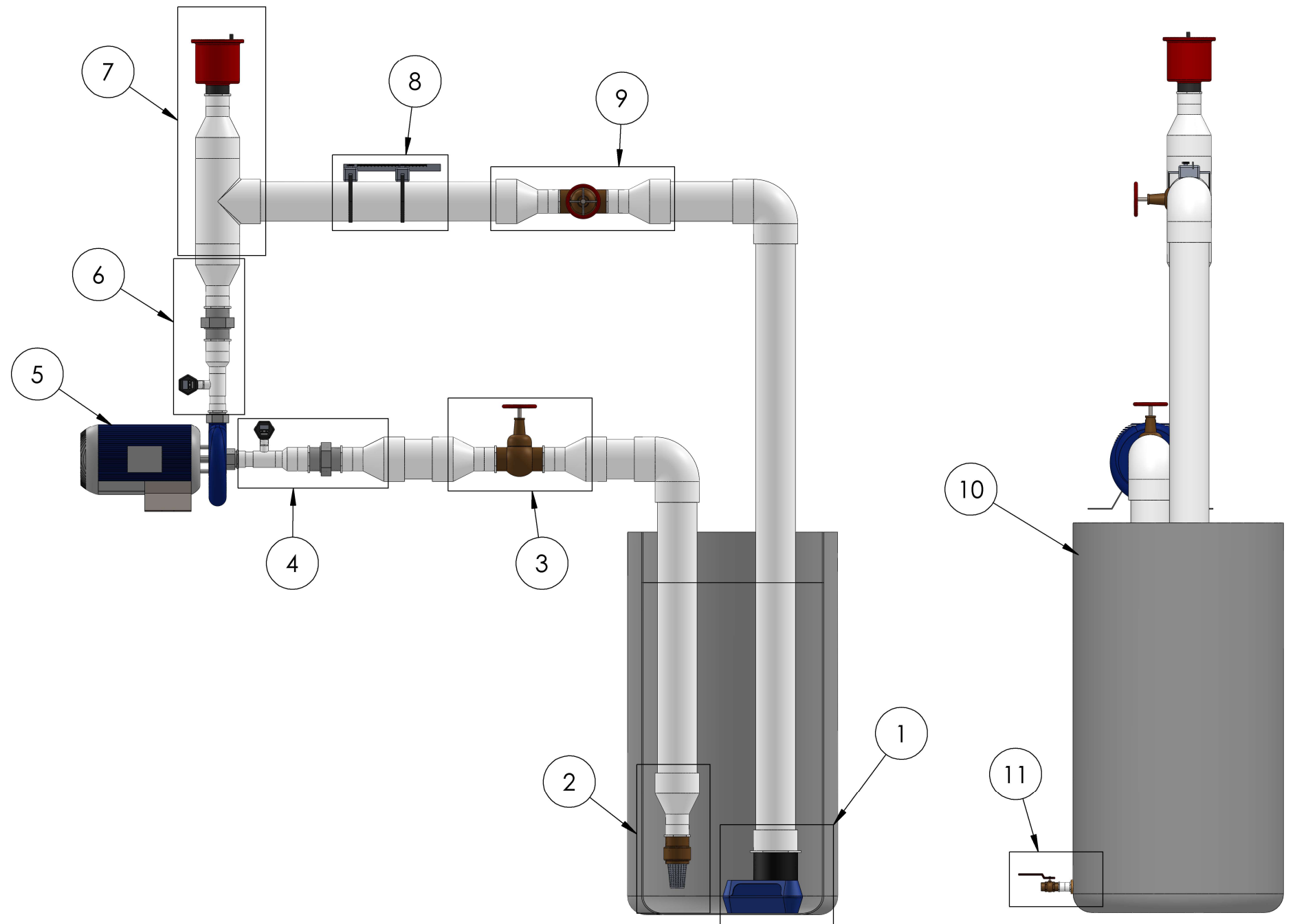
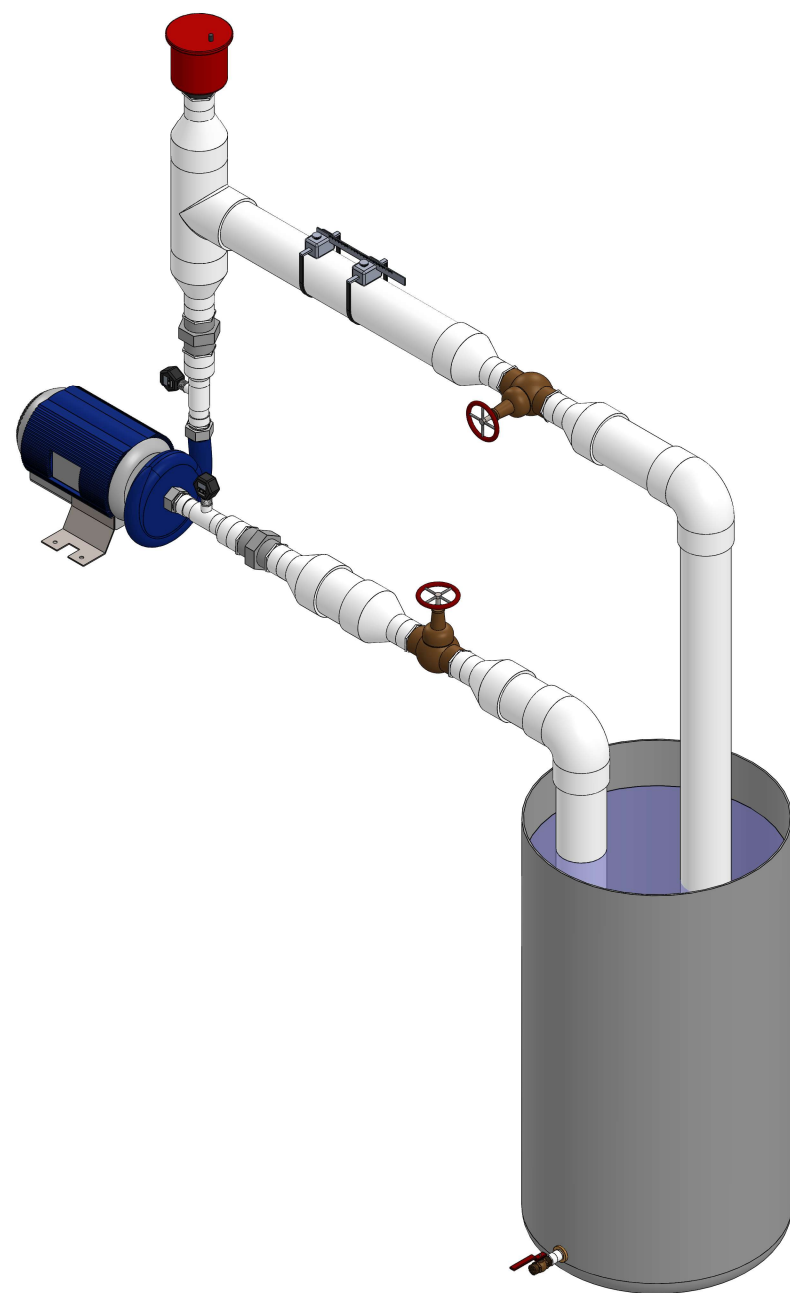
Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
1:15

### Instalación del tanque de reserva: Dimensiones



INSTALACIONES Y COMPONENTES	
Nº	NOMBRE
1	Instalación del reductor de turbulencias
2	Instalación de la válvula de Pie
3	Instalación de la válvula reguladora V1
4	Instalación del vacuómetro
5	Bomba centrífuga
6	Instalación del manómetro
7	Instalación de la válvula desairadora
8	Instalación de los sensores del caudalímetro
9	Instalación de la válvula reguladora V2
10	Tanque de reserva
11	Drenaje del tanque



**Nota:** Tuberías con diámetro nominal de 4 in

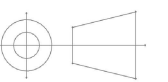


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

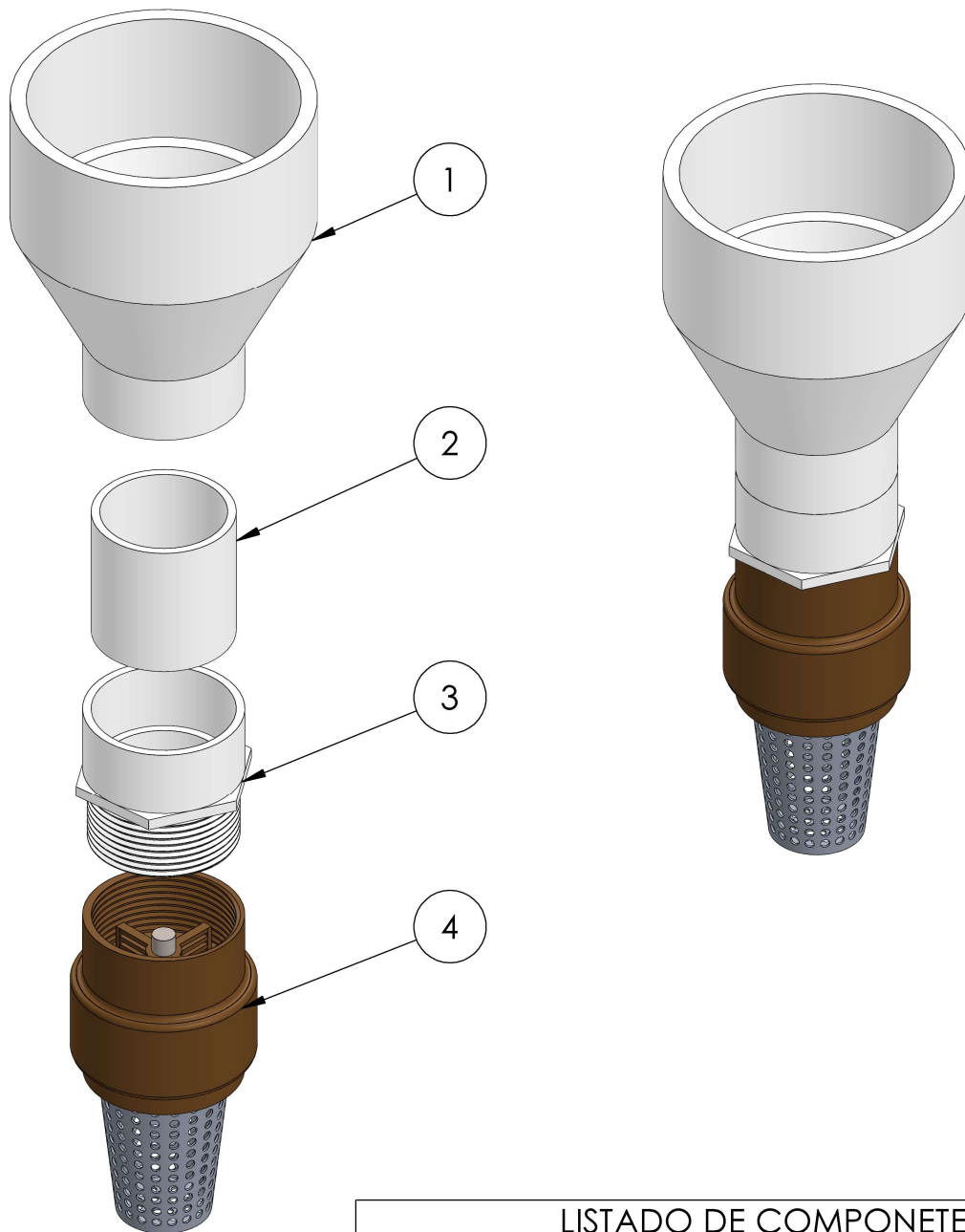
Escala  
1:15

**Red de tuberías: Instalaciones y componentes**



Plano 9 / 29

## Vista Explosionada



### LISTADO DE COMPONENTES

Nº	NOMBRE	Material	CANT.
1	Reductor de sección (4 - 2 in)	PVC	1
2	Segmento de tubería (2 in)	PVC	1
3	Adaptador macho (2 in)	PVC	1
4	Válvula de pie (2 in)	Bronce	1



Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

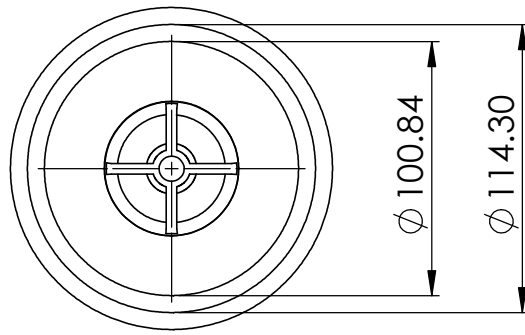
Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
 1:3

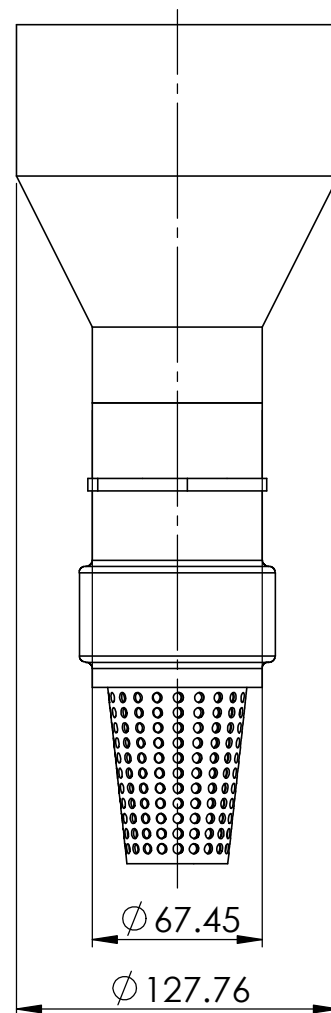
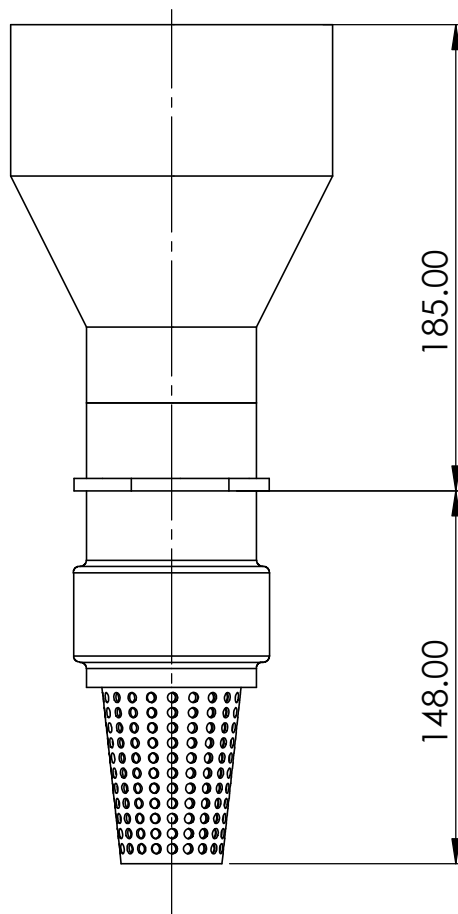
## Instalación de la válvula de pie



Plano 10/29



Nota: Cotas en milímetros

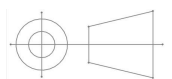


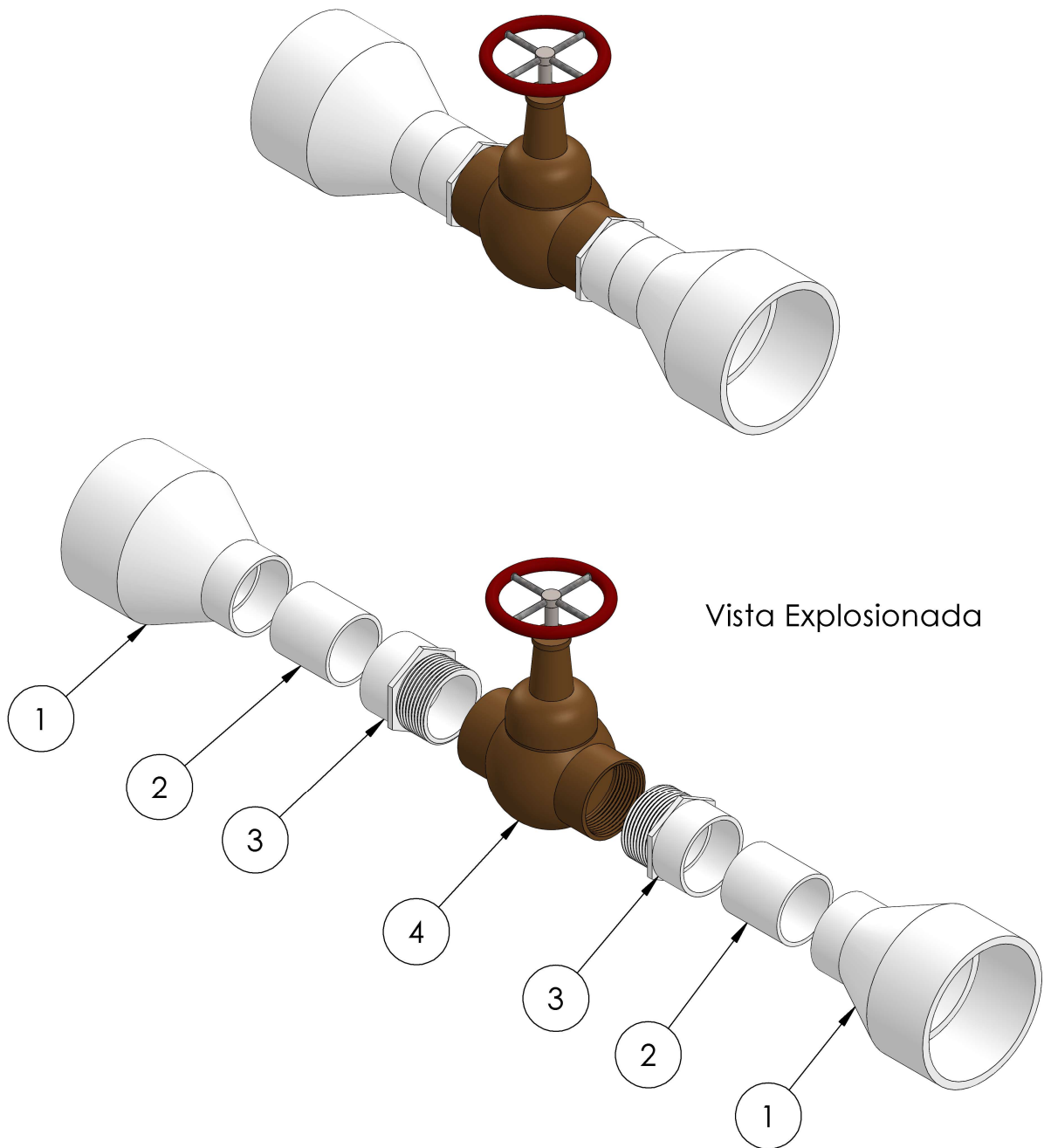
Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
 1:3

### Instalación de la válvula de pie: Dimensiones





Vista Explosionada

LISTADO DE COMPONENTES			
Nº	NOMBRE	Material	CANT.
1	Reductor de sección (4 - 2 in)	PVC	2
2	Segmento de tubería (2 in)	PVC	2
3	Adaptador macho (2 in)	PVC	2
4	Válvula de globo (2 in)	Bronce	1

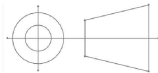


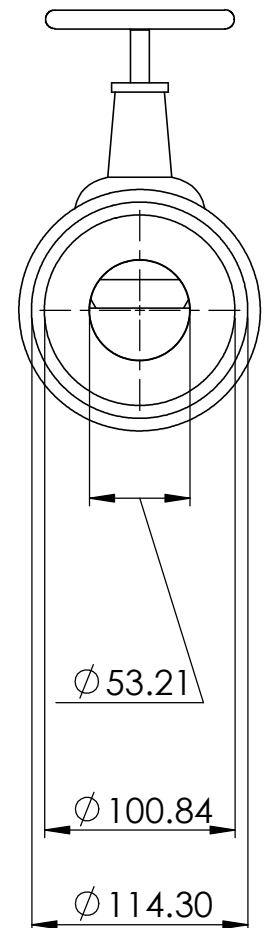
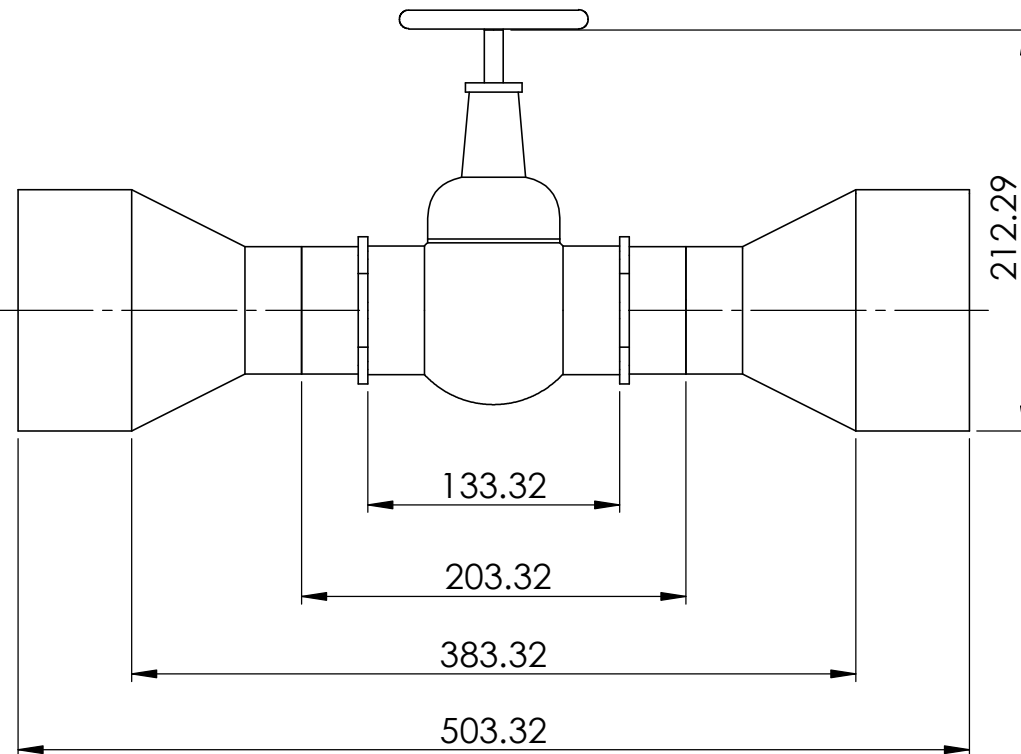
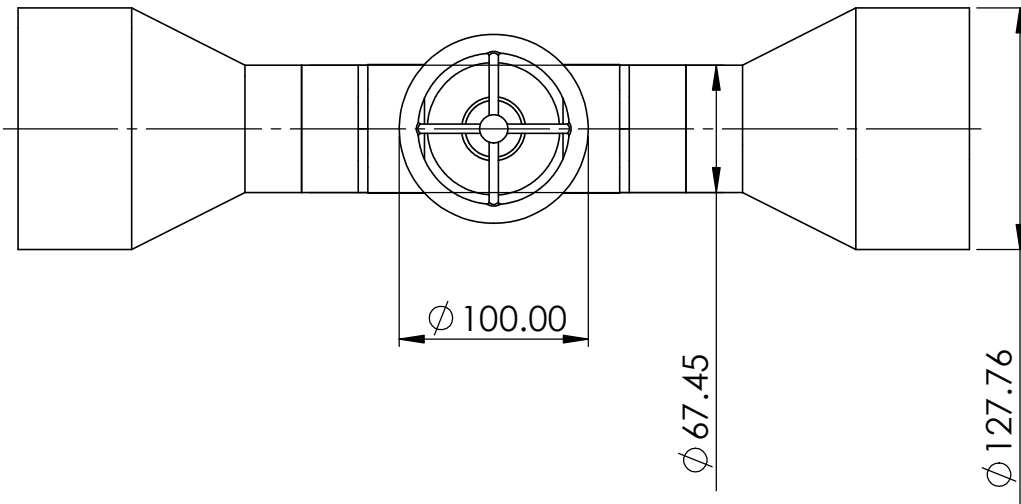
Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
 1:7

### Instalación de las válvulas reguladoras





Nota: Cotas en milímetros



Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

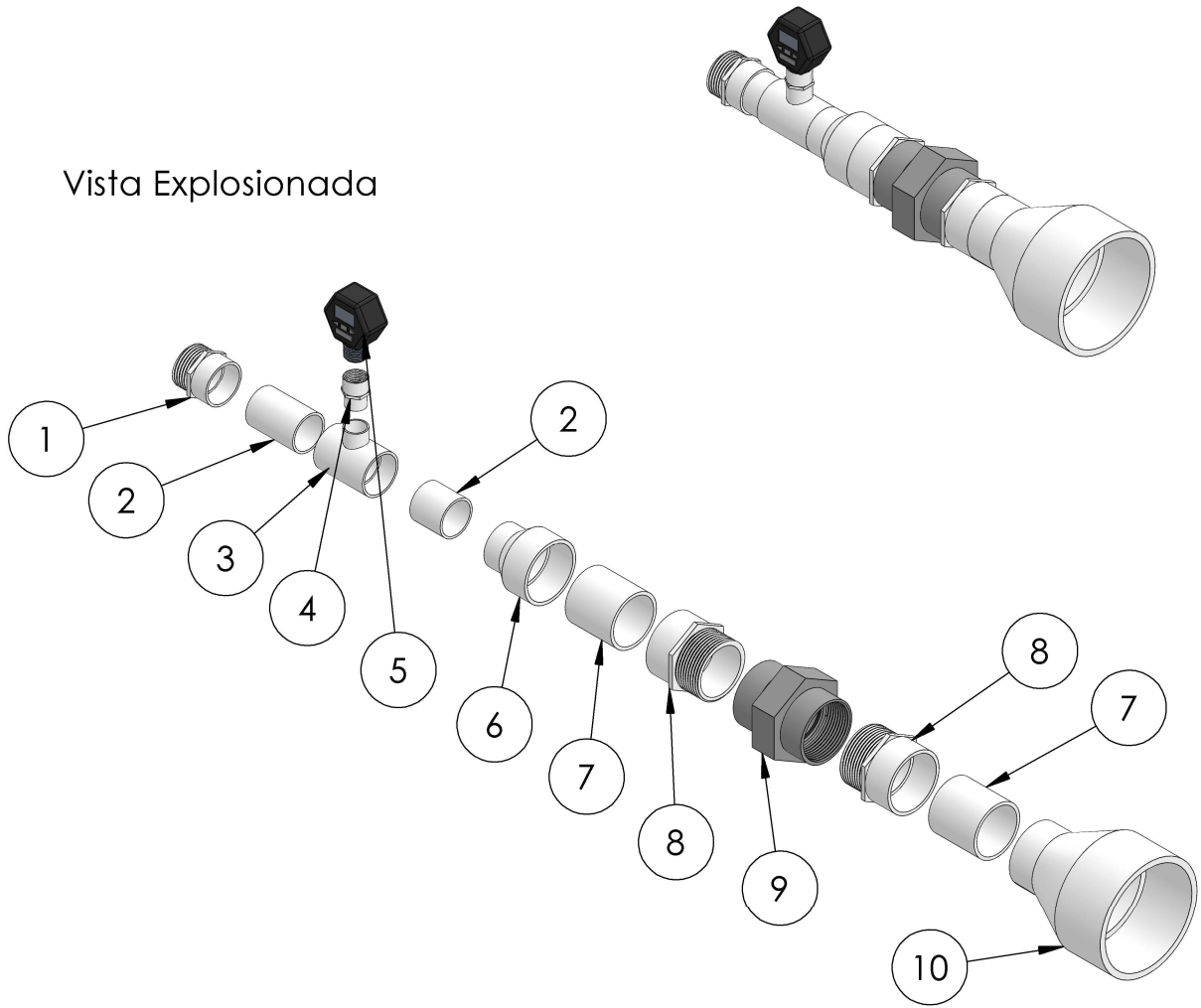
Escala  
 1:4

## Instalación de las válvulas reguladoras: Dimensiones



Plano 13/29

Vista Explosionada



LISTADO DE COMPONENTES			
Nº	NOMBRE	Material	CANT.
1	Adaptador macho (1 1/4 in)	Bronce	1
2	Segmento de tubería (1 1/4 in)	PVC	2
3	TEE reductora (4 - 1/2 in)	PVC	1
4	Adaptador macho (1/2 in)	PVC	1
5	Manómetro/Vacuómetro	---	1
6	Reductor de sección (2 - 1 1/4 in)	PVC	1
7	Segmento de tubería (2 in)	PVC	1
8	Adaptador macho (2 in)	PVC	2
9	Unión universal (2 in)	PVC	1
10	Reductor de sección (4 - 2 in)	PVC	1

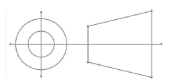


Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

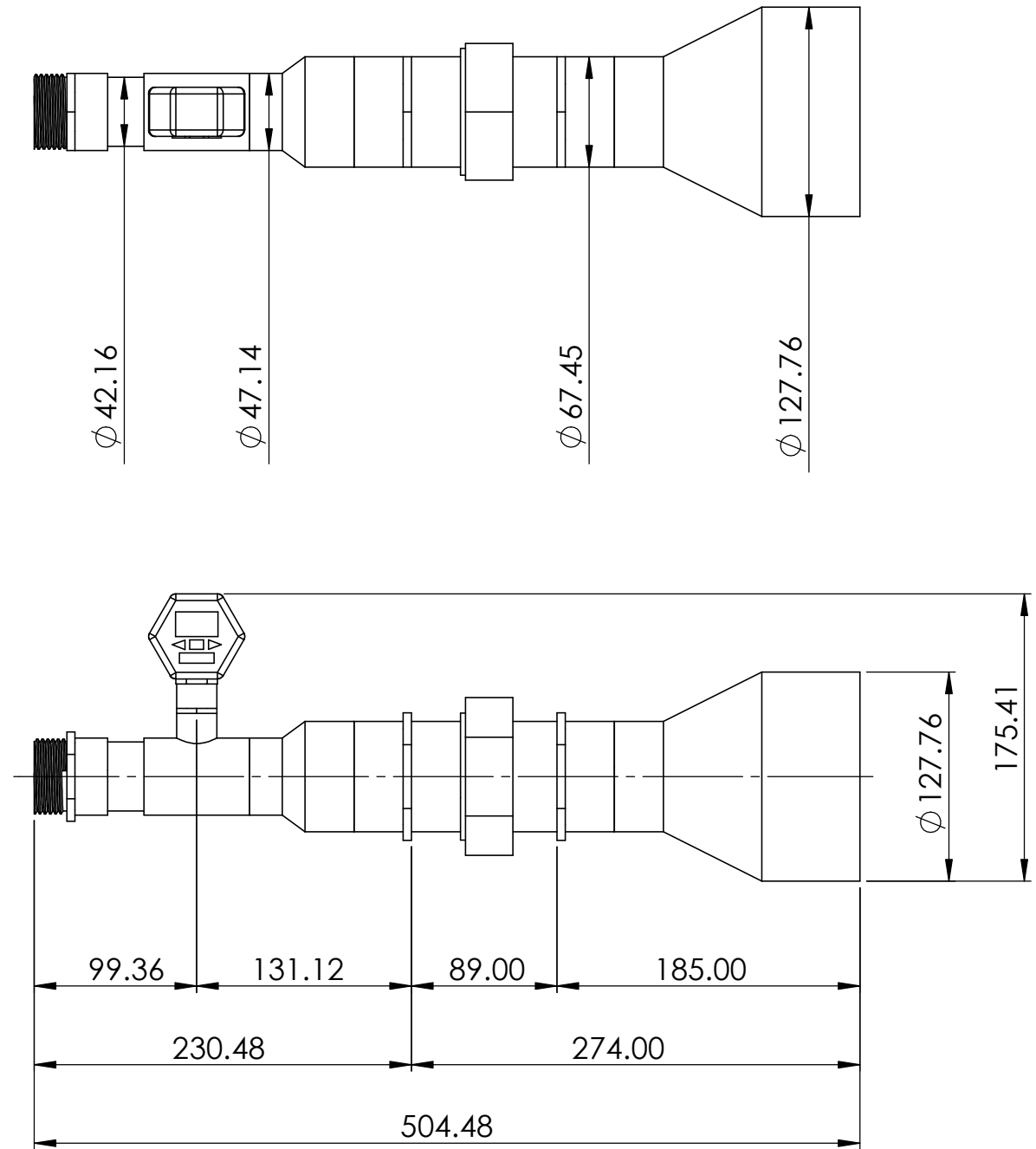
Escala  
 1:7

## Instalación de los medidores de presión



Plano 14/29

Nota: Cotas en milímetros

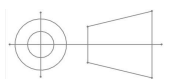


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

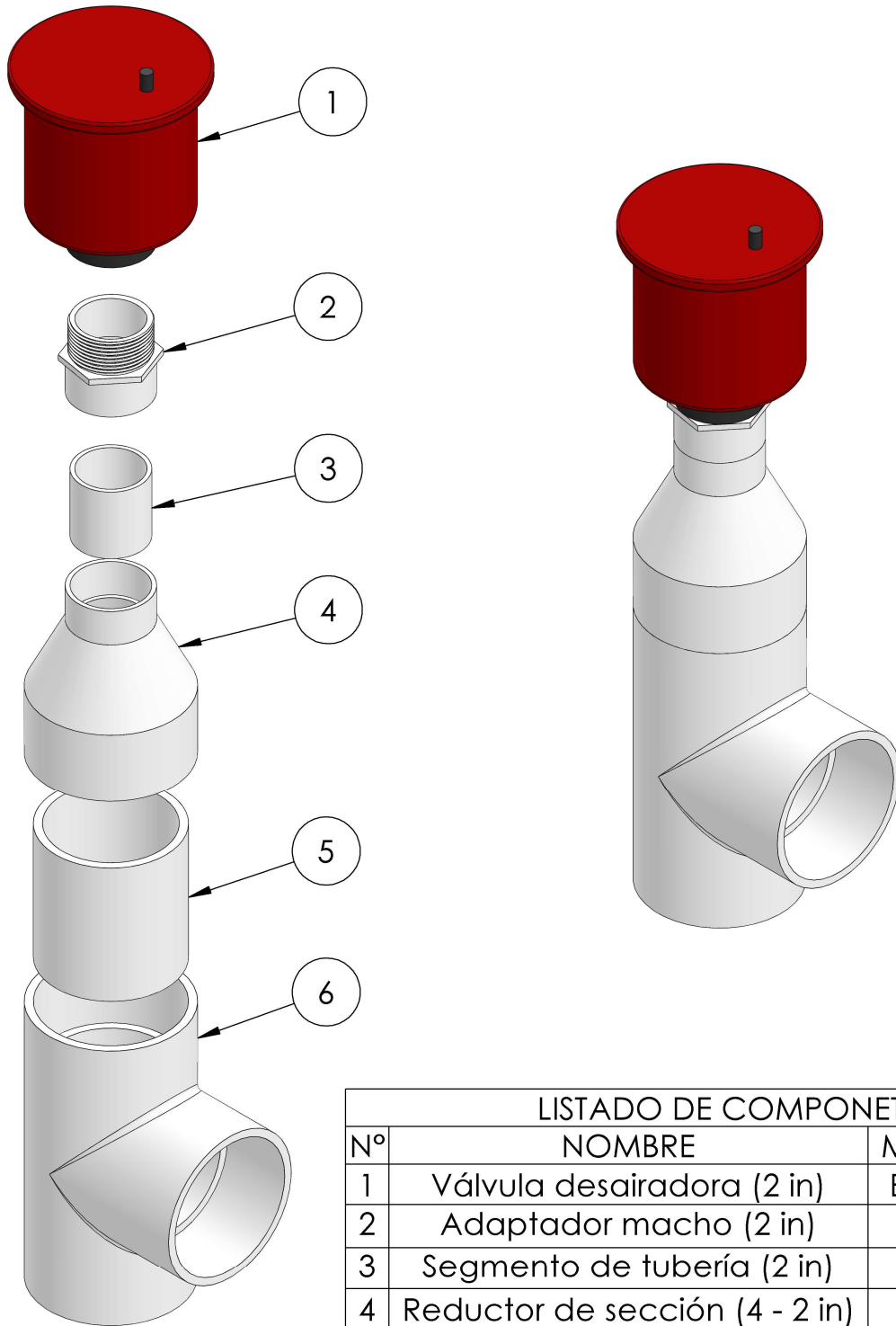
Escala  
1:10

## Instalación de los medidores de presión: Dimensiones



Plano 15/29

## Vista Explosionada



LISTADO DE COMPONENTES			
Nº	NOMBRE	Material	CANT.
1	Válvula desairadora (2 in)	Bronce	1
2	Adaptador macho (2 in)	PVC	1
3	Segmento de tubería (2 in)	PVC	1
4	Reductor de sección (4 - 2 in)	PVC	1
5	Segmento de tubería (4 in)	PVC	1
6	TEE (4 in)	PVC	1

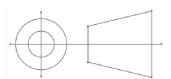


Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

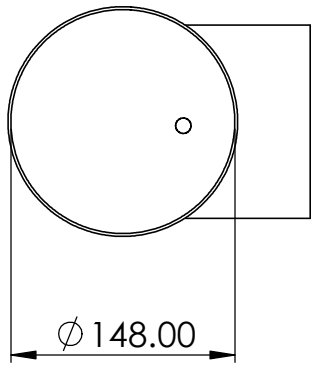
Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
 1:5

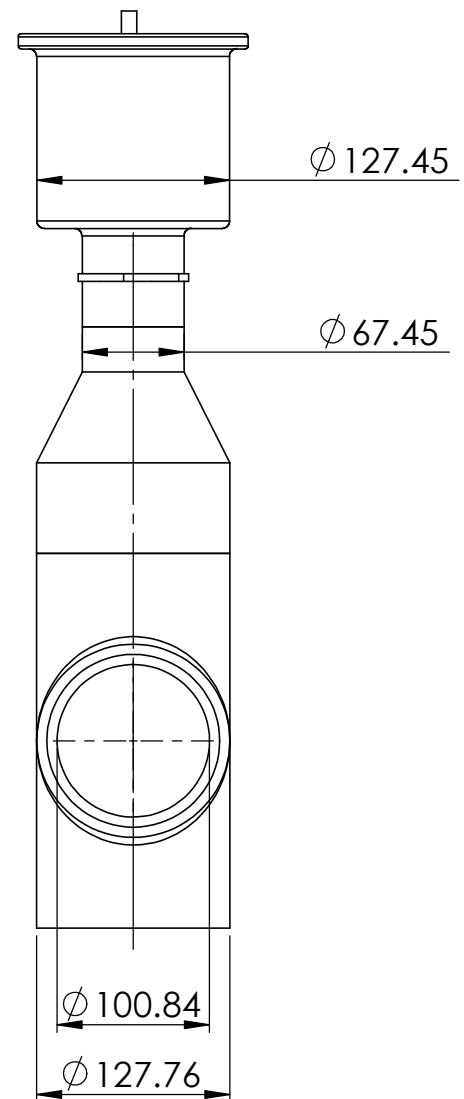
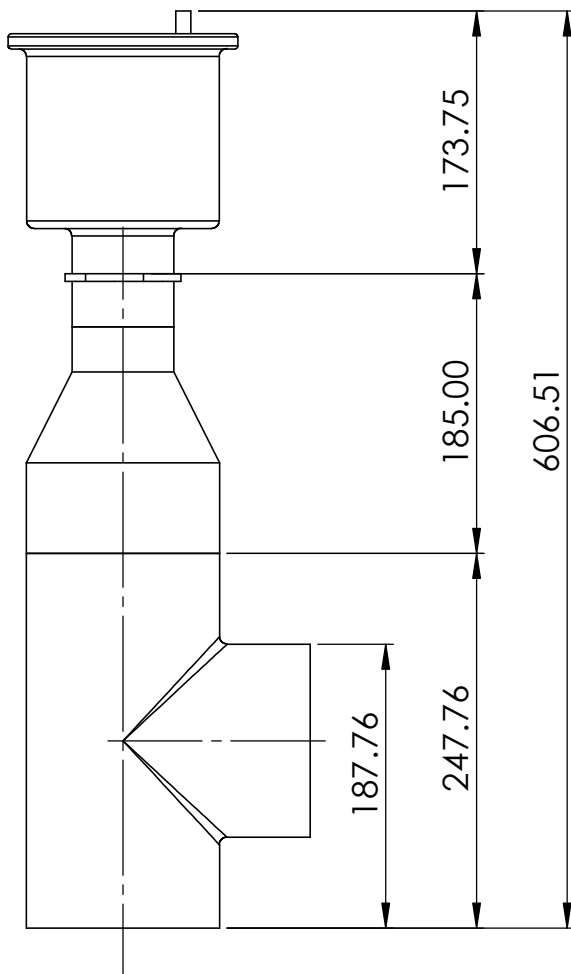
## Instalación de la válvula desairadora



Plano 16/29



Nota: Cotas en milímetros

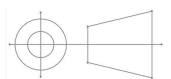


Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

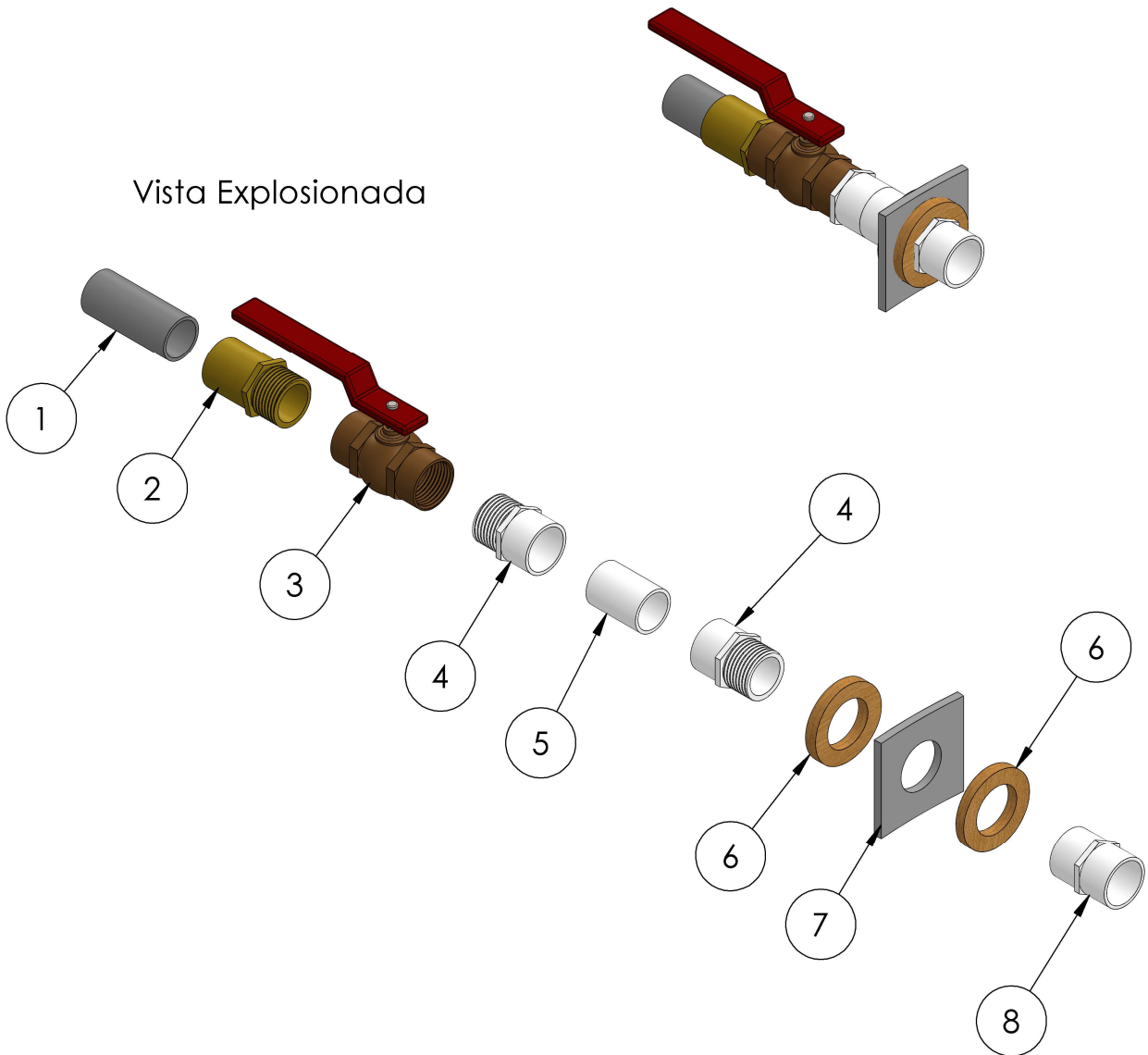
Escala  
 1:5

## Instalación de la válvula desairadora: Dimensiones



Plano 17 / 29

Vista Explosionada



LISTADO DE COMPONENTES			
Nº	NOMBRE	Material	CANT.
1	Segmento de manguera (1/2 in)		1
2	Adaptador macho de manguera (1/2 in)	Latón	1
3	Válvula de bola (1/2 in)	Latón	1
4	Adaptador macho (1/2 in)	PVC	2
5	Segmento de tubería (1/2 in)	PVC	1
6	Empaque	Corcho	1
7	Pared del tanque	Polietileno	1
8	Adaptador hembra (1/2 in)	PVC	1



Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

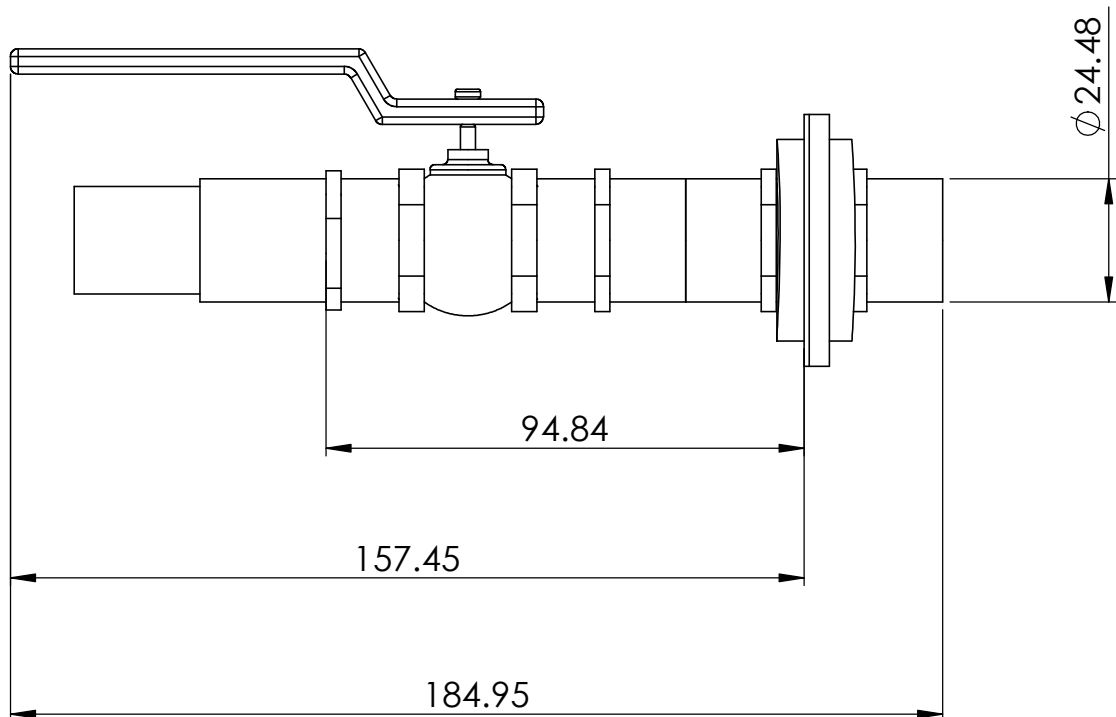
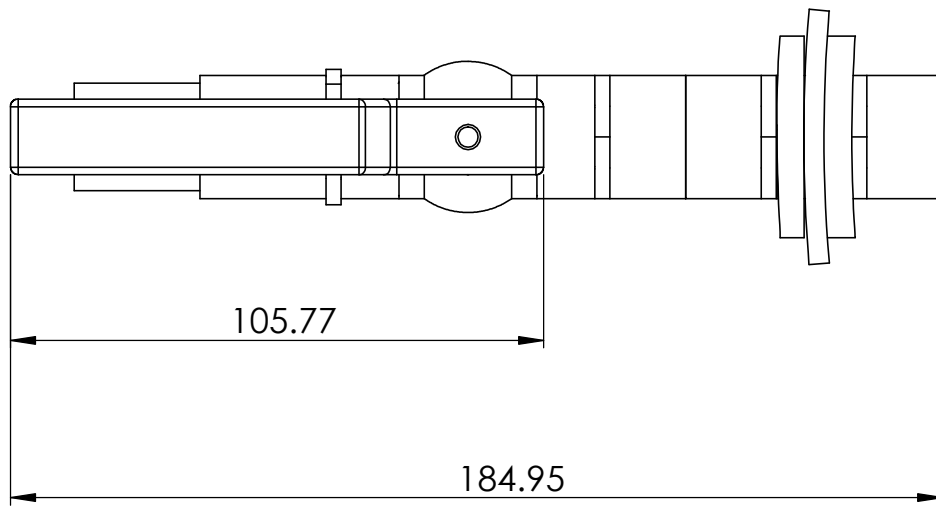
Escala  
 1:3

## Instalación del drenaje del tanque



Plano 18/29

Nota: Cotas en milímetros

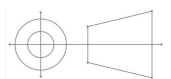


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

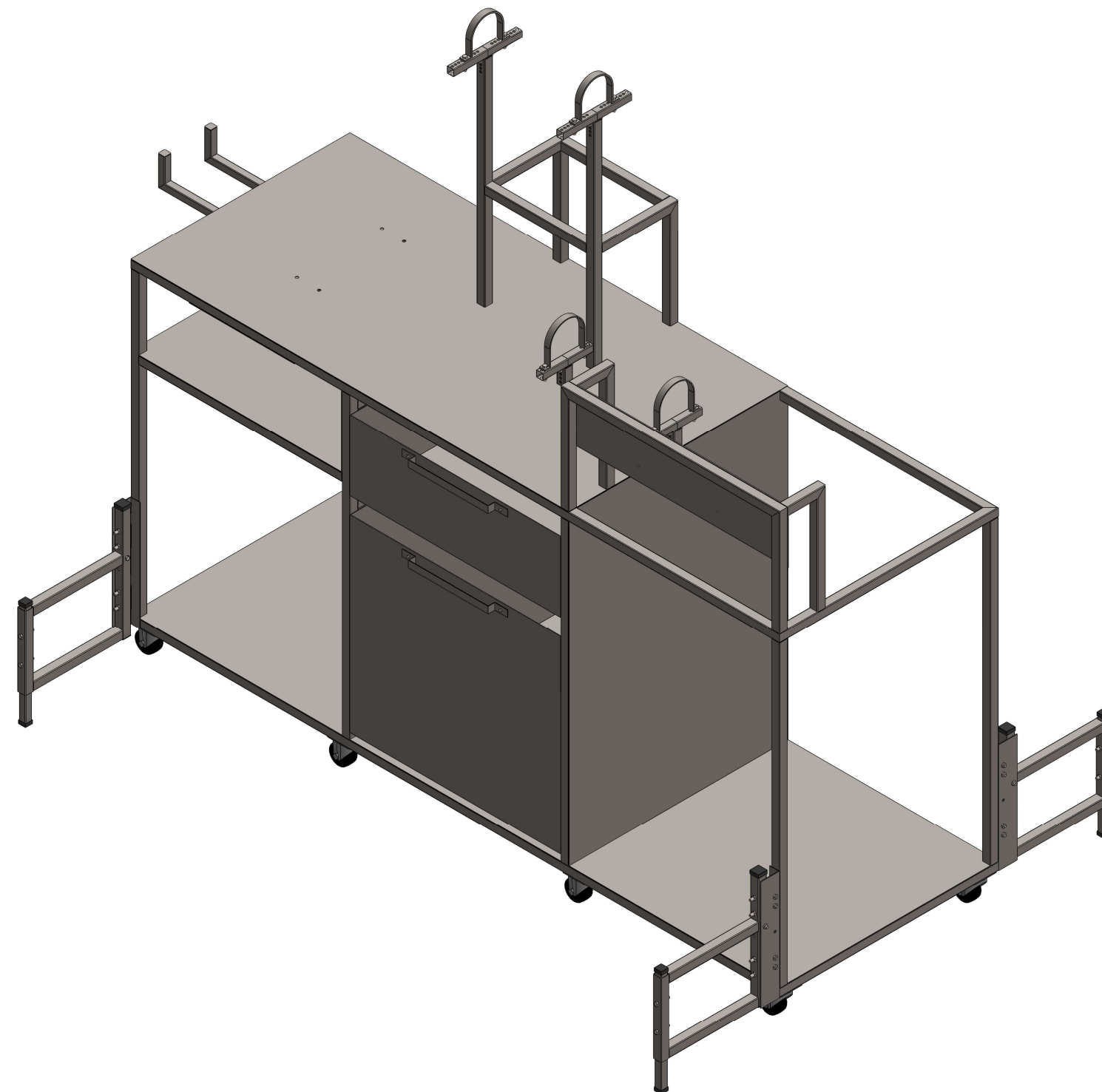
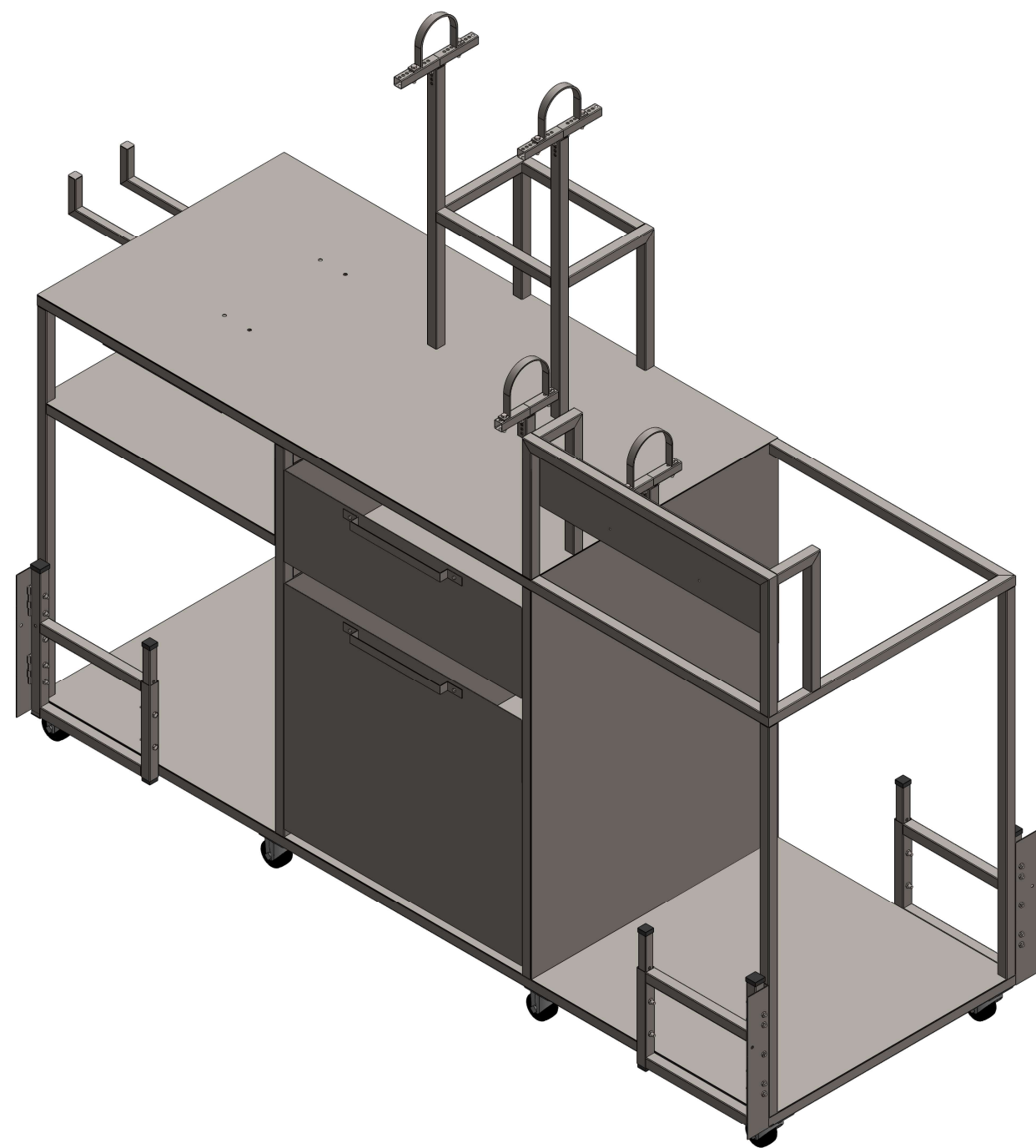
Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
1:1.5

## Instalación del drenaje del tanque: Dimensiones



Plano 19/29

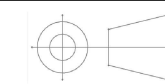


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

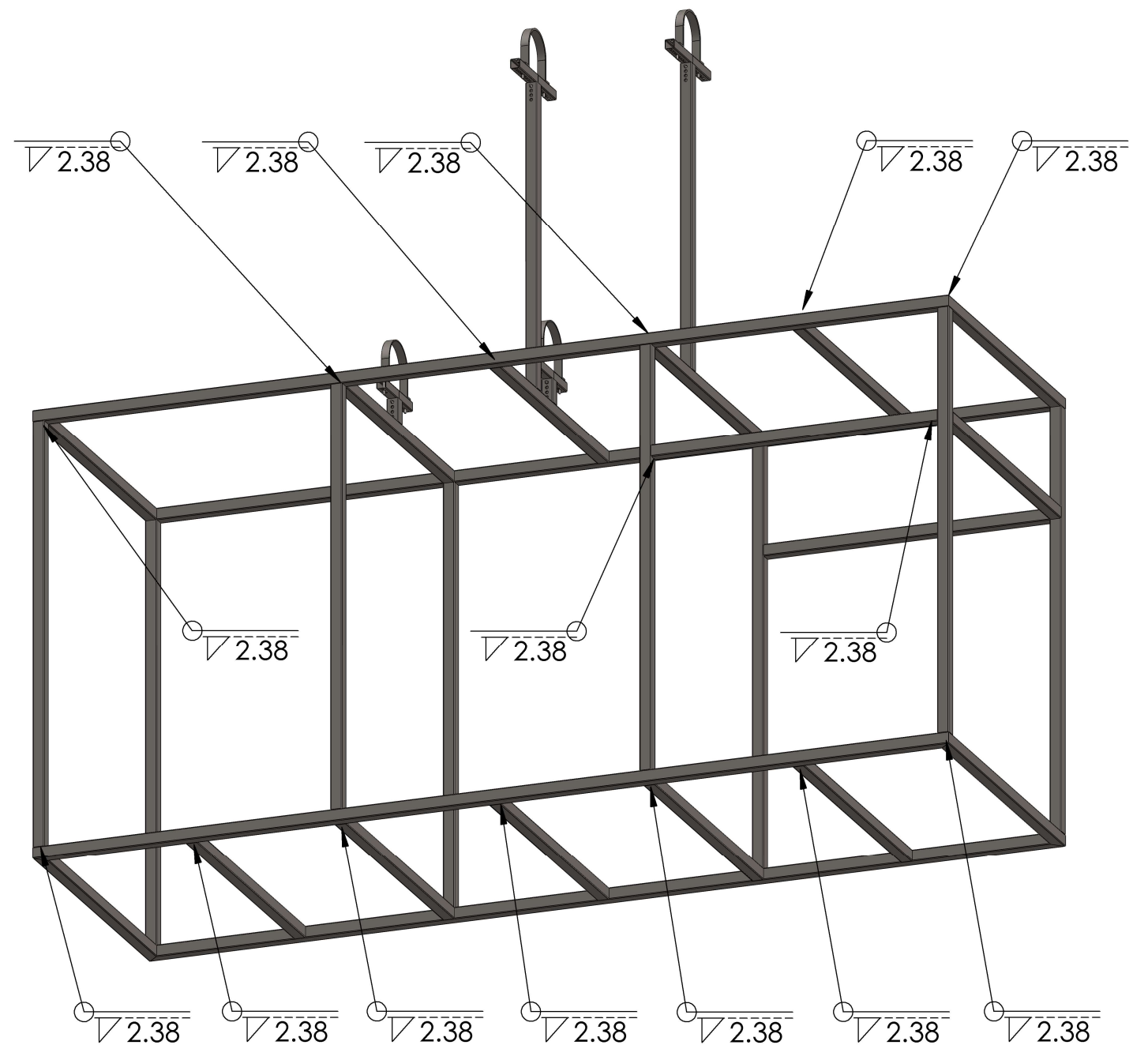
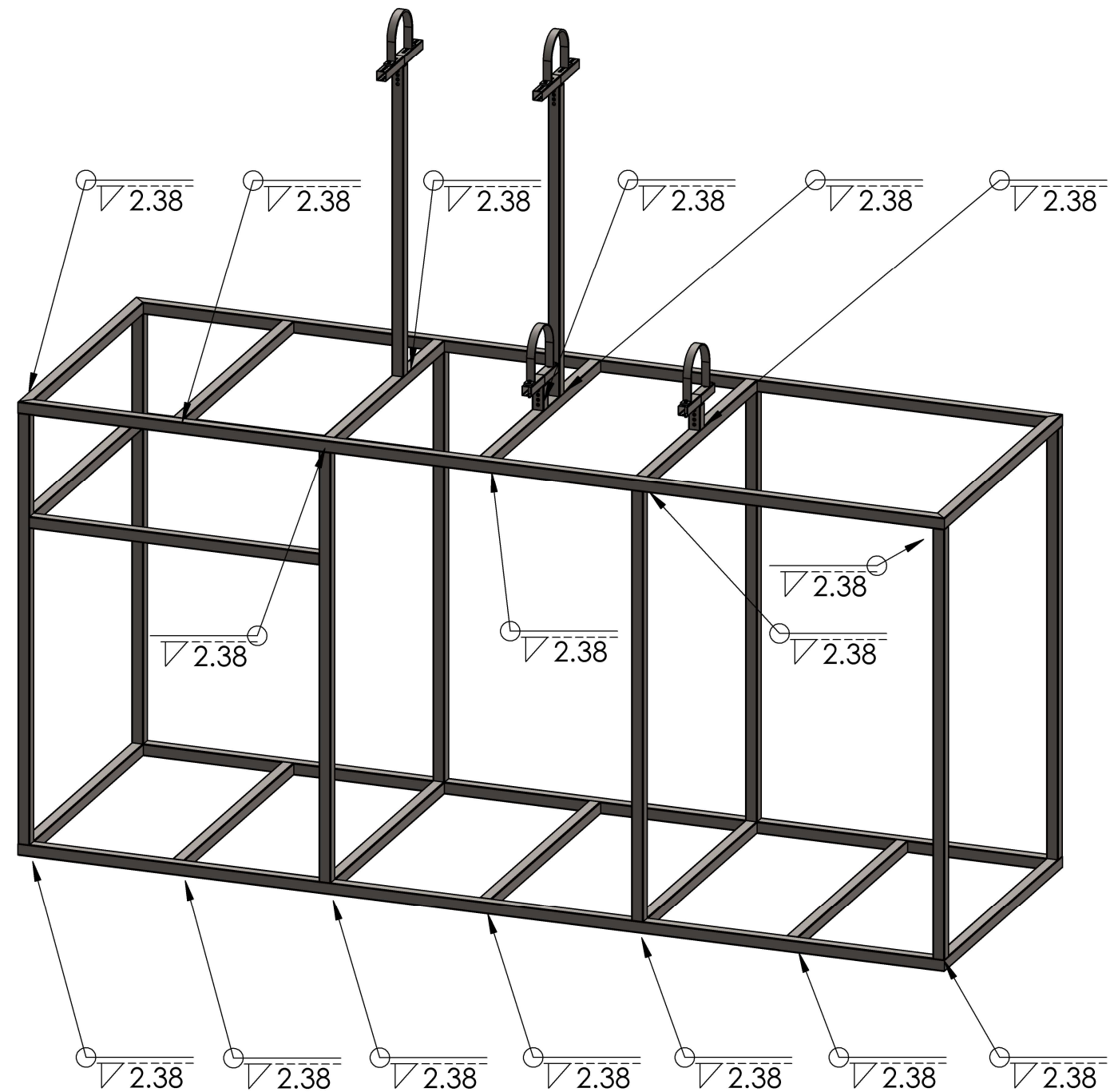
Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
1:50

## Estructura de soporte



Plano 20/29



Notas:

- Cordones de soldadura con electrodo AWS-E6013
- Unidades en milímetros

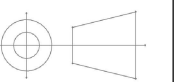


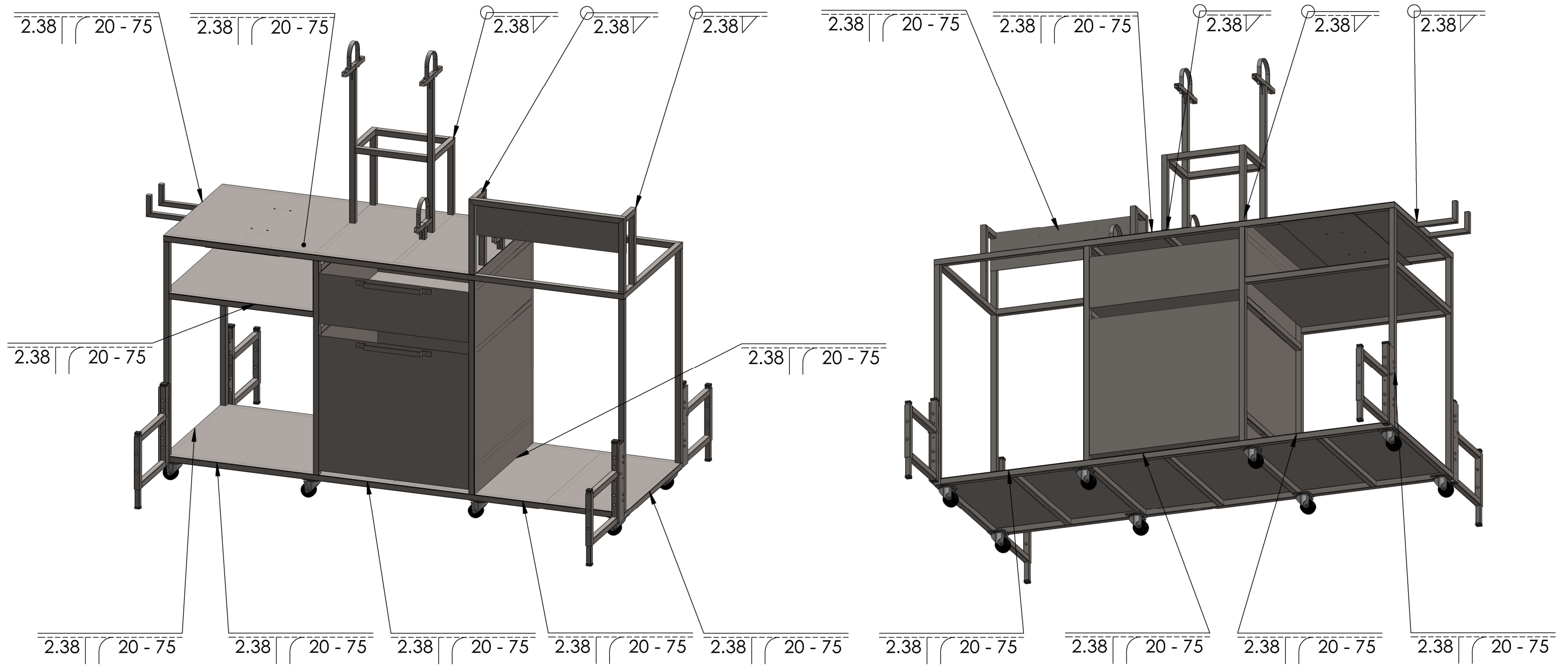
Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
 1:15

### Estructura de soportes: Soldaduras del marco estructural





Notas:

- Cordones de soldadura con electrodo AWS-E6013
- Unidades en milímetros

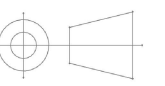


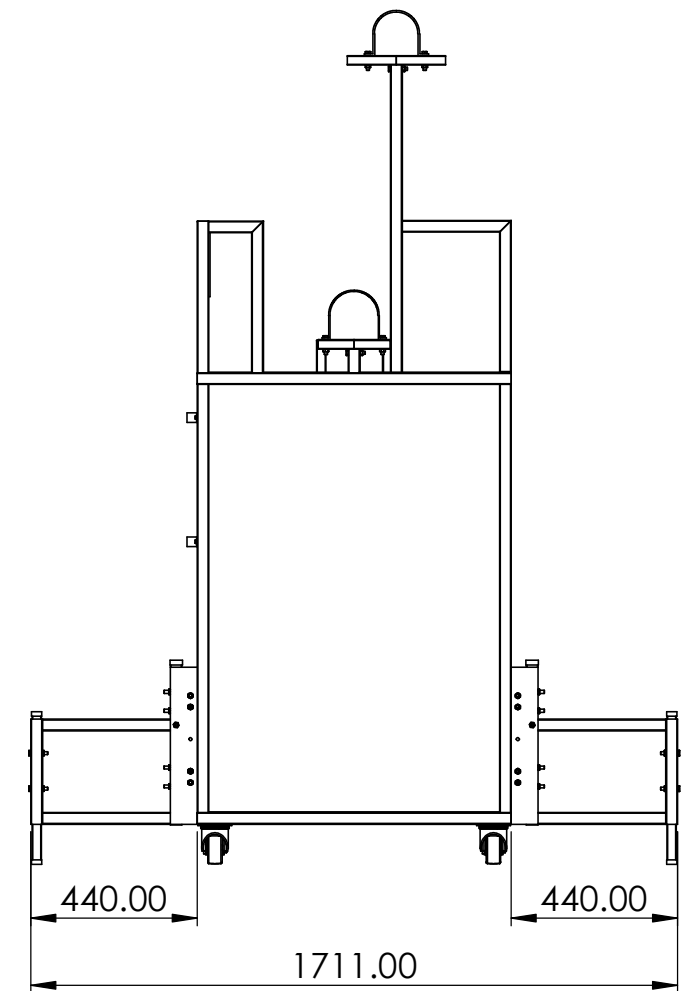
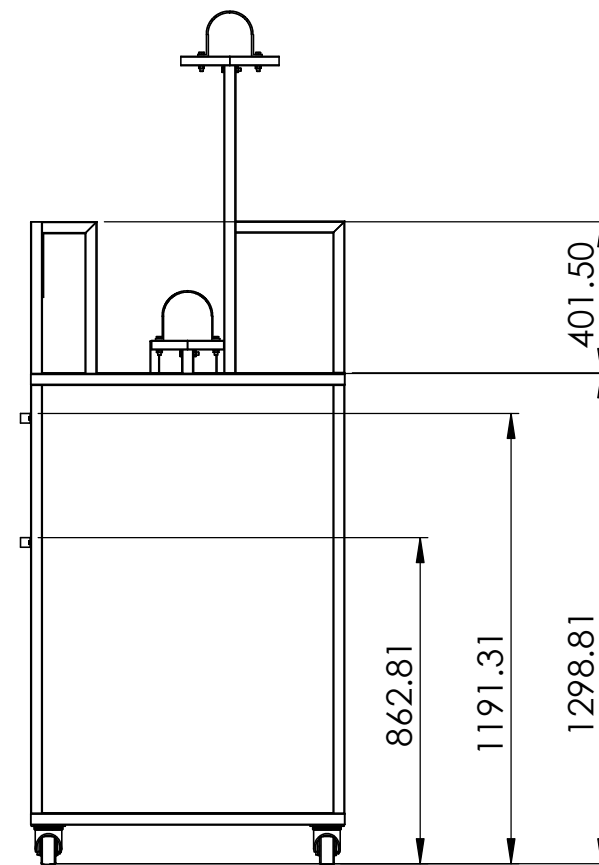
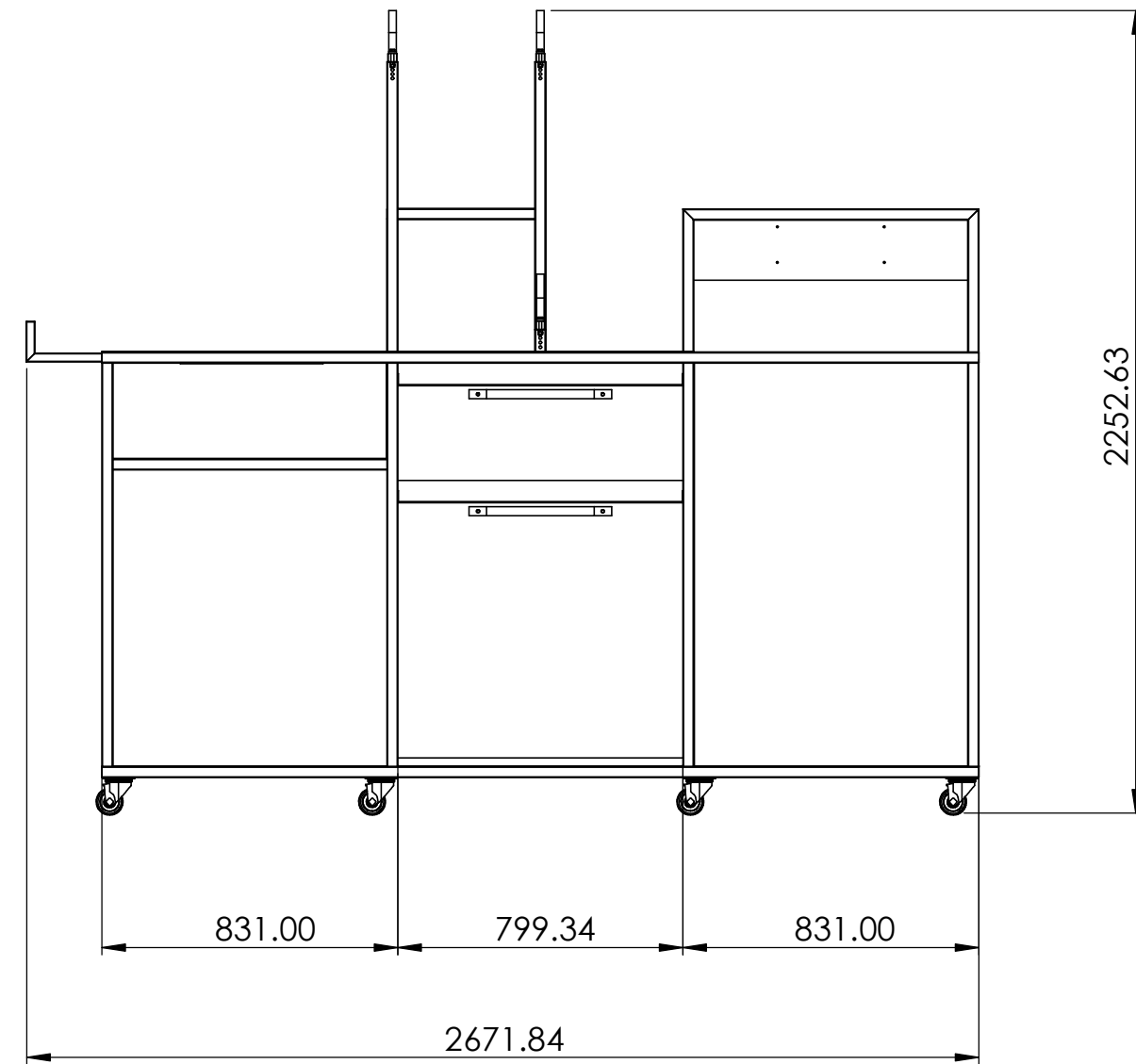
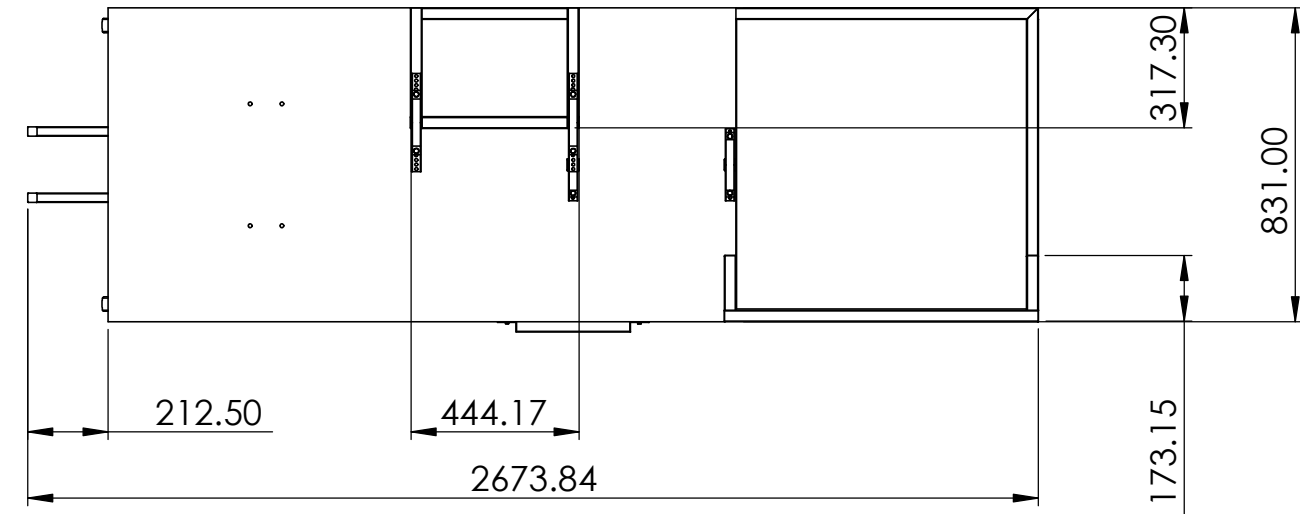
Universidad de El Salvador  
 Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
 Escuela de Ingeniería Mecánica  
 Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
 de un banco de ensayos para pruebas de  
 cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
 1:20

**Estructura de soporte:  
 Soldaduras de componentes**



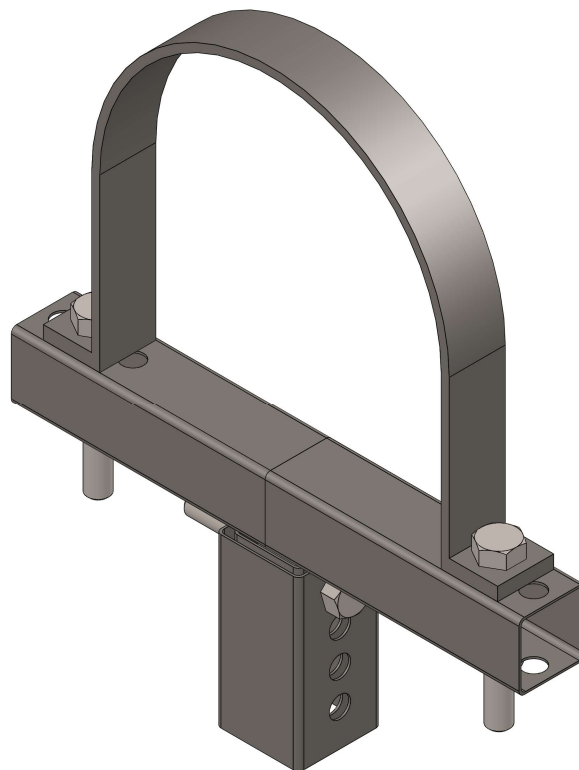
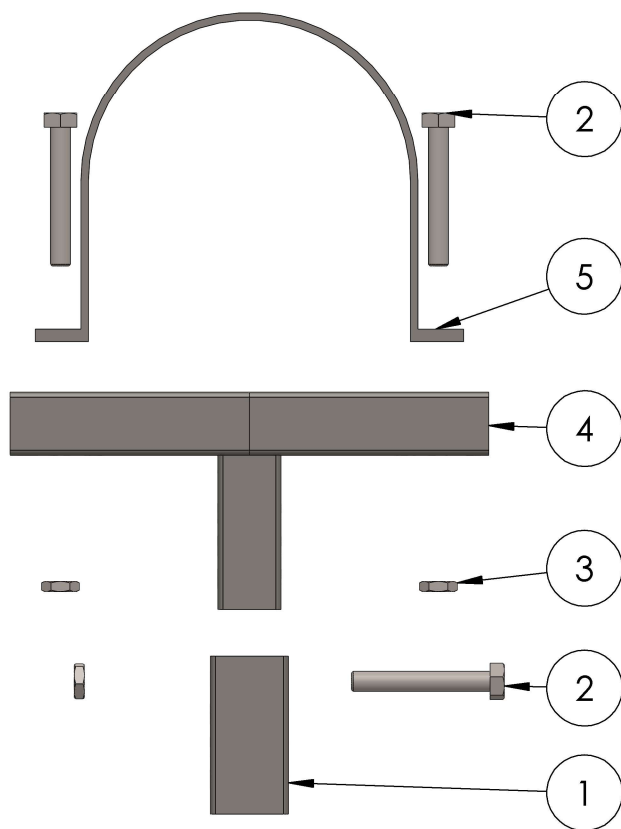


Dimensiones de estructura con soportes extendidos

ESPECIFICACIONES		
COMPONENTE	CALIBRE	MATERIAL
Tubo estructural cuadrado 1 1/4 in	Chapa 16 (1.5 mm)	Acero A500
Lámina	Chapa 16 (1.5 mm)	Acero A36

Nota: Cotas en milímetros

Vista explosionada  
Escala 1:3



Vista isométrica  
Escala 1:2

Especificaciones de componentes

Nº	Pieza	Material
1	Base Fija	Tubo estructural cuadrado 1.1/4 in (Acero al carbono)
2	Perno Hexagonal 8M	Acero al carbono
3	Tuerca Hexagonal 8M	Acero al carbono
4	Base móvil	Tubo estructural cuadrado 1 in (Acero al carbono)
5	Abrazadera	Acero al carbono

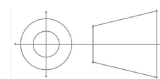


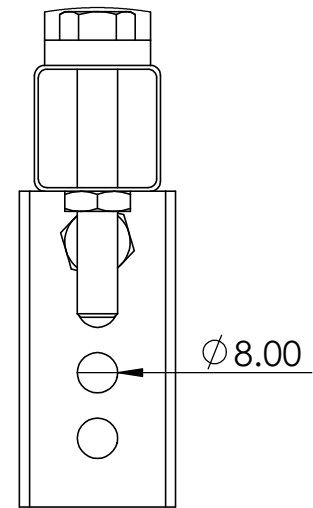
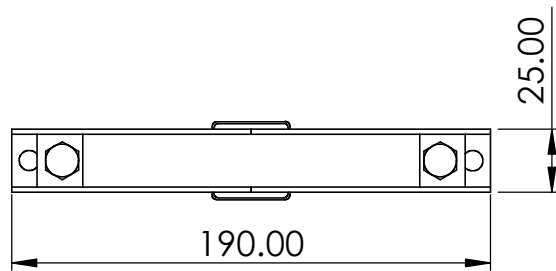
Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas

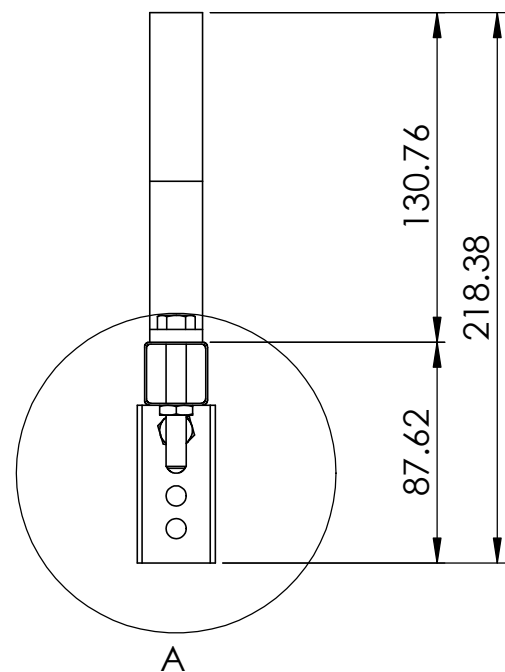
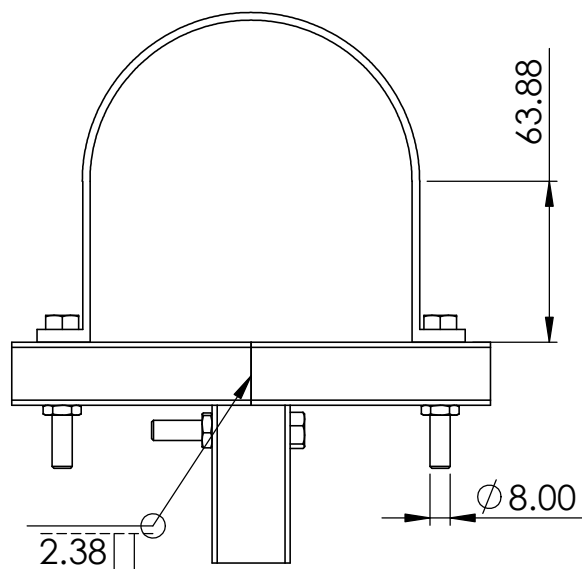
Escala  
1:2

**Estructuras de soporte:  
Soporte de la tubería de succión**





DETALLE A  
ESCALA 2 : 3



Notas:

- Cordones de soldadura con electrodo AWS-E6013
- Cotas en milímetros

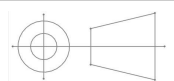


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

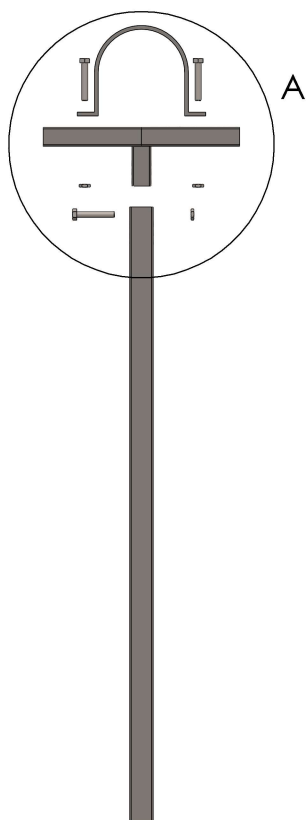
Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
1:3

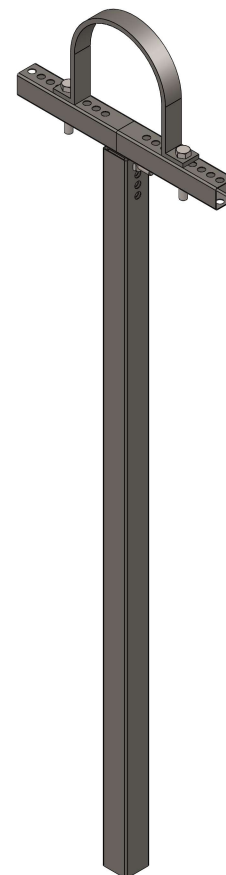
**Estructura de soporte: Dimensiones del  
soporte de la tubería de succión**



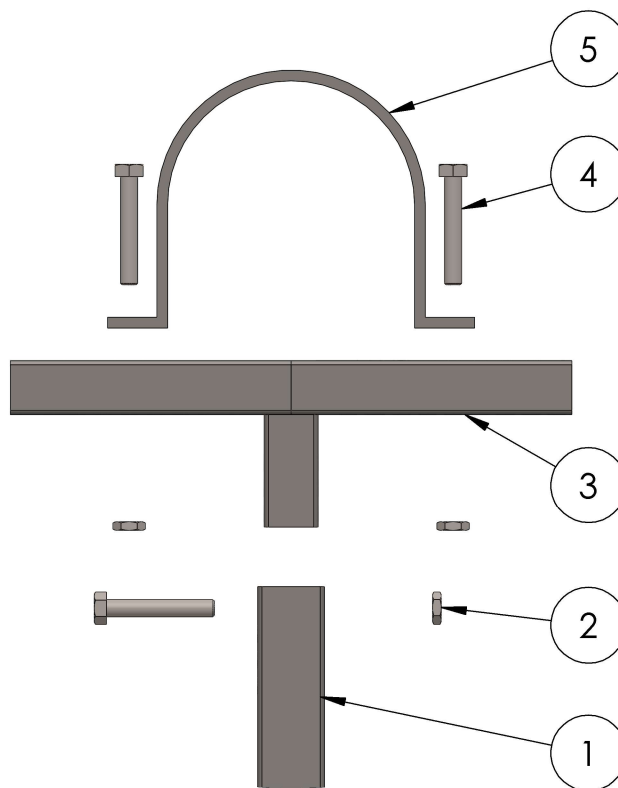
Vista Explosionada  
Escala 1:7



Vista Isométrica  
Escala 1:5



DETALLE A  
ESCALA 2:7



Especificaciones de componentes

Nº	Pieza	Material
1	Base Fija	Tubo estructural cuadrado 1.1/4 in (Acero al carbono)
2	Perno Hexagonal 8M	Acero al carbono
3	Tuerca Hexagonal 8M	Acero al carbono
4	Base móvil	Tubo estructural cuadrado 1 in (Acero al carbono)
5	Abrazadera	Acero al carbono

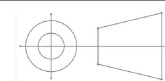


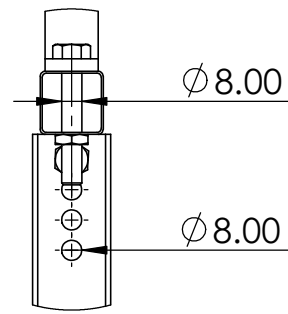
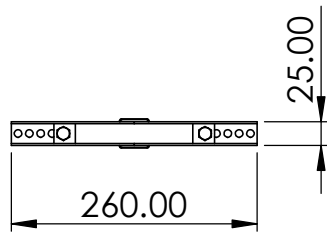
Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas

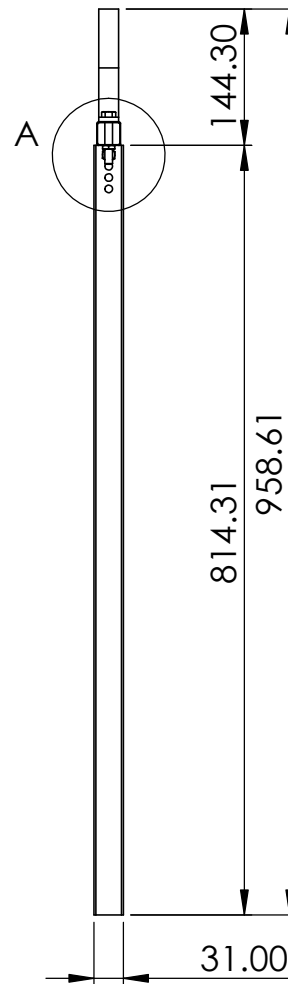
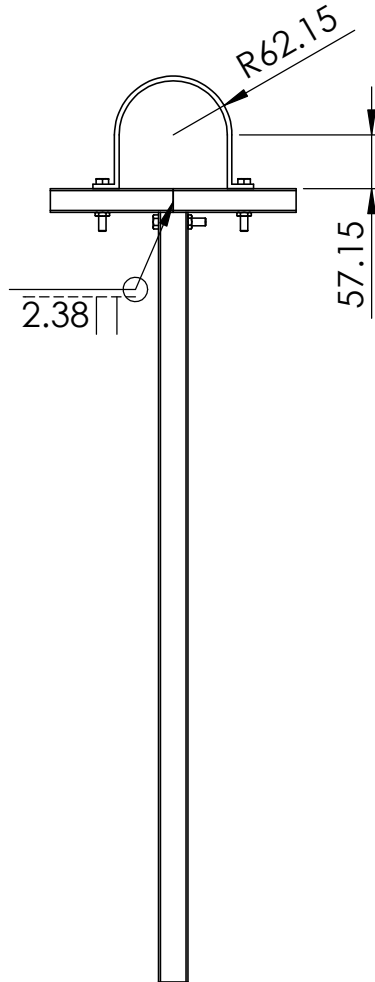
Escala  
1:5

**Estructura de soporte:  
Soporte de la tubería de impulsión**





DETALLE A  
ESCALA 1 : 3



Notas:

- Cordones de soldadura con electrodo AWS-E6013
- Cotas en milímetros

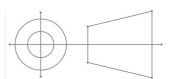


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

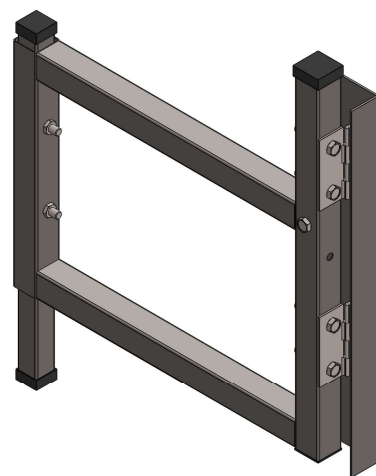
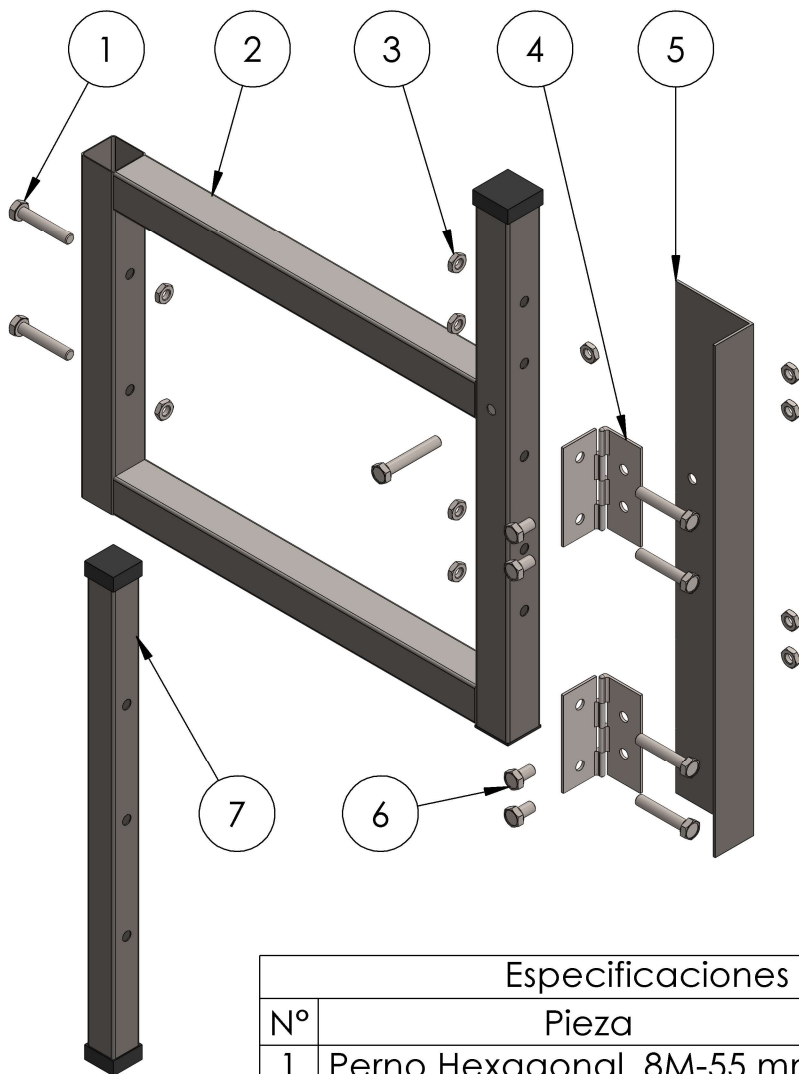
Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
1:8

**Estructura de soporte: Dimensiones de  
soporte de la tubería de impulsión**



Vista explosionada  
Escala: 1:5



Vista isométrica  
Escala: 1:7

Especificaciones de componentes

Nº	Pieza	Material
1	Perno Hexagonal 8M-55 mm L	Acero al carbono
2	Marco de soporte	Tubo estructural cuadrado 1.1/4 in (Acero al carbono)
3	Tuerca Hexagonal 8M	Acero al carbono
4	Bisagra	Acero al carbono
5	Ángulo de soporte	Acero al carbono
6	Perno Hexagonal 8M-25 mm L	Acero al carbono
7	Regulador de altura del soporte	Tubo estructural cuadrado 1 in (Acero al carbono)

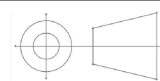


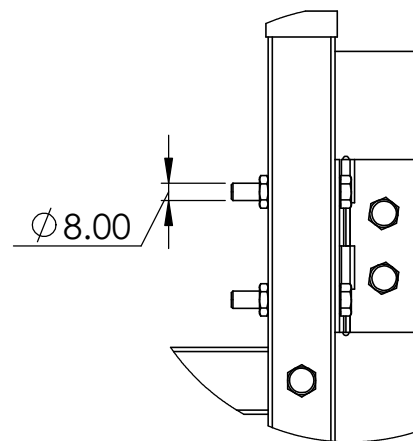
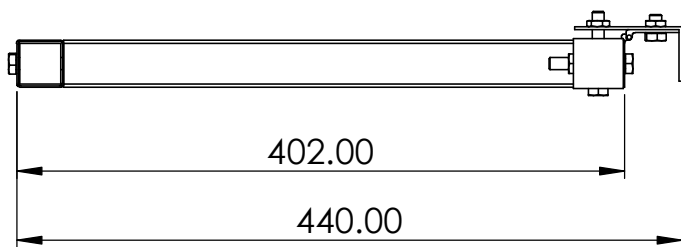
Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño de un banco de ensayos para pruebas de cavitación en bombas rotodinámicas

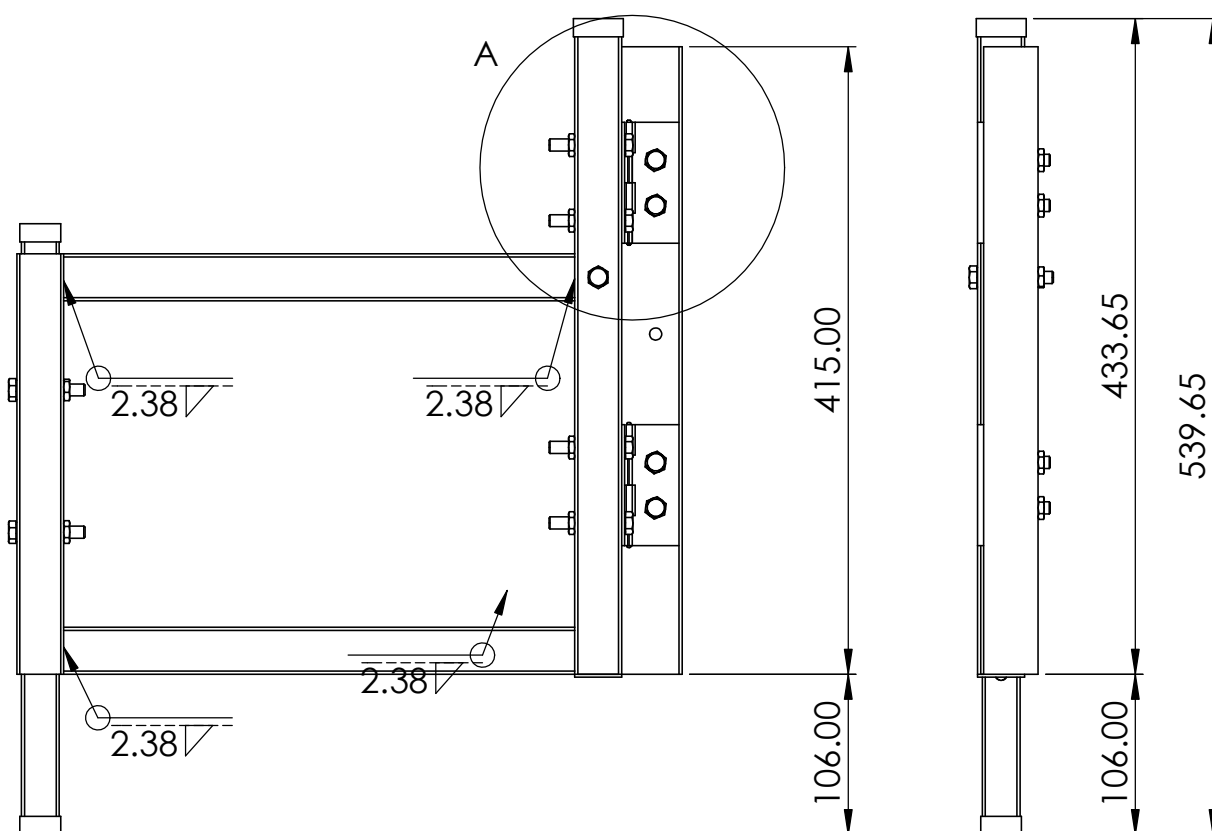
Escala  
1:5

**Estructura de soporte:  
Soportes Laterales**





DETALLE A  
ESCALA 2 : 7



Notas:

- Cordones de soldadura con electrodo AWS-E6013
- Cotas en milímetros

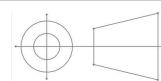


Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Sistemas Fluidomecánicos

Trabajo de Graduación: Propuesta de diseño  
de un banco de ensayos para pruebas de  
cavitación en bombas rotodinámicas

Escala  
1:5

**Estructura de soporte:  
Dimensiones de Soportes laterales**



Plano 29/29