



Universidad Nacional de San Luis
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

***DISEÑO Y CÁLCULO DE UN BANCO DE ENSAYOS
PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN BOMBAS
ROTODINÁMICAS***

Autor: Contreras, Emilio Ivan Quimey

Trabajo final de Ingeniería Electromecánica

Director: Ing. Sanjurjo, Waldo Manuel
Codirector: Ing. Bergoglio, Mario Federico

Villa Mercedes, San Luis

2026

DERECHOS DE AUTOR

© 2026, Contreras Emilio Ivan Quimey

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

A mí mismo, por la constancia, el esfuerzo y la perseverancia a lo largo del proceso.

A mi familia, por el acompañamiento constante, el apoyo incondicional y el empuje permanente en todo este camino.

A mi padre, ejemplo de persona y profesional, por su incondicionalidad y por motivarme siempre a seguir adelante.

Y, en especial, a mi madre, que tanto hubiera querido vivir este momento y que tanto hizo para que esto fuera posible.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos, por el acompañamiento, la paciencia y el apoyo moral a lo largo de todos estos años, estando presentes en cada una de las etapas que transité como estudiante.

A mis amigos, compañeros, y futuros colegas: Cristian Lanzilotta, Andrés Rojas, Felipe Chillemi, Leonardo Escudero y Matías Polverini por transitar conmigo este camino y brindarme siempre su ayuda.

A mi director, Ing. Waldo Sanjurjo, por su acompañamiento, su tiempo y la paciencia dedicada a la dirección de este trabajo.

A mi codirector, Ing. Federico Bergoglio, por su dedicación, sus correcciones y su constante predisposición.

A todos los docentes de la carrera, que contribuyeron a mi formación académica y profesional a lo largo de estos años.

Y finalmente, a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, por los recursos y el espacio brindados para mi formación como profesional.

RESUMEN

El presente Trabajo Final tiene como objetivo el diseño y cálculo de un banco de ensayos destinado al estudio del fenómeno de cavitación en bombas rotodinámicas, en particular bombas centrífugas, y a la realización de ensayos de funcionamiento que permitan determinar curvas características tales como la relación altura-caudal ($H-Q$), potencia-caudal ($P-Q$), la potencia absorbida y entregada, la variación de la Altura Neta Positiva de Aspiración en función del caudal ($ANPA-Q$) y el rendimiento global del conjunto. Cabe destacar que el fenómeno de cavitación es responsable de variaciones significativas en el rendimiento y la vida útil de las bombas hidráulicas, manifestándose a través de la formación y colapso de burbujas de vapor en el fluido, lo que genera ruidos, vibraciones, pérdida de eficiencia y daños en los componentes.

Actualmente, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA) de la Universidad Nacional de San Luis no cuenta con una instalación que permita observar y analizar este fenómeno de manera experimental. En respuesta a esta necesidad, se propone el desarrollo de un banco de ensayos de carácter didáctico, concebido como herramienta pedagógica para asignaturas vinculadas a la mecánica de los fluidos y a las máquinas hidráulicas.

El banco se diseña considerando restricciones reales del entorno, tales como el espacio disponible, las condiciones de alimentación eléctrica, el presupuesto y la necesidad de facilitar el montaje, desmontaje y mantenimiento del sistema. Se adopta una bomba centrífuga modelo BC 100T y un tanque metálico hermético de aproximadamente 470 litros, junto con una red de tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD) y accesorios termofusionables. La inducción de cavitación se logra mediante la reducción controlada de la presión en la succión de la bomba, generada por una bomba de vacío acoplada al tanque hermético, lo que permite reproducir el fenómeno de forma segura, controlada y repetible.

El diseño contempla instrumentación para el monitoreo de variables relevantes como presión, caudal y temperatura, facilitando el análisis del comportamiento hidráulico del sistema y la identificación de condiciones de operación con cavitación. Asimismo, se incluye un análisis de costos, una evaluación del impacto ambiental y la elaboración de una guía de trabajos prácticos orientada al uso académico del banco. La construcción del equipo dependerá de la disponibilidad de recursos, pero su diseño quedará documentado al finalizar este trabajo. En conclusión, el banco propuesto aporta valor al proceso de enseñanza-aprendizaje al vincular teoría y práctica mediante una herramienta accesible y ajustada a las necesidades de la institución.

Palabras claves — Banco de ensayos – Bombas centrífugas – Cavitación – Didáctico – Ingeniería – Mecánica de los fluidos

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: PROPUESTA	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcances y limitaciones	2
1.3.1 Alcance	2
1.3.2 Limitaciones.....	3
1.4 Justificación, marco teórico y estado del arte	4
1.4.1 Justificación	4
1.4.2 Marco teórico	5
1.4.3 Estado del arte.....	27
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS Y DESARROLLO	29
2.1 Descripción general del proyecto	29
2.2 Condiciones y restricciones del entorno	34
2.3 Diseño del circuito hidráulico	35
2.3.1 Descripción del circuito y planteo general:	35
2.3.2 Introducción a los cálculos del circuito	37
2.3.3 Definición del rango operativo de análisis	38
2.3.4 Determinación teórica del ANPA requerido de la bomba centrífuga BC100T ..	40
2.3.5 Determinación del ANPA disponible de la instalación	42
2.3.6 Comparación entre ANPA requerido y ANPA disponible	61
2.3.7 Análisis e interpretación de resultados	64
2.4 Dimensionamiento de componentes complementarios e instrumentación	65
2.4.1 Selección del Caudalímetro	66
2.4.2 Selección del Manómetro.....	67

2.4.3 Selección de los Vacuómetros	69
2.4.4 Selección del Termómetro	71
2.4.5 Observaciones generales	73
2.5 Dimensionamiento y selección de la instrumentación eléctrica.....	73
2.5.1 Selección del interruptor termomagnético	74
2.5.2 Selección de los interruptores diferenciales	77
2.5.3 Selección del Variador de Frecuencia.....	80
2.5.4 Selección de pulsadores de mando y parada de emergencia	81
2.5.5 Tablero eléctrico del banco de ensayos	84
2.5.6 Observaciones generales sobre la protección eléctrica.....	86
2.5.7 Circuitos de comando y potencia del banco ensayos – Plano eléctrico.....	87
CAPÍTULO 3: CONDICIONES DE SEGURIDAD OPERATIVA Y PREVENCIÓN DE RIESGOS	90
3.1 Identificación de riesgos potenciales	90
3.2 Medidas de prevención y recomendaciones de seguridad	91
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE COSTOS.....	94
4.1 Criterios de estimación y alcances	94
4.2 Componentes considerados	94
CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL	97
5.1 Consideraciones generales	97
5.2 Análisis por aspectos ambientales.....	97
5.3 Conclusión del análisis de impacto ambiental	99
CAPÍTULO 6: APLICACIÓN PEDAGÓGICA Y GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS.....	101
6.1 Planificación de los ensayos y curvas características.....	101
6.1.1 Objetivos de los ensayos	101
6.1.2 Variables que se pueden medir.....	102

6.1.3 Tipos de ensayos a realizar	103
6.1.4 Aplicación didáctica de los ensayos	104
6.2 Guía teórico - práctica	105
6.2.1 Introducción a la guía didáctica.....	105
6.2.2 Contenido y estructura de la guía	106
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	107
GLOSARIO.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
APÉNDICES.....	114
Apéndice A – Planilla del modelo de cálculo paramétrico.....	114
Apéndice B – Guía de Trabajos prácticos del banco de ensayos	115
Apéndice C – Planos.....	147
ANEXOS.....	150
Anexo A – Ficha técnica de la bomba centrífuga BC 100 T.....	150
Anexo B – Ficha técnica de la bomba de vacío DOSIVAC DV95 SR	155

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Curva característica H-Q con curva de potencia y rendimiento .</i>	8
<i>Figura 2. Curvas superpuestas de carga-caudal del sistema y de carga-capacidad de la bomba, mostrando el punto de operación .</i>	9
<i>Figura 3. Diagrama P-V del agua .</i>	18
<i>Figura 4. Mecanismo de onda de choque en una burbuja de vapor .</i>	18
<i>Figura 5. Rodete de una bomba bajo los efectos de la cavitación .</i>	19
<i>Figura 6. Esquema del circuito hidráulico – Aplicación de Bernoulli. .</i>	21
<i>Figura 7. Comportamiento del ANPA disponible y del ANPA requerido en función del caudal. .</i>	23
<i>Figura 8. Fotografía de la bomba centrífuga real a utilizar en el banco de ensayos.</i>	29
<i>Figura 9. Fotografía de la placa de características de la bomba centrífuga BC100T.</i>	30
<i>Figura 10. Fotografía del tanque hermético vertical a utilizar en el banco de ensayos. ...</i>	30
<i>Figura 11. Fotografía de la bomba de vacío a utilizar en el banco de ensayos.</i>	31
<i>Figura 12. Fotografía de las placas de características de la bomba de vacío.</i>	31
<i>Figura 13. Cañería de PEAD termofusionable .</i>	32
<i>Figura 14. Prototipo en 3D del banco de ensayos.</i>	33
<i>Figura 15. Tabla de caudales operativos y altura manométrica entregada por la bomba BC100T.</i>	39
<i>Figura 16. Curva H-Q de la Bomba Centrífuga BC 100 T.</i>	39
<i>Figura 17. Curva de $ANPA_{req}$ vs CAUDAL.</i>	42
<i>Figura 18. Tabla A-3 de propiedades del agua saturada.</i>	44
<i>Figura 19. Tabla 2-3 de propiedades de fluidos.</i>	45
<i>Figura 20. Rugosidad absoluta (k) para distintos materiales de tuberías.</i>	45
<i>Figura 21. Coef de pérdida según Robert L Mott .</i>	48
<i>Figura 22. Coeficiente de pérdida según Cengel & Cimbala.</i>	49
<i>Figura 23. Válvula de globo con fuelle - Genebre .</i>	52
<i>Figura 24. Valores K_v y diagrama de pérdidas de una válvula de globo – Genebre</i>	53
<i>Figura 25. Curva de variación de $\zeta(\alpha)$ de una válvula de globo.</i>	56
<i>Figura 26. Curva de ANPA disponible SIN VACÍO aplicado.</i>	58
<i>Figura 27. Curva de ANPA disponible CON VACÍO aplicado del 75%.</i>	60
<i>Figura 28. Comparación entre ANPA requerido y ANPA disponible con y sin vacío aplicado.</i>	61

<i>Figura 29. Caudalímetro digital de 1" seleccionado para el banco de ensayos.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 30. Manómetro analógico de glicerina: Rango: 0-4 bar – rosca ¼.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 31. Vacuómetro analógico de glicerina: Rango: 0 a -1 bar – rosca ¼.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 32. Termómetro bimetalico analógico de inmersión 0-60°C.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 33. Interruptor termomagnético bipolar 16 A – Curva C.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 34. Interruptor termomagnético bipolar 6 A – Curva C.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 35. Interruptor diferencial bipolar 2x25A – 30mA.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 36. Variador de frecuencia monofásico / trifásico.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 37. Pulsadores de marcha y parada – Schneider.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 38. Pulsador “parada de emergencia” tipo “seta” – Schneider.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 39. Gabinete metálico estanco para tablero eléctrico – Schneider.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 40. Circuito de potencia del banco de ensayos.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 41. Circuito de comando del banco de ensayos.</i>	<i>89</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. ANPA requerido para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.	41
Tabla 2. Pérdidas primarias para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.	47
Tabla 3. Coeficientes de pérdidas localizadas (ζ).	49
Tabla 4. Pérdidas secundarias para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.	50
Tabla 5. Pérdidas totales para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.	51
Tabla 6. Coeficiente de pérdidas en función del grado de apertura.	55
Tabla 7. ANPA disponible SIN VACÍO aplicado para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.	58
Tabla 8. ANPA disponible CON VACÍO aplicado del 75% para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.	60
Tabla 9 Diferencia entre $ANPA_{disp.}$ y $ANPA_{req.}$	63
Tabla 10. Costos estimados de la instrumentación	94
Tabla 11. Costos estimados de los componentes del sistema hidráulico	94
Tabla 12. Costos estimados de los componentes del tablero eléctrico	95
Tabla 13. Costos estimados de materiales auxiliares y accesorios	95
Tabla 14. Costos estimados del tanque y estructura metálica.	95
Tabla 15. Costos estimados totales	96

CAPÍTULO 1: PROPUESTA

1.1 Introducción

El fenómeno de cavitación es uno de los problemas más significativos que pueden presentarse en sistemas hidráulicos, especialmente en bombas centrífugas. La cavitación se produce cuando la presión de un líquido desciende por debajo de su presión de vapor, lo que genera la formación de burbujas que, al colapsar, pueden producir daños en los componentes del sistema, generar vibraciones, pérdida de eficiencia y fallas prematuras. Este fenómeno afecta no solo el rendimiento y la vida útil de los equipos, sino también la seguridad y los costos de operación en instalaciones industriales, plantas de bombeo, y sistemas de distribución de agua, entre otros.

En el contexto de la formación académica de los futuros ingenieros, resulta esencial comprender el comportamiento hidráulico de los sistemas reales, y dentro de ellos, el fenómeno de cavitación. Sin embargo, la observación directa de este proceso no suele ser accesible en el ámbito universitario debido a la falta de instalaciones específicas para provocarlo y analizarlo en condiciones controladas. Esta carencia limita la posibilidad de vincular los conocimientos teóricos impartidos en asignaturas como Mecánica de los Fluidos o Máquinas Hidráulicas con experiencias prácticas que permitan visualizar y experimentar estos fenómenos de manera tangible.

Actualmente, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA) de la Universidad Nacional de San Luis no cuenta con un banco de ensayos específico para el estudio de la cavitación. Esto representa una oportunidad concreta para el desarrollo de una herramienta didáctica que permita enriquecer los procesos de enseñanza y aprendizaje, acercando a los estudiantes a condiciones reales de análisis y diseño de sistemas hidráulicos.

El presente trabajo final tiene como propósito el diseño teórico y cálculo de un banco de ensayos que permita estudiar el comportamiento de bombas rotodinámicas tanto en condiciones normales como bajo cavitación inducida. Se busca establecer las bases para su futura construcción, considerando las limitaciones físicas, presupuestarias y técnicas propias del entorno académico. Para ello, se recurrirá a una metodología de diseño que contemple cálculos, dimensionamiento hidráulico, selección de componentes, generación de planos, modelos 3D y la documentación técnica completa del proyecto.

Este trabajo se enmarca en la asignatura “Trabajo Final”, correspondiente a la carrera de Ingeniería Electromecánica, y tiene como objetivo central integrar conocimientos adquiridos a lo largo de la formación académica en un proyecto aplicado. El banco diseñado podrá ser utilizado como recurso pedagógico en prácticas de laboratorio, facilitando la comprensión de conceptos a través de la observación, la medición y el análisis experimental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un banco didáctico de cavitación mediante el cálculo y diseño, con el fin de realizar ensayos de funcionamiento y cavitación en bombas rotodinámicas, para el uso en el Laboratorio de Mecánica de los Fluidos de la FICA-UNSL.

1.2.2 Objetivos específicos

- **Diseñar el banco de ensayo y cavitación para bombas rotodinámicas**, definiendo su estructura general, realizando el cálculo y selección de sus componentes, y estableciendo los principios de funcionamiento.
- **Elaborar una guía de Trabajos Prácticos (TP) para el uso del banco en el ámbito académico**, contemplando el análisis de las condiciones de seguridad, la metodología de toma de datos y el desarrollo de contenidos didácticos que faciliten su aplicación en la enseñanza.
- **Documentar el proceso de diseño y evaluar la viabilidad del proyecto**, incluyendo la elaboración de esquemas constructivos, el análisis de costos asociados y la extracción de conclusiones relevantes para su futura implementación.

1.3 Alcances y limitaciones

1.3.1 Alcance

El presente trabajo final tiene como alcance el diseño teórico y cálculo de un banco de ensayos didáctico destinado al análisis del fenómeno de cavitación en bombas rotodinámicas,

específicamente centrífugas. El banco será concebido para permitir tanto la operación en condiciones normales como en situaciones de cavitación inducida de forma controlada.

Se desarrollará un dimensionamiento hidráulico completo del sistema, con cálculos manuales y justificados, empleando métodos clásicos como coeficientes de pérdida localizados (K), longitudes equivalentes y análisis de ANPA disponible. Asimismo, se realizará la selección de componentes adecuados, considerando criterios técnicos y económicos, y se elaborarán los planos técnicos y modelos tridimensionales en SolidWorks.

Como parte del trabajo, también se documentará el proceso completo de diseño, se analizarán los costos estimados de construcción, se evaluará el impacto ambiental y se redactará una guía de trabajos prácticos orientada al uso académico del banco en asignaturas relacionadas con la hidráulica.

1.3.2 Limitaciones

El proyecto se plantea en la etapa de diseño teórico del banco de ensayos, sin contemplar inicialmente su construcción física, debido a los tiempos propios del desarrollo académico y a la necesidad de contar previamente con la totalidad de los insumos requeridos. En consecuencia, durante esta etapa no se prevé la realización de ensayos experimentales ni validaciones prácticas, quedando dichas instancias sujetas a una etapa posterior de implementación.

Se consideran diversas limitaciones vinculadas al entorno físico e institucional donde se prevé la futura instalación del banco. Una de ellas es el espacio disponible, dado que el banco se propone instalar en un sector del subsuelo del edificio de la facultad que deberá ser reacondicionado para tal fin. Asimismo, se tiene en cuenta la necesidad de que la estructura sea lo suficientemente compacta y reubicable, ya que dicho espacio es compartido con otras actividades académicas.

En relación con la alimentación eléctrica, se contempla la limitación de no contar con una red trifásica en el lugar de instalación. Frente a esta restricción, se propone la incorporación de un variador de frecuencia que permita operar la bomba trifásica seleccionada utilizando la red monofásica disponible.

Respecto al tanque de almacenamiento, se propone analizar distintas alternativas constructivas. En primer lugar, se considera la posibilidad de utilizar un tanque hermético de acero inoxidable, opción ideal para inducir cavitación mediante vacío, aunque su elevado costo podría volverla inviable. Como alternativa, se contempla el uso de un tanque de plástico, opción más económica, aunque limitada por no permitir el trabajo bajo vacío. En función de estas restricciones, se propone evaluar la reutilización de un tanque metálico en desuso, originalmente empleado como ablandador de agua de una caldera industrial, el cual, por su condición de

hermeticidad, podría ser reacondicionado para permitir la generación de vacío de manera segura, constituyendo una solución técnica viable y económicamente conveniente.

En cuanto a los recursos materiales, se prevé contar con el apoyo de la empresa YPF para la adquisición de parte de la instrumentación de medición y otros componentes específicos, mientras que elementos como la bomba, el tanque, las tuberías, la estructura del banco y diversos accesorios se espera que sean aportados por la facultad. Esto condiciona el diseño a la utilización de materiales efectivamente disponibles y acordes al contexto institucional.

Por último, el diseño del banco se plantea priorizando la seguridad y la operabilidad en un entorno académico, lo cual condiciona ciertas decisiones técnicas, tales como la elección de materiales, la configuración de los componentes y la forma de inducción de cavitación, con el objetivo de garantizar un uso seguro por parte de estudiantes y docentes.

1.4 Justificación, marco teórico y estado del arte

1.4.1 Justificación

El presente trabajo final surge ante la necesidad concreta de contar con un banco de ensayos que permita observar y analizar el fenómeno de cavitación en bombas rotodinámicas dentro del ámbito académico. Actualmente, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA) no dispone de una instalación que brinde esta posibilidad, lo que limita el abordaje práctico de uno de los temas más relevantes en la mecánica de los fluidos y las máquinas hidráulicas.

La cavitación es un fenómeno complejo, con consecuencias directas sobre el rendimiento, la seguridad y la vida útil de los equipos hidráulicos. Su estudio requiere no solo comprender los fundamentos teóricos, sino también experimentar con situaciones reales en las que pueda ser inducida y observada de forma controlada. La incorporación de un banco didáctico permitirá complementar la formación práctica de los futuros ingenieros, vinculando la teoría con la práctica de manera tangible.

Además de su aplicación en las asignaturas correspondientes, el banco brindará soporte para futuras actividades experimentales, trabajos de investigación y extensión, incrementando el valor académico del laboratorio de Mecánica de los Fluidos. La elección de un diseño adaptable, económico y seguro responde a las condiciones reales del entorno institucional, aprovechando recursos existentes y posibles aportes externos, como los gestionados recientemente con YPF.

En definitiva, este trabajo no solo representa una oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera en un proyecto concreto, sino también de dejar una herramienta

útil para la comunidad educativa, con potencial de ser implementada, replicada o mejorada en futuras instancias académicas.

1.4.2 Marco teórico

1.4.2.1 Máquinas De Fluidos

Las máquinas son dispositivos que transforman energía de una forma a otra. Dentro de esta clasificación general, las **máquinas de fluidos** son aquellas en las que el fluido actúa como medio de intercambio energético, ya sea cediendo energía al medio mecánico o recibéndola de él [1].

Se distinguen dos grandes grupos:

- **Máquinas hidráulicas:** el fluido atraviesa la máquina sin experimentar variaciones apreciables de densidad. Ejemplos: bombas de agua, ventiladores.
- **Máquinas térmicas:** el fluido varía su densidad de manera significativa durante el proceso, debido a cambios de presión y temperatura. Ejemplos: turbinas de vapor, compresores de gas.

Dentro de las máquinas hidráulicas, la clasificación más habitual las divide en:

- **Máquinas de desplazamiento positivo:** intercambian energía con el fluido por variaciones de presión. Entregan un caudal prácticamente constante, independiente de las condiciones del sistema. Ejemplos: bombas de pistón, émbolo o engranajes.
- **Turbomáquinas:** transfieren energía al fluido por variaciones en la cantidad de movimiento, modificando su velocidad y dirección. Su órgano principal es un rodete en rotación continua. Su principio de funcionamiento está regido por la ecuación general de las turbomáquinas, conocida como ecuación de Euler.

Turbomáquinas hidráulicas: Las turbomáquinas hidráulicas constituyen un subgrupo de las máquinas de fluidos en el que el rodete intercambia energía con el fluido en movimiento. Según la dirección del intercambio energético, se clasifican en:

- **Turbomáquinas motoras:** extraen energía del fluido y la convierten en energía mecánica (ejemplo: turbinas hidráulicas como Pelton, Francis o Kaplan).
- **Turbomáquinas generadoras:** transmiten energía mecánica al fluido, aumentando su energía hidráulica (ejemplo: bombas rotodinámicas, turbo ventiladores).

El análisis de estas máquinas se fundamenta en la **ecuación de Euler de las turbomáquinas**, que relaciona la variación de momento angular del fluido con la energía intercambiada en el rodete. Esta formulación constituye la base teórica para comprender el funcionamiento de bombas y turbinas, y explica cómo la variación de velocidad y dirección del fluido se traduce en energía hidráulica disponible o absorbida.

1.4.2.2 Bombas rotodinámicas – principio de funcionamiento y clasificación

Las **bombas rotodinámicas** constituyen un subgrupo de las turbomáquinas hidráulicas generadoras, en las cuales la energía se transfiere al fluido mediante un rodete en rotación. A diferencia de las bombas de desplazamiento positivo, que entregan un caudal prácticamente constante independientemente de la instalación, las bombas rotodinámicas impulsan el fluido de manera continua a través del intercambio de cantidad de movimiento. El aumento de velocidad impartido por el rodete se transforma posteriormente en presión mediante un difusor o un caracol (voluta).

Entre sus principales ventajas se destacan la simplicidad constructiva, el menor número de piezas móviles y la posibilidad de manejar grandes caudales con mantenimiento relativamente bajo. No obstante, su comportamiento hidráulico depende fuertemente de las condiciones del sistema, por lo que son sensibles a fenómenos como la cavitación o las variaciones de presión en la línea de succión.

Clasificación según la dirección del flujo interno:

- **Centrífugas:** el fluido ingresa axialmente al rodete y es impulsado radialmente hacia el exterior por efecto de la fuerza centrífuga. Son las más difundidas en la industria, debido a su versatilidad y facilidad de operación.
- **Axiales:** el flujo sigue una trayectoria paralela al eje de rotación. Se emplean en aplicaciones de gran caudal y baja carga.
- **Mixtas:** combinan el movimiento radial y axial, ofreciendo un compromiso entre altura y caudal.

Clasificación según la geometría del rodete:

- **Rotores cerrados:** los álabes se encuentran confinados entre discos. Mayor eficiencia, adecuados para líquidos limpios.

- **Rotores abiertos o semiabiertos:** permiten el paso de fluidos con sólidos en suspensión, aunque con menores rendimientos.
- **Rodete de simple aspiración:** el fluido ingresa por un solo lado del impulsor.
- **Rodete de doble aspiración:** el fluido ingresa por ambos lados, equilibrando fuerzas axiales y permitiendo mayores caudales.

En todos los casos, el rodete debe trabajar completamente lleno de líquido; por este motivo, las bombas rotodinámicas no son **autocebantes**, requiriendo que la carcasa y la succión estén previamente llenas de fluido antes de su puesta en marcha.

Principio de funcionamiento:

El intercambio energético en las bombas rotodinámicas se fundamenta en la ecuación de Euler para turbomáquinas. El rodete transmite energía cinética al fluido, aumentando su velocidad y, en consecuencia, su presión al pasar por el difusor (alabes del rodete) y la voluta.

La relación entre la altura manométrica (H) y el caudal (Q) se representa mediante la **curva característica H–Q**, en la cual se observa que, a mayor caudal, la altura disminuye.

Además de la curva H-Q, suelen representarse conjuntamente:

- **La curva de potencia absorbida (P)**, que indica el aumento de energía requerida por el motor a medida que crece el caudal; y
- **La curva de rendimiento (η)**, que alcanza un máximo en el denominado **punto de mejor eficiencia (BEP, Best Efficiency Point)**.

Estas curvas constituyen la base para interpretar el desempeño de la bomba en distintas condiciones de operación, y sirven como referencia tanto en instalaciones reales como en ensayos de laboratorio. La Figura 1 ilustra un ejemplo típico de estas relaciones para una bomba centrífuga, donde pueden apreciarse conjuntamente las variaciones de altura, potencia hidráulica y rendimiento en función del caudal.

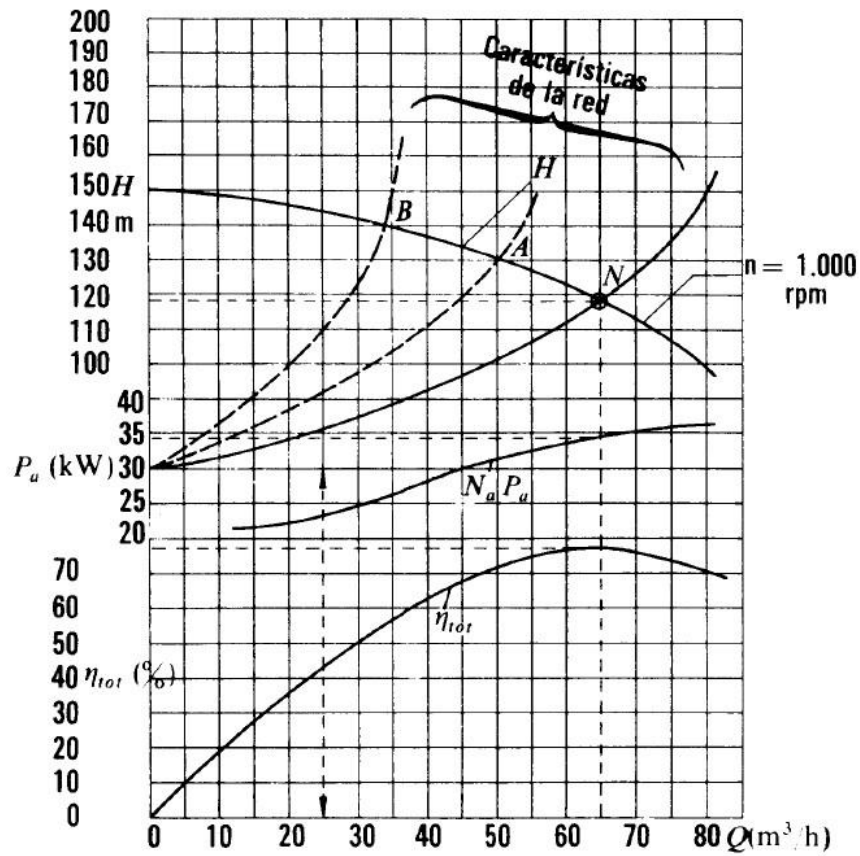


Figura 1. Curva característica H - Q con curva de potencia y rendimiento [1].

Curva de la instalación y punto de operación de un sistema de bombeo:

En los sistemas de bombeo reales, el funcionamiento de una bomba no depende únicamente de sus características hidráulicas, sino también de las condiciones impuestas por la instalación a la cual se encuentra conectada. Esta interacción se analiza mediante la denominada curva de la instalación, que representa la carga o altura requerida por el sistema para diferentes valores de caudal.

La curva del sistema surge de considerar la suma de dos componentes principales: la altura estática, asociada a diferencias de elevación entre el punto de succión y el de descarga, y las pérdidas de carga por fricción, que dependen del caudal circulante en las tuberías y accesorios. Mientras que la contribución debida a la elevación permanece constante para cualquier caudal, las pérdidas por fricción aumentan aproximadamente con el cuadrado del caudal, lo que da lugar a una curva de comportamiento típicamente parabólico.

En consecuencia, la carga total requerida por la instalación puede expresarse como la suma de ambos términos, y su representación gráfica permite visualizar cómo varía la exigencia hidráulica del sistema a medida que cambia el caudal.

El funcionamiento real del conjunto bomba–instalación se determina mediante la superposición de la curva característica de la bomba ($H-Q$) y la curva de la instalación. El punto de intersección entre ambas curvas define el denominado punto de operación o punto de trabajo del sistema, que corresponde a la única condición en la que la carga generada por la bomba coincide exactamente con la carga requerida por la instalación. En este punto se establecen simultáneamente el caudal circulante y la altura manométrica efectiva del sistema [5].

Este procedimiento constituye el método clásico para determinar el régimen de funcionamiento en instalaciones de bombeo. La Figura 2 ilustra esquemáticamente la superposición de ambas curvas y la determinación del punto de operación del sistema.

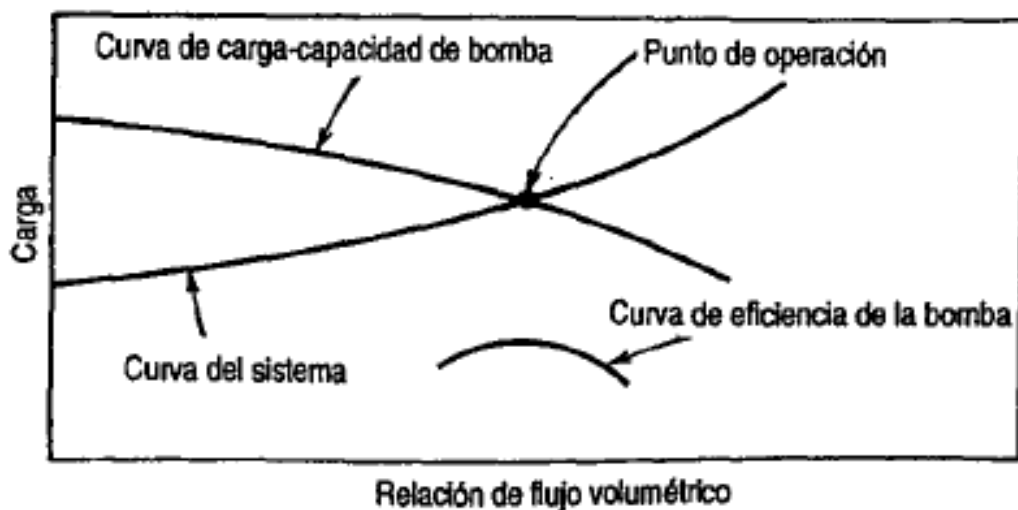


Figura 2. Curvas superpuestas de carga–caudal del sistema y de carga–capacidad de la bomba, mostrando el punto de operación [2].

En el presente trabajo, sin embargo, el objetivo no consiste en determinar un único punto de funcionamiento del sistema, como ocurre habitualmente en instalaciones de bombeo destinadas a operar en condiciones estacionarias. Dado que el banco de ensayos está concebido con fines experimentales y didácticos, se busca analizar el comportamiento hidráulico del sistema en un rango amplio de caudales. Por esta razón, en lugar de determinar exclusivamente el punto de intersección entre la curva de la bomba y la curva de la instalación, se procede a evaluar las pérdidas de carga y el ANPA disponible para distintos valores de caudal dentro del rango

operativo de la bomba, tomando como referencia la curva característica proporcionada por el fabricante. Este enfoque permite estudiar cómo varían las condiciones hidráulicas del sistema y facilita la reproducción controlada del fenómeno de cavitación bajo diferentes condiciones de operación. Cabe mencionar que tanto el ANPA disponible arriba mencionado, como el ANPA requerido y la cavitación, son tres parámetros hidráulicos fundamentales en el análisis y estudio de bombas centrífugas, cuyas definiciones y desarrollos se presentan en las secciones siguientes.

Aplicación en el banco de ensayos:

En este trabajo se utiliza una **bomba centrífuga**, seleccionada por su adaptación a un sistema cerrado de recirculación con caudales moderados. Su principio de funcionamiento — generar una depresión en la entrada del rodete para inducir el flujo— la hace especialmente propensa al fenómeno de cavitación, lo que permite reproducirlo en condiciones de laboratorio.

Cuando la presión en la entrada del rodete cae por debajo de la presión de vapor del líquido, se forman burbujas de vapor que colapsan al llegar a zonas de mayor presión, generando erosión localizada (pitting), vibraciones, ruido y pérdida de eficiencia hidráulica. Este fenómeno modifica la curva característica H–Q, reduce el caudal bombeado y puede comprometer la integridad de la bomba si no se controla adecuadamente.

Por esta razón, los fabricantes especifican un valor mínimo de ANPA (Altura Neta Positiva de Aspiración) requerida, y debe verificarse siempre que el ANPA disponible supere este valor.

1.4.2.3 Pérdidas de carga en sistemas hidráulicos

En una instalación de bombeo, las pérdidas de carga representan la disipación de energía del fluido debida al rozamiento con las paredes de la tubería y a las perturbaciones locales. Se expresan como **metros de columna de fluido (m.c.f) o, (m.c.a), si el fluido es agua** y, en la línea de succión, determinan el término h_r que interviene en el cálculo del ANPA.

Las pérdidas de carga en tuberías son de dos clases:

1. Pérdidas primarias (o distribuidas):

Se producen a lo largo de tramos rectos de tubería de diámetro constante y se calculan mediante la fórmula de **Darcy Weisbach** [1]:

$$h_{rp} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

λ = *coeficiente de fricción (Función de Re y $k/D \rightarrow$ rugosidad relativa)*

L = *longitud*

D = *diámetro*

v = *velocidad media*

El valor de λ se obtiene mediante las fórmulas de Poiseuille, Blasius, Kármán-Prandtl ó Colebrook-White según sea el tipo de régimen del fluido y el tipo de tubería (laminar, turbulento liso o turbulento rugoso).

Para obtener valores prácticos de este coeficiente, se utiliza el **diagrama de moody**, que es la representación gráfica de la ecuación de Poiseuille y la de Colebrook-White, ya que estas dos permiten el cálculo de λ en todos los casos que puedan presentarse.

Dicho coeficiente λ depende del régimen de flujo del fluido en la tubería. Este régimen se caracteriza mediante el número de Reynolds (Re), parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas del fluido y que, según bibliografía técnica como Mataix [1], se define como:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu}$$

Donde:

v = *velocidad del fluido [m/s]*

D = *Diámetro interno de la tubería [m]*

ρ = *Densidad del fluido*

μ = *Viscosidad dinámica [kg/m · s]*

ν = *Viscosidad cinemática*

No obstante, en la práctica ingenieril es habitual emplear expresiones explícitas que permiten determinar el coeficiente de fricción sin recurrir al uso de diagramas gráficos. En general, el diagrama de Moody constituye la herramienta más completa, ya que permite obtener el coeficiente de fricción en todos los regímenes de flujo. Sin embargo, en determinadas regiones del diagrama, particularmente en régimen turbulento ($Re > 5000$), es posible utilizar correlaciones explícitas que proporcionan una estimación directa del coeficiente en función del número de

Reynolds y la rugosidad relativa. Entre ellas, se destaca la ecuación de Swamee y Jain [3], ampliamente utilizada para flujo turbulento en tuberías, cuya ecuación es:

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left[\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \right]^2}$$

Esta formulación constituye una alternativa práctica a la ecuación implícita de Colebrook-White, evitando la necesidad de procedimientos iterativos para el cálculo del coeficiente de fricción.

2. Pérdidas secundarias (o localizadas):

Las pérdidas de carga secundarias (también denominadas localizadas) se originan en los accesorios, uniones y cambios de geometría del conducto, tales como válvulas, codos, entradas, salidas y tramos flexibles.

Estas pérdidas pueden calcularse mediante **dos métodos equivalentes**, ampliamente utilizados en la literatura técnica:

a) Método del coeficiente de pérdida localizada

Este método utiliza un coeficiente de pérdida secundaria adimensional, característico de cada accesorio, y se expresa mediante la siguiente relación:

$$h_{rs} = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

ζ = *coeficiente adimensional propio de cada accesorio*

v = *velocidad en la sección considerada*

g = *aceleración de la gravedad*

Los valores del coeficiente ζ se determinan a partir de datos experimentales recopilados en tablas y manuales técnicos como Cengel & Cimbala [4].

b) Método de las longitudes equivalentes

Alternativamente, las pérdidas secundarias pueden calcularse mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, con el método de longitudes equivalentes, que consiste en sustituir cada accesorio por una longitud equivalente, L_e , de tubería recta del mismo diámetro, capaz de

producir las mismas pérdidas de carga que el accesorio en cuestión. En este caso, la expresión resulta:

$$h_{rs} = \lambda \cdot \frac{\sum L_e}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

λ = factor de fricción de Darcy

L_e = longitud equivalente del accesorio

D = diámetro de la tubería

Ambos métodos son **matemáticamente equivalentes**, ya que el coeficiente de pérdida localizada puede expresarse como:

$$\zeta = \lambda \frac{L_e}{D}$$

3. Pérdidas de carga totales:

Las pérdidas de carga totales se calculan sumando las primarias y las secundarias, es decir:

$$h_r = h_{rp} + h_{rs}$$

O bien:

$$h_r = \lambda \cdot \frac{L + \sum L_e}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Estas pérdidas reducen la presión en la entrada de la bomba, por lo tanto, a mayor h_r , menor ANPA disponible y mayor riesgo de cavitación.

1.4.2.4 Coeficiente de pérdidas localizadas en válvulas de control de flujo

En la mayoría de los accesorios hidráulicos habituales —como codos, reducciones, entradas o uniones— el coeficiente de pérdida localizada ζ puede considerarse constante para un rango amplio de condiciones de operación, ya que su geometría permanece fija y el flujo no sufre modificaciones sustanciales en su configuración interna. Por esta razón, los valores tabulados recopilados en manuales técnicos resultan suficientes para su determinación en el cálculo de pérdidas secundarias.

Sin embargo, esta hipótesis de coeficiente constante no resulta estrictamente válida en el caso de las válvulas, cuya función principal es precisamente regular el paso del fluido mediante la variación de su sección efectiva de circulación. En estos dispositivos, el grado de apertura modifica de manera significativa la configuración del flujo interno, alterando la caída de presión generada y, por lo tanto, el coeficiente de pérdida asociada.

En particular, la válvula de globo —empleada en la línea de succión del banco de ensayos— presenta un comportamiento marcadamente no lineal en régimen de estrangulamiento. Si bien en el desarrollo base de los cálculos se adopta el valor tabulado correspondiente a la condición de válvula completamente abierta, resulta pertinente analizar cómo varía dicho coeficiente cuando la válvula opera con aperturas parciales.

Con el fin de abordar este comportamiento de manera más rigurosa, se introduce a continuación el concepto de coeficiente de caudal (K_v), ampliamente utilizado en ingeniería de válvulas de control. Este parámetro permite describir cuantitativamente la relación entre el caudal y la caída de presión a través de la válvula para distintos grados de apertura, posibilitando así modelar la variación del coeficiente de pérdida localizada en función del estrangulamiento. De este modo, resulta factible analizar cómo la modificación del grado de apertura impacta directamente en las pérdidas secundarias de la línea de succión, alterando el valor total de las pérdidas de carga y, en consecuencia, el ANPA disponible del sistema.

Variación del coeficiente de pérdidas en válvulas de control:

En el ámbito de la ingeniería de válvulas de control, la caracterización hidráulica no suele realizarse mediante un coeficiente de pérdida localizada constante, sino a través del denominado coeficiente de caudal K_v , el cual relaciona el caudal que atraviesa la válvula con la caída de presión generada por la misma.

De acuerdo con lo expuesto en manuales técnicos como Crane Technical Paper 410 [5], el coeficiente de caudal K_v se define como el caudal volumétrico de agua a 20 °C, expresado en m³/h, que produce una caída de presión de 1 bar a través de la válvula completamente abierta. Su expresión general es:

$$Q = K_v \sqrt{\frac{\Delta P}{GE}}$$

Donde:

Q = Caudal circulante [m³/h]

ΔP = Caída de presión a través de la válvula [bar]

GE = Gravedad específica del fluido respecto al agua [adim] = 1 si el fluido es agua

Despejando la caída de presión, se tiene:

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{K_v} \right)^2 \cdot GE$$

Para expresar ΔP en Pa en vez de en bar, se debe hacer la conversión partiendo de que $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, entonces, podemos definir $\Delta P[\text{Pa}]$ como:

$$\Delta P = 10^5 \left(\frac{Q}{K_v} \right)^2 \cdot GE$$

Para expresar la pérdida de carga en metros de columna de agua, se emplea la relación fundamental de la mecánica de fluidos respaldada en bibliografía técnica como Cengel & Cimbala [4]:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

Donde:

$\rho = \text{Densidad del fluido } [\text{kg}/\text{m}^3]$

$g = \text{Aceleración de la gravedad } [\text{m}/\text{s}^2]$

En consecuencia, la pérdida de carga generada por la válvula puede determinarse, para cada grado de apertura, a partir del coeficiente K_v .

Relación con el coeficiente de pérdida localizada:

A efectos de integrarlo con el método clásico, puede establecerse la equivalencia entre la expresión anterior y la forma habitual de pérdidas secundarias o localizadas para una válvula:

$$h = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

Y recordando que:

$$\Delta P = 10^5 \left(\frac{Q}{K_v} \right)^2 \cdot GE \quad ; \quad h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

Podemos reemplazar ΔP obteniendo:

$$h = \frac{10^5}{\rho g} \left(\frac{Q}{K_v} \right)^2 \cdot GE$$

Igualando ambas expresiones, se obtiene:

$$\frac{10^5}{\rho g} \left(\frac{Q}{K_v} \right)^2 \cdot GE = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

Ahora bien, también sabemos que

$$Q = v \cdot A \quad \therefore \quad v = \frac{Q}{A}$$

Pero este Q, en realidad está en m³/s, y como el coeficiente de caudal k_v están en m³/h, hacemos:

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{Q \left[\frac{m^3}{h} \right]}{3600}$$

Entonces:

$$v = \frac{Q}{3600A}$$

Por lo tanto, reemplazando esta velocidad en la igualdad de ecuaciones anterior, obtenemos:

$$\frac{10^5}{\rho g} \left(\frac{Q}{K_v} \right)^2 \cdot GE = \zeta \frac{\left(\frac{Q}{3600A} \right)^2}{2g}$$

$$\frac{10^5}{\rho g} \frac{Q^2}{K_v^2} \cdot GE = \zeta \frac{Q^2}{3600^2 A^2 2g}$$

$$\frac{10^5}{\rho g} \frac{Q^2}{K_v^2} \cdot GE = \zeta \frac{Q^2}{3600^2 A^2 2g}$$

Teniendo en cuenta que GE = 1 ya que el fluido es agua y simplificando Q² y g, obtenemos:

$$\frac{10^5}{K_v^2 \rho} = \frac{\zeta}{3600^2 A^2 2}$$

Finalmente, se obtiene

$$\zeta = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 3600^2 A^2}{K_v^2 \rho}$$

Por lo tanto, se observa que el coeficiente de pérdida de una válvula queda en función del k_v, y si k_v es variable, entonces ζ también será variable.

De esta manera, es posible determinar un coeficiente de pérdida ζ para cada grado de apertura, permitiendo comparar el modelo basado en K_v con el enfoque tradicional de coeficientes tabulados.

Dependencia del coeficiente de caudal con el grado de apertura:

Las válvulas de control presentan curvas características que describen la variación del coeficiente de caudal en función del recorrido del obturador. Estas curvas pueden ser lineales, de igual porcentaje o de apertura rápida, dependiendo del diseño interno del elemento.

En ausencia de la curva característica específica del fabricante para posiciones intermedias, es habitual adoptar una aproximación funcional que permita modelar el comportamiento no lineal del estrangulamiento. En el presente trabajo se emplea la siguiente expresión:

$$k_v(\alpha) = k_{v\ 100} \cdot \left(\frac{\alpha}{100}\right)^n$$

Donde:

$k_{v\ 100}$ = Coeficiente de caudal con la válvula completamente abierta

α = % de apertura

n = Exponente de relación entre aperturas

Esta fórmula permite obtener, para cada valor de apertura, la caída de presión correspondiente y, por lo tanto, la pérdida de carga asociada.

Cabe destacar que en el desarrollo base del diseño del banco de ensayos se adopta el coeficiente correspondiente a la válvula completamente abierta, mientras que el modelo basado en K_v se utiliza exclusivamente con fines de análisis paramétrico, para evaluar la influencia del estrangulamiento progresivo sobre el ANPA disponible.

Este enfoque permite desplazar la curva de ANPA disponible sin modificar la geometría del sistema, posibilitando el estudio experimental del fenómeno de cavitación bajo distintas condiciones de apertura de la válvula.

1.4.2.5 Cavitación – fundamentos y características

La cavitación es un fenómeno que se produce en los líquidos cuando la presión local desciende por debajo de la presión de vapor, originando la formación de cavidades o burbujas de vapor. Con el propósito de ilustrar este comportamiento, en la Figura 3 se presenta un diagrama P–V del agua. En él se observa que, para una temperatura constante, la disminución de la presión puede hacer que el estado del fluido abandone la región líquida e ingrese en la zona de mezcla líquido–vapor. Esta situación representa, en términos termodinámicos, la condición que da origen a la cavitación cuando se alcanza localmente la presión de vapor del líquido.

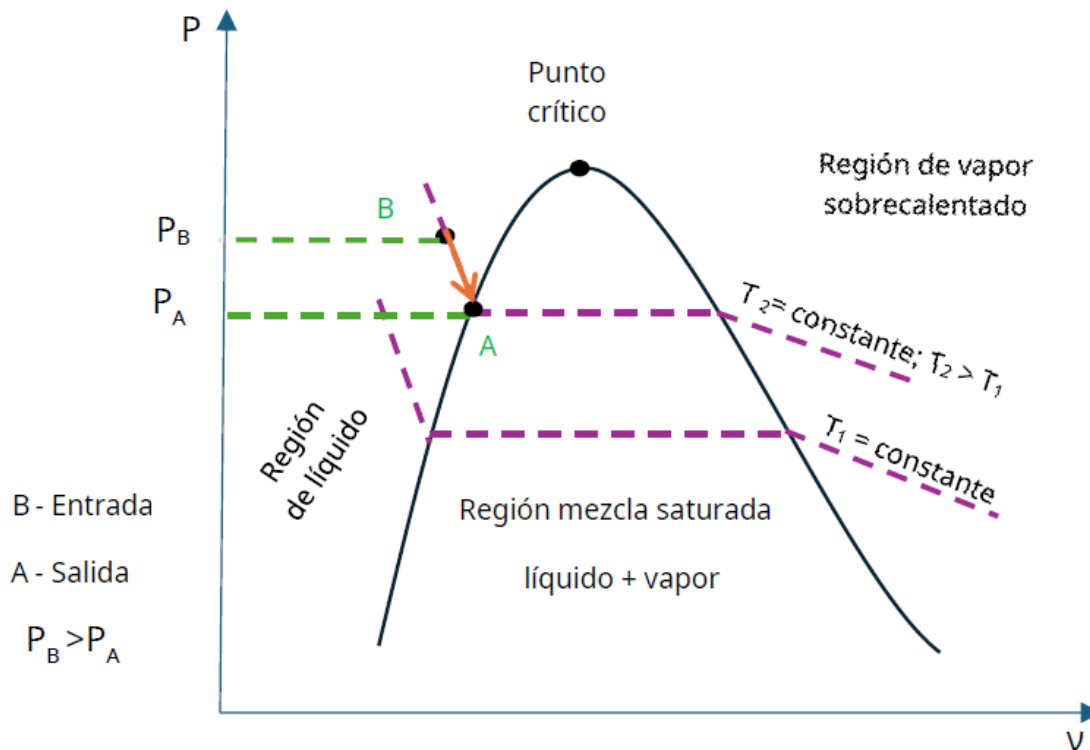


Figura 3. Diagrama P-V del agua [6].

En el diagrama, puede observarse que el punto correspondiente al estado inicial del fluido en la región líquida (punto B) se encuentra a una presión superior a la presión de vapor para la temperatura considerada. Sin embargo, a medida que el fluido experimenta una disminución de presión — por ejemplo, al ingresar a la zona de succión del rodete— su estado puede desplazarse hacia condiciones de menor presión (punto A), aproximándose a la curva de saturación. Cuando esta presión alcanza el valor de la presión de vapor, el líquido comienza a evaporarse localmente, dando origen a la formación de cavidades de vapor. Estas burbujas, experimentan ciclos de crecimiento y colapso en función de las variaciones de presión del fluido, tal y como se observa en la Figura 4.

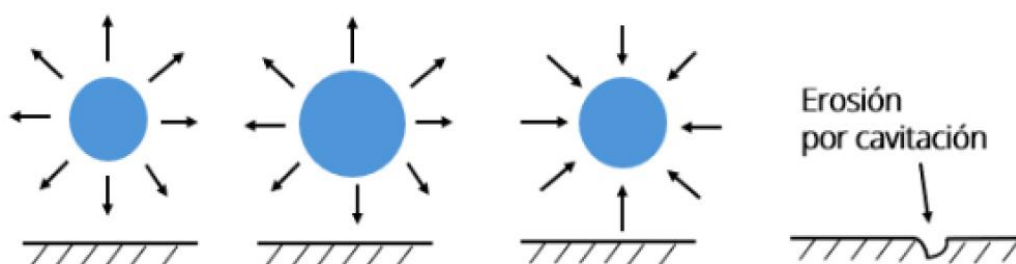


Figura 4. Mecanismo de onda de choque en una burbuja de vapor [6].

Cuando las burbujas de vapor alcanzan zonas de mayor presión, colapsan violentamente y generan ondas de choque de gran intensidad, provocando efectos mecánicos —como picaduras (pitting) en superficies metálicas, erosión acelerada de álabes y carcasa—, tal y como puede observarse en la Figura 5.



Figura 5. Rodete de una bomba bajo los efectos de la cavitación [7].

Además, provocan efectos dinámicos, tales como vibraciones, ruidos anómalos y pérdida de estabilidad en la operación. A nivel de rendimiento, la cavitación se traduce en una caída del caudal y de la altura manométrica entregada por la bomba, junto con un aumento del consumo energético.

En bombas centrífugas, la cavitación aparece principalmente en la entrada del rodete, donde se generan depresiones locales que pueden alcanzar valores inferiores a la presión de vapor del fluido bombeado. Si esta condición se mantiene, el deterioro del equipo puede volverse progresivo, comprometiendo la integridad de la instalación.

Entre las causas más frecuentes de cavitación incluyen:

- Excesiva altura de aspiración o insuficiente presión en la entrada.
- Pérdidas elevadas en la línea de succión (accesorios, codos, válvulas).
- Presencia de burbujas de aire o gases disueltos en el fluido.

A su vez, existen factores que agravan el fenómeno, tales como la elevada temperatura del fluido, la presencia de partículas sólidas en suspensión o rugosidades internas que favorezcan la nucleación de burbujas.

La cavitación puede analizarse también mediante criterios cuantitativos. Uno de los más utilizados es el coeficiente de cavitación (σ), que relaciona la presión absoluta en la entrada de la bomba con la presión de vapor del líquido. Otro enfoque práctico es la determinación de la altura máxima de aspiración ($H_{s \text{ máx}}$) permitida, parámetro directamente vinculado con la Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA).

Por su impacto tanto en la vida útil de los equipos como en la eficiencia del sistema, el estudio de la cavitación resulta fundamental en ingeniería hidráulica. Una correcta evaluación de las presiones de trabajo, de las condiciones de aspiración y de las características del fluido permite prever su aparición. En este trabajo, la cavitación no solo se considera como fenómeno indeseado, sino que se busca provocarla en condiciones seguras y controladas con fines didácticos, de manera de analizar sus efectos y comprender mejor la interacción entre bomba y sistema.

Altura neta positiva de aspiración (ANPA):

La Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA) es un parámetro fundamental en el diseño y operación de sistemas de bombeo, ya que determina la energía disponible en la entrada de la bomba para que el fluido llegue al rodete sin que su presión descienda por debajo de la presión de vapor. El valor de ANPA debe ser suficiente para evitar la formación de cavidades de vapor y, por lo tanto, la cavitación.

Se distinguen dos conceptos complementarios:

ANPA disponible: es la altura real con la que cuenta la instalación en el punto de succión de la bomba. Depende de la presión atmosférica en el lugar de operación, la altura estática del fluido respecto al eje de la bomba, las pérdidas de carga en la línea de aspiración y la presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo.

ANPA requerida: es un valor característico de cada bomba, suministrado por el fabricante, que indica la altura mínima necesaria para que la bomba funcione sin cavitación.

La condición de funcionamiento seguro se expresa como:

$$ANPA_{disp} > ANPA_{req}$$

Cuando esta desigualdad no se cumple, la presión en la succión cae por debajo de la presión de vapor y se inicia el proceso de cavitación.

Matemáticamente, la definición de ANPA disponible, viene dada por la ecuación [1]:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_t - P_s}{\gamma} - H_s - h_r$$

donde:

P_t = Presión en el tanque (o P_{atm} si el tanque es abierto)

P_s = Presión de saturación (o presión de vapor) del fluido de trabajo

H_s = Altura geométrica de aspiración

h_r = Pérdidas de carga en la línea de succión

γ = Peso específico del fluido de trabajo.

Es decir, que podemos calcular el $ANPA_{disp}$ en función de la presión en el tanque, de la altura geométrica de aspiración y de las pérdidas de carga en la tubería de succión.

Por otra parte, planteando Bernoulli entre la superficie libre del tanque y la entrada de la bomba (Como se ve en la Figura 6), se tiene:

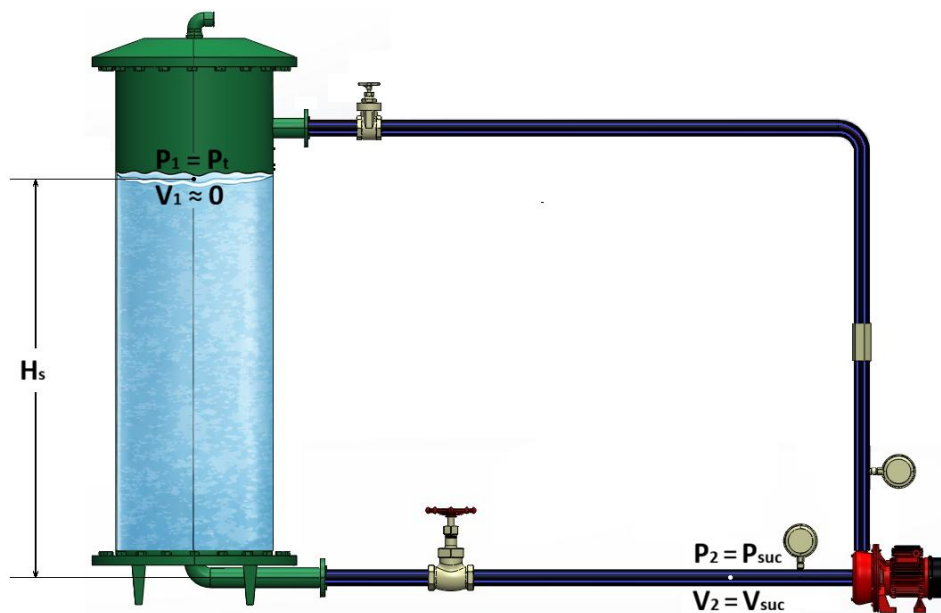


Figura 6. Esquema del circuito hidráulico – Aplicación de Bernoulli.

Fuente: Del autor.

$$\frac{P_t}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_r = \frac{P_{suc}}{\gamma} + z_2 + \frac{V_{suc}^2}{2g}$$

donde:

P_t = Presión en el tanque (o P_{atm} si el tanque es abierto)

P_s = Presión de saturación (o presión de vapor) del fluido de trabajo

v_1 = Velocidad del fluido en el tanque

z_1 = Altura geométrica del agua en el tanque

v_{suc} = Velocidad del fluido en la tubería de succión

z_2 = Altura geométrica del agua en la tubería de succión

h_r = Pérdidas de carga en la línea de succión

γ = Peso específico del fluido de trabajo.

Reagrupando y considerando que la velocidad a la que disminuye el fluido dentro del tanque es casi nula, se tiene:

$$\frac{P_t}{\gamma} = \frac{P_{suc}}{\gamma} + z_2 - z_1 + \frac{V_{suc}^2}{2g} + h_r$$

Llamando $H_s = z_2 - z_1$ y despejando P_t / γ , se obtiene:

$$\frac{P_t}{\gamma} = \frac{P_{suc}}{\gamma} + H_s + \frac{V_{suc}^2}{2g} + h_r$$

Donde:

H_s = Altura geométrica de aspiración

Cabe señalar que, según el esquema de la Figura 6, la altura geométrica de aspiración, H_s , resulta negativa. Esto se debe a que la bomba se encuentra instalada “en carga”, es decir, por debajo del nivel del fluido del tanque. En esta configuración, la columna de agua situada sobre la succión de la bomba contribuye a aumentar el ANPA disponible. Matemáticamente, esto se explica porque H_s aparece restando en la expresión del ANPA, sin embargo, al tratarse de un valor negativo, su efecto final es equivalente a una suma, incrementando así el valor de este parámetro.

Reemplazando esta última ecuación en la ecuación de definición de $ANPA_{disp.}$, se obtiene:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_{suc}}{\gamma} + H_s + \frac{V_2^2}{2g} + h_r - \frac{P_s}{\gamma} - H_s - h_r$$

Reordenando y simplificando, obtenemos:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_{suc} - P_s}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Es decir, que también podemos calcular el $ANPA_{disp}$ mediante la lectura de presión en la succión y la velocidad en la tubería de aspiración [1] (que podemos obtener mediante la ec. de continuidad en función del caudal)

De manera intuitiva, el significado de la Altura Neta Positiva de Aspiración, puede resumirse así:

$ANPA_{disp} > ANPA_{req}$: Operación segura, sin cavitación.

$ANPA_{disp} = ANPA_{req}$: Operación al límite, con riesgo inminente de cavitación.

$ANPA_{disp} < ANPA_{req}$: Operación con cavitación segura.

En la Figura 7 se presenta un gráfico típico del comportamiento hidráulico de una bomba centrífuga, en el cual se representa la variación de la altura manométrica entregada por la bomba y de la Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA) en función del caudal. En particular, se muestran las curvas correspondientes a la ANPA disponible de la instalación y a la ANPA requerida por la bomba, cuya intersección define el límite de operación sin cavitación. Este tipo de representación permite identificar claramente las regiones de funcionamiento seguro y aquellas en las que se inicia el fenómeno de cavitación, resultando de gran utilidad para el análisis y comprensión del comportamiento del sistema de bombeo.

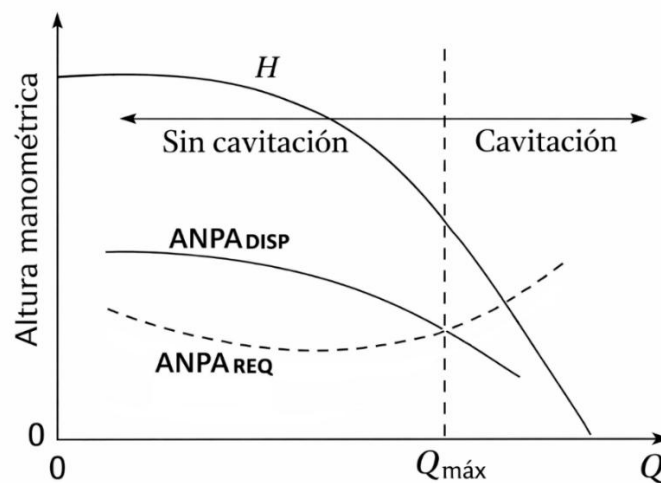


Figura 7. Comportamiento del ANPA disponible y del ANPA requerido en función del caudal.

Fuente: Del autor, a partir de [8].

En la práctica, los fabricantes indican en sus catálogos la curva de **ANPA requerido vs. caudal**, que debe compararse con el ANPA disponible calculado para la instalación. No obstante, cuando dicha información no se encuentra disponible, es posible estimar el ANPA requerido

mediante criterios teóricos basados en el coeficiente de cavitación de Thoma, que, según Mataix [1], se define como:

$$\sigma = \frac{\Delta h}{H}$$

Donde:

σ = Coeficiente de cavitación de Thoma

Δh = Caída de altura de presión en el interior de la bomba

H = Altura manométrica entregada por la bomba

En condiciones críticas de cavitación, la caída de presión interna alcanza el valor mínimo admisible y se cumple que:

$$\Delta h = ANPA_{Req}$$

Por lo tanto, el coeficiente adopta un valor crítico, que se define como:

$$\sigma_{crit} = \frac{ANPA_{Req}}{H}$$

De donde se obtiene:

$$ANPA_{Req} = \sigma_{crit} \cdot H$$

Esta formulación permite relacionar directamente la condición de cavitación con la curva característica H–Q de la bomba, posibilitando la determinación de la ANPA requerida para cada punto de operación.

El coeficiente de Thoma constituye, además, un parámetro adimensional ampliamente utilizado en el análisis comparativo de bombas, ya que permite evaluar la susceptibilidad a la cavitación de distintos diseños bajo criterios normalizados. Valores menores de σ_{crit} indican bombas menos sensibles a la cavitación, mientras que valores mayores reflejan mayor exigencia en términos de ANPA disponible. Por esta razón, el coeficiente resulta especialmente útil tanto en estudios teóricos como en procesos de selección y comparación de equipos.

En bombas centrífugas convencionales, el valor del coeficiente crítico puede estimarse a partir de correlaciones empíricas que lo vinculan con el número específico de revoluciones (n_s), parámetro que caracteriza la geometría hidráulica del rodete. Una expresión ampliamente utilizada, propuesta por Stepanoff y citada por Mataix [1], establece que:

$$\sigma_{crit} = 2,14 \times 10^{-4} \cdot n_s^{4/3}$$

Esta expresión surge de correlaciones experimentales y, como toda formulación empírica, debe interpretarse como una herramienta de estimación. Por lo tanto, los valores obtenidos mediante este procedimiento representan una aproximación razonable para el análisis preliminar del fenómeno de cavitación.

El número específico de revoluciones se define como:

$$n_s = 3.65 \cdot \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Donde:

n = velocidad de rotación (número de revoluciones) [rpm]

Q = caudal correspondiente al punto de máximo rendimiento (BEP) [m^3/s]

H = Altura manométrica entregada por la bomba en dicho punto [m]

Esta expresión, vincula la condición límite de cavitación con el número específico de revoluciones, parámetro representativo de la geometría hidráulica del rodete y permite estimar el valor de σ_{crit} cuando el fabricante no proporciona directamente la curva de ANPA requerida. Dado que el número específico de revoluciones está directamente relacionado con la configuración geométrica del rodete, se desprende que la susceptibilidad a la cavitación constituye una característica intrínseca del diseño hidráulico de la bomba.

En bancos de ensayo como el desarrollado en este trabajo, el objetivo es reducir progresivamente el ANPA disponible hasta alcanzar condiciones próximas al valor requerido, generando cavitación en un entorno controlado y seguro para su estudio.

1.4.2.6 Métodos para inducir cavitación en laboratorio:

En condiciones industriales, la cavitación es un fenómeno indeseado que debe prevenirse, pero en el ámbito académico puede ser provocada de manera controlada con fines didácticos y de investigación. El objetivo en un banco de ensayos es, por lo tanto, reducir la Altura Neta Positiva de Aspiración disponible ($ANPA_{disp}$) hasta llevarla a valores próximos o inferiores a la ANPA requerida de la bomba, asegurando siempre un entorno de operación seguro.

Los principales métodos utilizados son:

Estrangulamiento de la válvula de succión: consiste en cerrar progresivamente una válvula ubicada en la línea de aspiración, lo que incrementa las pérdidas localizadas y disminuye el ANPA disponible. Es un método simple y económico, aunque no siempre suficiente para inducir cavitación por sí solo.

Elevación de la temperatura del fluido: al aumentar la temperatura del agua se incrementa la presión de vapor, reduciendo la diferencia con la presión absoluta en succión y, por lo tanto, el ANPA disponible. Pero dado que su aplicación requiere resistencias eléctricas o intercambiadores de calor, lo que eleva el costo y la complejidad, esta alternativa se descartó en el presente trabajo.

Incorporación de trayectos con pérdidas adicionales: agregar codos, reducciones o tramos rugosos en la línea de succión aumenta las pérdidas distribuidas o localizadas, disminuyendo el ANPA disponible. Este enfoque fue analizado en un diseño preliminar mediante el denominado “*camino codado*”, que incorporaba múltiples codos en serie. Sin embargo, los cálculos demostraron que las pérdidas provocadas resultaban insuficientes para inducir cavitación. Esto se debe a que la bomba, al estar instalada en carga (con el nivel del fluido por encima del eje), cuenta con un valor de ANPA disponible relativamente elevado. En estas condiciones, aun sumando numerosos accesorios, las pérdidas no alcanzaban para reducir la presión en la entrada por debajo de la presión de vapor. Por este motivo, el método no garantizaba la aparición del fenómeno en condiciones controladas y fue descartado en favor de alternativas más efectivas.

Aplicación de vacío sobre el tanque: método adoptado en el diseño definitivo del banco. El uso de un tanque metálico hermético reacondicionado, combinado con una bomba de vacío, permite disminuir la presión absoluta en la superficie libre del fluido, reduciendo el ANPA disponible hasta inducir cavitación de manera segura y repetible. Esta alternativa resultó la más adecuada para fines didácticos, asegurando tanto la observación del fenómeno como la preservación de los equipos.

1.4.2.7 Variables de medición y parámetros de análisis en ensayos hidráulicos

En los ensayos hidráulicos, ya sean académicos o industriales, la correcta medición de variables clave es esencial para comprender el comportamiento del sistema y validar los objetivos planteados. En el caso del banco de ensayos diseñado en este trabajo, se contempla el registro y análisis de una serie de parámetros que permiten evaluar tanto el funcionamiento normal de la bomba como la aparición de cavitación.

Las variables más relevantes a medir incluyen:

Presión: se mide en la entrada (succión) y salida (descarga) de la bomba. Es fundamental para calcular la altura manométrica, el ANPA disponible y para detectar caídas bruscas de presión

que podrían estar asociadas a cavitación. Se utilizarán manómetros y vacuómetros según la ubicación.

Caudal: representa el volumen de fluido que circula por unidad de tiempo. Su medición es clave para construir la curva característica H-Q de la bomba, y para observar cómo varía el caudal ante condiciones cercanas a la cavitación. Se utilizará un caudalímetro adecuado al rango de operación del sistema.

Temperatura: Medir esta variable, es especialmente relevante en este trabajo, para monitorear que la temperatura no se eleve accidentalmente durante los ensayos, para dejar abierta la posibilidad de que, en el futuro, se use el banco con fluidos a distinta temperatura (uso pedagógico más amplio) y afecta directamente la presión de vapor del líquido, y por lo tanto al ANPA disponible. Se utilizarán termómetros de contacto o digitales según disponibilidad.

1.4.3 Estado del arte

En el campo de la ingeniería hidráulica aplicada, existen diversos antecedentes sobre el diseño y construcción de bancos de ensayo destinados al estudio del fenómeno de cavitación en bombas centrífugas. Estos trabajos, mayoritariamente desarrollados en el ámbito universitario, tienen como objetivo principal brindar una herramienta experimental para la observación controlada de un fenómeno que, si bien es ampliamente abordado en la teoría, suele carecer de espacios adecuados para su análisis práctico.

Un caso destacado es el proyecto desarrollado en la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia) [9], donde se diseñó y construyó un banco de pruebas para bombas centrífugas de pequeño porte, con fines académicos. En dicho proyecto, la cavitación fue inducida mediante el uso de una bomba de vacío que generaba depresión en el tanque de recirculación, lo que permitía reducir la presión absoluta en la succión de la bomba. La experiencia demostró la viabilidad técnica y pedagógica de este tipo de instalaciones, y sirvió como base conceptual para el presente trabajo.

Otro antecedente relevante es el caso de un proyecto realizado en Bogotá [10], donde se evaluó el comportamiento de una bomba centrífuga sometida a variaciones de temperatura del fluido. El objetivo fue analizar cómo la elevación de la temperatura afectaba la presión de vapor del agua y, en consecuencia, la ANPA disponible. Si bien el enfoque fue interesante desde el punto de vista teórico, su implementación práctica resultó más compleja debido a la necesidad de incorporar dispositivos de calentamiento que encarecían el sistema.

En función del análisis de estos antecedentes, el presente trabajo toma como referencia los aspectos positivos de cada uno: el enfoque experimental riguroso del trabajo de Pereira [9], y la comprensión teórica profunda del fenómeno abordada en el trabajo de Bogotá [10]. Sin

embargo, se propone un enfoque adaptado al contexto institucional local, priorizando soluciones económicamente viables, seguras y replicables.

En este sentido, si bien en una primera instancia se descartó el uso de vacío como método principal —debido a la imposibilidad de contar con un tanque hermético adecuado—, la posterior disponibilidad de un tanque metálico reacondicionado permitió finalmente implementar esta estrategia. De este modo, la cavitación puede ser inducida de manera controlada aplicando vacío sobre la superficie libre del líquido. Se descartó, en cambio, la alternativa de calentar el fluido, por los costos y complejidad adicionales que implicaría. El diseño definitivo incluye instrumentación adecuada para monitorear variables clave y la elaboración de una guía teórico - práctica, con el fin de maximizar el aprovechamiento didáctico del banco dentro de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS Y DESARROLLO

2.1 Descripción general del proyecto

El presente trabajo final consiste en el diseño y cálculo de un banco de ensayos destinado al análisis del funcionamiento de bombas centrífugas, tanto en condiciones normales como en presencia del fenómeno de cavitación inducida. El objetivo principal es desarrollar una herramienta didáctica que permita complementar la enseñanza teórica de asignaturas como Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas, mediante la observación práctica de variables hidráulicas reales y fenómenos complejos en condiciones controladas.

El banco está pensado para ser instalado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA), y contará con un sistema cerrado de recirculación de agua, operado mediante una bomba centrífuga marca Motorarg, modelo BC 100 T, como la que puede observarse en la Figura 8.



Figura 8. Fotografía de la bomba centrífuga real a utilizar en el banco de ensayos.

Fuente: Del autor.

Dicha bomba cuenta con una potencia de 1 HP (0,75 kW), 2800 rpm, alimentación trifásica 3×380 V – 50 Hz, con un rango de operación comprendido entre 0,5 y 5,7 m³/h y alturas manométricas entre 6 y 32 m.c.a. Estos parámetros pueden observarse en la placa de la bomba de la Figura 9.



Figura 9. Fotografía de la placa de características de la bomba centrífuga BC100T.

Fuente: Del autor.

La configuración de diseño adoptada contempla el uso de un tanque hermético reacondicionado como el que se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Fotografía del tanque hermético vertical a utilizar en el banco de ensayos.

Fuente: Del autor.

Este tanque correspondía, originalmente, a un equipo de ablandamiento de agua empleado en una caldera industrial. Se trata de un recipiente metálico de configuración vertical, diseñado para operar con fluidos a presión, el cual fue reacondicionado para su utilización en el presente trabajo, ya que, por su geometría y robustez estructural, lo convierten en un elemento adecuado para la implementación de un sistema cerrado en el cual es posible controlar la presión interna mediante la aplicación de vacío.

En este contexto, se prevé el uso de una bomba de vacío externa, como la que se observa en la Figura 11.



Figura 11. Fotografía de la bomba de vacío a utilizar en el banco de ensayos.

Fuente: Del autor.

Dicha bomba, marca DOSIVAC, modelo DV 95 SR, cuenta con una potencia de 1/4 HP, velocidad de 1440 rpm, alimentación monofásica de 220 V – 50 Hz, y un caudal nominal de 5,7 m³/h, siendo capaz de alcanzar un nivel de vacío del orden de 0,02 Hg, tal y como puede observarse en las fotos de su placa, mostradas en la Figura 12.

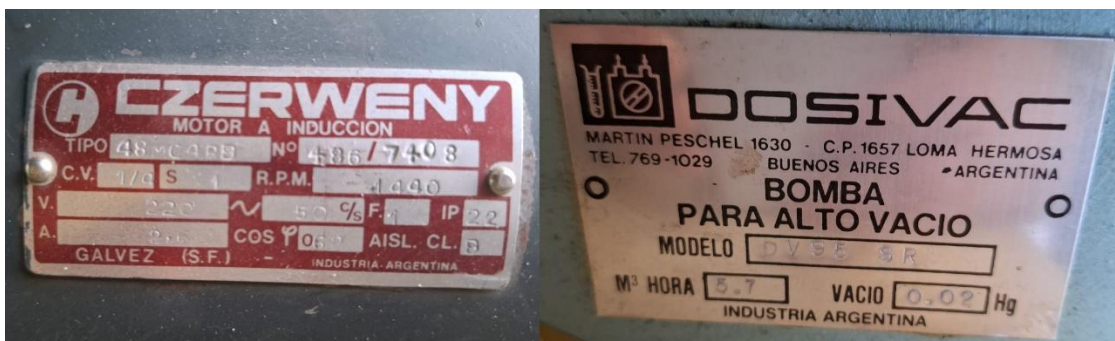


Figura 12. Fotografía de las placas de características de la bomba de vacío.

Fuente: Del autor.

El uso de esta bomba permitirá reducir la presión absoluta sobre la superficie libre del líquido y, de este modo, disminuir el ANPA disponible para provocar cavitación de manera controlada. Las especificaciones completas de la bomba centrífuga [11] y de la bomba de vacío [12] se incluyen en los Anexos A y B, respectivamente.

Esta configuración fue seleccionada luego de analizar varias alternativas preliminares que permitieran inducir cavitación en forma controlada. Los análisis detallados de dichas alternativas se presentan en la Sección 2.3.

La bomba centrífuga, la bomba de vacío y el tanque hermético junto a una red de cañerías de PEAD (polietileno de alta densidad) termofusionable, válvulas, accesorios e instrumentación, conformarán la instalación básica del sistema. En la Figura 13 se presenta un ejemplo del tipo de cañería a emplear en el banco de ensayos.

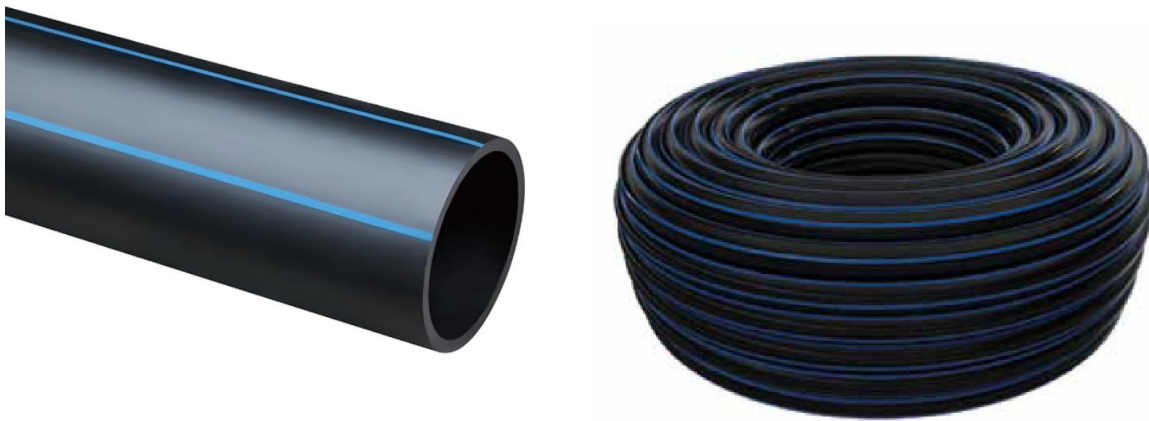


Figura 13. Cañería de PEAD termofusionable [13] [14].

La selección de estos elementos estará condicionada por la disponibilidad en el mercado local, el presupuesto asignado y la seguridad operativa.

A fin de ilustrar la configuración general adoptada y la disposición espacial de los principales componentes del sistema, en la Figura 14, se presenta el modelo tridimensional del banco de ensayos diseñado.

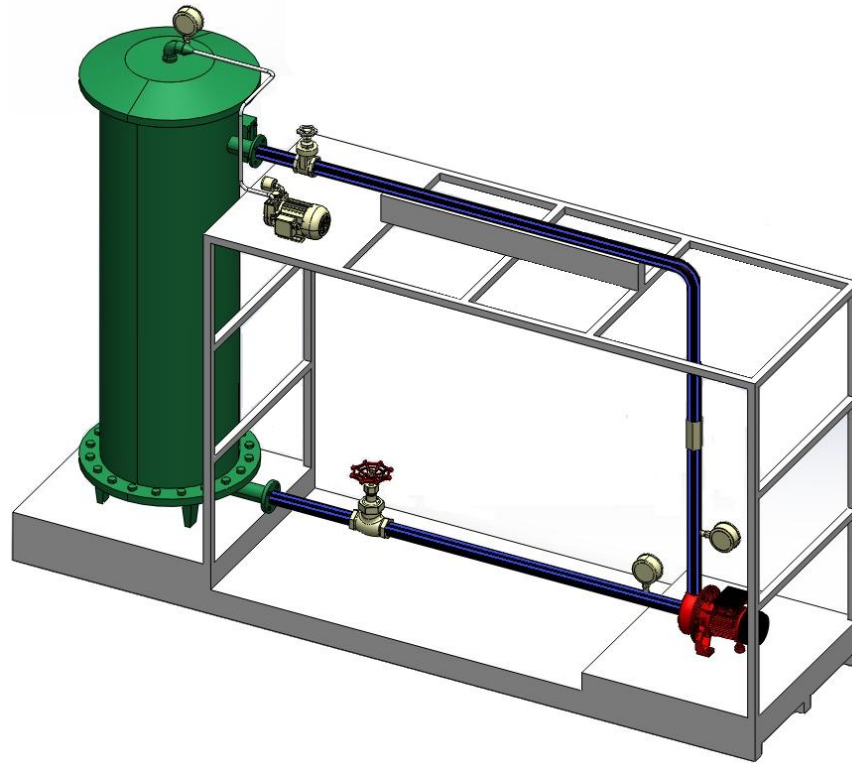


Figura 14. Prototipo en 3D del banco de ensayos.

Fuente: Del autor.

En la figura anterior se presenta el modelo tridimensional del banco de ensayos diseñado, el cual permite visualizar la disposición general de los principales componentes del sistema. En dicha vista se identifican el tanque hermético reacondicionado, la estructura portante del banco, la bomba centrífuga de ensayo, la bomba de vacío externa, la red de cañerías de succión y descarga, las válvulas de aislamiento y de regulación de caudal, así como la instrumentación asociada para la medición de las variables hidráulicas. El modelo tridimensional fue desarrollado con el objetivo de facilitar la comprensión global del conjunto, servir de base para la elaboración de los planos técnicos y evaluar aspectos constructivos y de montaje previos a la eventual materialización del banco.

El diseño incluirá además planos técnicos y modelados tridimensionales en SolidWorks, un análisis de costos, una evaluación del impacto ambiental, consideraciones de seguridad operativa y la elaboración de una guía de trabajos prácticos diseñada específicamente para esta instalación. La documentación técnica del conjunto y de la estructura portante se incluyen en el Apéndice C, donde se presentan el plano de la estructura soporte y el plano de conjunto del banco de ensayos. Todo el desarrollo estará orientado a permitir la futura construcción e implementación

del prototipo, con un enfoque práctico, accesible y alineado con las necesidades reales de la institución.

2.2 Condiciones y restricciones del entorno

El diseño del banco de ensayos se realizó considerando las condiciones reales del entorno físico en el cual se prevé su futura instalación. En particular, se eligió un sector del subsuelo del edificio de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA), que fue recientemente reacondicionado con la colaboración de estudiantes becarios, con el fin de destinarlo a este tipo de desarrollos experimentales.

Este espacio, si bien cuenta con dimensiones adecuadas para el armado del banco, presenta ciertas restricciones que debieron ser tenidas en cuenta desde el inicio del diseño. Por un lado, la accesibilidad al subsuelo se realiza por una rampa de hormigón, lo que sugiere que la estructura del banco sea modular, transportable y fácil de montar y desmontar. Además, el espacio puede ser compartido con otros usos, por lo que se priorizó un diseño compacto y con posibilidad de ser reubicado en caso de ser necesario. Las dimensiones generales y la configuración de la estructura portante diseñada se detallan en el Apéndice C (plano BE-EST-001).

Otra limitación relevante es la ausencia de alimentación eléctrica trifásica en el sector designado. Dado que la bomba seleccionada es trifásica, se incorporará un variador de frecuencia que permita su funcionamiento mediante la red monofásica disponible. Este dispositivo resuelve la compatibilidad eléctrica del sistema y permite un arranque progresivo y controlado del equipo. No obstante, el análisis hidráulico desarrollado en el presente trabajo se basa en velocidad de giro constante, considerando que la variación del caudal se realizará mediante la regulación de una válvula en el circuito.

A nivel hidráulico, se optó por un sistema cerrado de recirculación para minimizar el consumo de agua, facilitando al mismo tiempo la observación continua de las variables de operación. La disposición de cañerías, válvulas e instrumentación también se vio condicionada por la necesidad de mantener una distribución ordenada, accesible para estudiantes, y compatible con los niveles disponibles entre el tanque y la bomba. La ubicación relativa de los componentes principales, cañerías e instrumentación puede observarse en el plano de conjunto incluido en el Apéndice C (plano BE-PDC-001).

Estas restricciones no solo condicionaron decisiones constructivas y operativas durante el diseño, sino que reflejan las dificultades reales que pueden presentarse en el ejercicio

profesional. En ese sentido, el banco busca ofrecer una solución concreta dentro de un contexto acotado, optimizando recursos y espacio disponible.

2.3 Diseño del circuito hidráulico

2.3.1 Descripción del circuito y planteo general:

El diseño del circuito hidráulico constituye uno de los aspectos fundamentales del presente trabajo, ya que de su correcta configuración depende tanto el funcionamiento eficiente de la bomba como la posibilidad de inducir cavitación de manera controlada. El sistema fue concebido como un circuito cerrado de recirculación, utilizando agua como fluido de trabajo, y orientado a permitir el análisis de dos modos de operación diferenciados: funcionamiento normal y funcionamiento con cavitación inducida.

Durante las etapas preliminares del proyecto se evaluaron distintas estrategias para provocar la disminución del ANPA disponible en la succión de la bomba. Entre las alternativas consideradas se analizaron el calentamiento del fluido, el estrangulamiento de válvulas en la línea de succión y la incorporación de trayectos con pérdidas adicionales mediante bifurcaciones del sistema.

El calentamiento del fluido fue descartado debido a que requería la incorporación de resistencias eléctricas o intercambiadores de calor, lo cual incrementaba significativamente la complejidad constructiva, los costos y los riesgos operativos del banco de ensayos.

En cuanto al estrangulamiento de válvulas en la línea de succión, si bien esta técnica permitía aumentar las pérdidas localizadas, el comportamiento no lineal de la pérdida de carga en función del grado de cierre dificultaba un control progresivo y estable del ANPA disponible, haciendo compleja la inducción de cavitación de manera reproducible y segura.

Asimismo, se analizó una configuración con bifurcación en la línea de succión (denominadas Camino A y Camino B), donde el segundo trayecto incorporaba múltiples codos en serie y una válvula de estrangulamiento con el objetivo de incrementar las pérdidas distribuidas y localizadas. Sin embargo, dado que la bomba se encuentra instalada en carga —con el nivel del fluido por encima del eje de aspiración— el ANPA disponible resultaba elevado aun considerando dichas pérdidas adicionales. En consecuencia, esta alternativa tampoco garantizaba la inducción controlada del fenómeno.

A partir de este análisis, se adoptó como solución definitiva la aplicación de vacío sobre la superficie libre del fluido en un tanque hermético. Esta estrategia permite reducir de manera directa la presión absoluta en la succión de la bomba, disminuyendo el ANPA disponible de forma controlada y repetible.

La configuración final contempla un único trayecto de succión entre el tanque y la bomba, diseñado con criterios de simplicidad, robustez y seguridad operativa. Los componentes principales del sistema son un tanque metálico hermético reacondicionado, una bomba de vacío externa y la bomba centrífuga BC100T seleccionada como equipo de ensayo, cuyo rango completo de operación será analizado en el presente trabajo.

En la línea de succión se incorpora una válvula tipo globo ubicada próxima a la brida de salida del tanque. Este elemento cumple una doble función: por un lado, actúa como válvula de aislamiento para facilitar tareas de mantenimiento sin necesidad de vaciar el tanque; por otro, permite modificar el coeficiente de pérdida localizada en la succión mediante el ajuste controlado de su grado de apertura. En el desarrollo teórico presentado en este trabajo, los cálculos base se realizan considerando la válvula completamente abierta, de modo que su coeficiente de pérdida adopta el valor mínimo correspondiente. No obstante, el modelo desarrollado en la planilla de cálculo (adjunto en el Apéndice A) permite variar dicho coeficiente con fines de análisis paramétrico, evaluando la influencia de las pérdidas en succión sobre la Altura Neta Positiva de Aspiración disponible, y en consecuencia sobre la condición de cavitación.

Asimismo, en la línea de descarga se dispone una válvula de compuerta, ubicada próxima a la brida de entrada del tanque, destinada a la regulación del caudal circulante. Dado que esta válvula se encuentra en la descarga de la bomba, su presencia no afecta a las condiciones de succión ni al valor del ANPA disponible, por lo que no se considera en el análisis hidráulico.

De esta manera, el banco de ensayos permite controlar el fenómeno de cavitación mediante la variación de tres parámetros operativos fundamentales:

- El nivel de vacío aplicado en el tanque, que modifica la presión absoluta en succión;
- El caudal circulante, regulado mediante la válvula de compuerta en descarga; y
- Las pérdidas localizadas en la línea de succión, ajustables a través del grado de apertura de la válvula de globo.

Esta configuración experimental brinda flexibilidad para analizar la interacción entre dichas variables y estudiar el inicio de cavitación bajo distintas condiciones de operación.

El diseño considera además la ubicación relativa de los elementos clave del sistema, incluyendo el tanque de almacenamiento (ubicado por encima del eje de la bomba), la línea de succión y descarga con sus accesorios e instrumentos de medición de variables hidráulicas, la bomba centrífuga y la bomba de vacío. Se prioriza una disposición funcional que facilite el armado, el desmontaje y la observación de variables durante los ensayos, así como una geometría compacta y modular adecuada al espacio disponible en el subsuelo del laboratorio.

En esta sección se presentan los cálculos necesarios para modelar el comportamiento hidráulico del circuito en todo el rango operativo informado por el fabricante. Se desarrollarán las expresiones para la determinación de velocidades, pérdidas de carga distribuidas y localizadas, ANPA disponible en función del caudal y del nivel de vacío aplicado, así como la estimación del ANPA requerido mediante el uso del coeficiente de cavitación de Thoma. Cabe señalar que, en condiciones ideales, la curva de ANPA requerido en función del caudal es suministrada por el fabricante del equipo y constituye el método más directo para verificar la condición de cavitación. Sin embargo, para la bomba seleccionada no se disponía de dicha información en la documentación técnica accesible. Se realizaron consultas y búsquedas bibliográficas con el objetivo de obtener la curva característica correspondiente, sin resultados satisfactorios.

Ante esta situación, y con el fin de garantizar la continuidad y coherencia del análisis hidráulico, se adoptó el método de estimación teórica basado en el coeficiente de cavitación de Thoma, respaldado por la literatura clásica de máquinas hidráulicas. Esta metodología, si bien posee carácter aproximado, permite obtener una estimación consistente del ANPA requerido en función del punto de operación y resulta adecuada para estudios preliminares y ensayos académicos.

Este enfoque permitirá establecer, para cada punto de operación, las condiciones de inicio de cavitación y analizar la interacción entre caudal y presión en el tanque como variables de control del fenómeno.

2.3.2 Introducción a los cálculos del circuito

El circuito hidráulico propuesto está compuesto por un tanque de almacenamiento, una bomba centrífuga, marca motorarg, modelo BC 100T [11], cañerías de succión y descarga, válvulas, accesorios, instrumentación y elementos de soporte estructural. El sistema fue concebido como un circuito cerrado de recirculación de agua, permitiendo su reutilización durante los ensayos y facilitando el control de variables operativas.

Desde el punto de vista del recorrido del fluido, el agua será impulsada desde el tanque hacia la bomba a través de una única línea de succión. Luego de atravesar la bomba, el fluido retorna nuevamente al tanque a través de la línea de descarga. La inducción del fenómeno se realizará mediante la modificación controlada de las condiciones operativas del sistema. Como mecanismo principal, se variará la presión absoluta en el tanque mediante la aplicación de vacío utilizando una bomba externa conectada al espacio aéreo del recipiente hermético. Asimismo, el caudal circulante podrá ajustarse mediante la válvula de compuerta ubicada en la línea de descarga, permitiendo recorrer distintos puntos de operación sobre la curva característica de la

bomba. De manera complementaria, la válvula tipo globo instalada en la línea de succión posibilita la modificación del coeficiente de pérdida localizada asociado a dicha sección, lo que permite analizar de forma paramétrica la influencia de las pérdidas en succión sobre la Altura Neta Positiva de Aspiración disponible. Esta combinación de variables operativas brinda flexibilidad experimental para estudiar la interacción entre presión en el tanque, caudal y pérdidas en succión, y determinar las condiciones límite en las que se inicia la cavitación.

Para el análisis del comportamiento hidráulico del sistema se calcularán una serie de variables fundamentales que definen su funcionamiento en todo el rango operativo de la bomba. Entre ellas se encuentran las velocidades de flujo, las pérdidas de carga distribuidas y localizadas, la Altura Neta Positiva de Aspiración disponible (ANPA disponible) y la Altura Neta Positiva de Aspiración requerida (ANPA requerida).

A diferencia de un diseño tradicional basado en un único caudal de referencia, en el presente trabajo el análisis se realizará considerando la totalidad del rango de caudales informado por el fabricante. Esto permitirá estudiar la evolución conjunta de ANPA disponible y ANPA requerida en función del punto de operación y determinar las condiciones de inicio de cavitación para distintos escenarios de vacío aplicado.

A continuación, se presentan los cálculos correspondientes, partiendo de las condiciones de diseño establecidas y utilizando bibliografía técnica especializada como soporte teórico.

2.3.3 Definición del rango operativo de análisis

El análisis hidráulico del banco de ensayos se desarrolla considerando la totalidad del rango operativo informado por el fabricante para la bomba centrífuga BC 100T. De acuerdo con la ficha técnica correspondiente [11], la bomba presenta una curva característica H–Q que relaciona el caudal bombeado con la altura manométrica entregada, dentro de un intervalo definido de operación.

En la Figura 15 se presenta la tabla extraída de la ficha técnica suministrada por el fabricante [11], donde se detallan los valores discretos de caudal y altura manométrica utilizados como base para el análisis.

TABLA DE PRESTACIONES 50 Hz - 2800 rpm

MODELO	HP	ALTURA MANOMÉTRICA (METROS)														Asp x Desc	
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32		36
BC 50 M r.4	0,5	5,4	5,1	4,5	4,1	3,3	2,1	0,9									1" x 1"
BC 75 M r.4	0,75	5,6	5,4	5,2	4,5	4,7	4,3	3,3	3,1	2,2	1,5		0,5	0,5			1" x 1"
BC 100 M r.4	1	5,6	5,5	5,3	5,1	4,95	4,5	4,5	4,25	3,95	3,5	2,9	2,1	1,2	0,5		1" x 1"
BC 100 T r.4	1	5,6	5,45	5,3	5,1	4,95	4,75	4,55	4,25	3,95	3,5	2,9	2,1	1,2	0,5		1" x 1"
BC 150 M r.4	1,5	5,7	5,6	5,5	5,35	5,2	5	4,8	4,6	4,45	4,0	3,60	3,1	2,4	1	0,3	1" x 1"
BC 150 T r.4	1,5	5,7	5,6	5,5	5,35	5,2	5	4,8	4,6	4,45	4,0	3,60	3,1	2,4	1	0,3	1" x 1"

Figura 15. Tabla de caudales operativos y altura manométrica entregada por la bomba BC100T.

Fuente: Del autor, a partir de [11].

Asimismo, en la Figura 16 se reproduce la curva característica provista por el fabricante, construida a partir de los valores descritos en la tabla anterior.

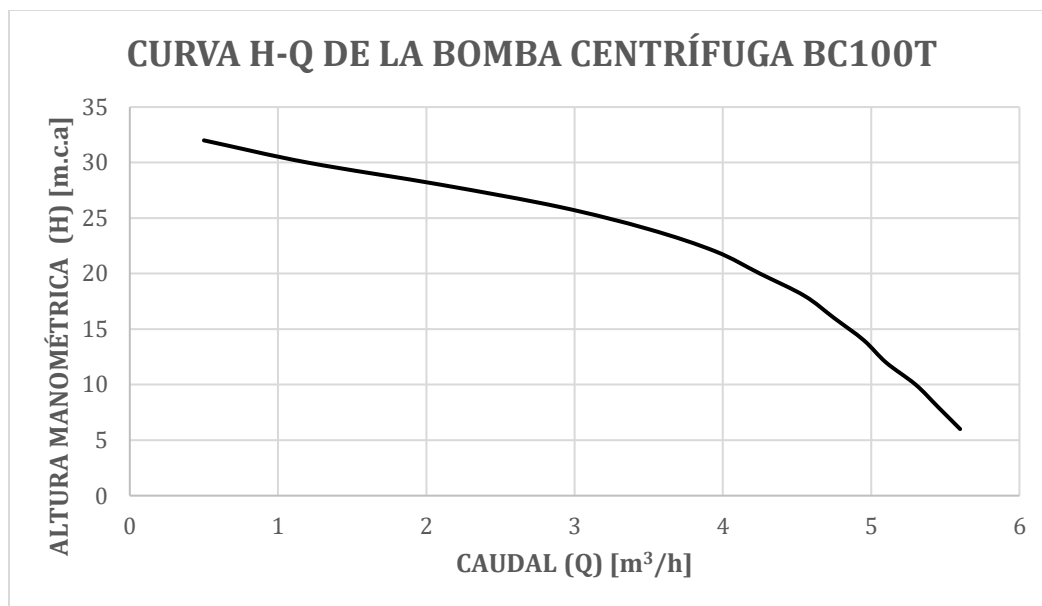


Figura 16. Curva H-Q de la Bomba Centrífuga BC 100 T.

Fuente: Del autor.

A partir de estos valores, el estudio se desarrolla evaluando cada punto de operación de manera independiente, sin restringir el análisis a un único caudal de referencia. Este enfoque

permite estudiar la evolución conjunta de la Altura Neta Positiva de Aspiración requerida (ANPA requerida) y la Altura Neta Positiva de Aspiración disponible (ANPA disponible) en función del caudal, y determinar las condiciones de inicio de cavitación bajo distintos escenarios de vacío aplicado.

2.3.4 Determinación teórica del ANPA requerido de la bomba centrífuga BC100T

Dado que la documentación técnica disponible para la bomba centrífuga BC 100T no incluye la curva de ANPA requerido en función del caudal, se procede a su estimación teórica mediante el empleo del coeficiente de cavitación de Thoma, conforme a lo desarrollado en el marco teórico.

El ANPA requerido puede determinarse a partir de la relación:

$$ANPA_{req} = \sigma_{crit} \cdot H$$

Donde H es la altura manométrica correspondiente al punto de operación considerado.

El coeficiente crítico de cavitación se estima mediante la correlación propuesta por Stepanoff y citada por Mataix [1]:

$$\sigma_{crit} = 2,14 \times 10^{-4} \cdot n_s^{4/3}$$

siendo el número específico de revoluciones:

$$n_s = 3.65 \cdot \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Debe señalarse que este procedimiento posee carácter aproximado. En este sentido, se advierte expresamente que:

“Otras fórmulas y curvas sugeridas por otros autores dan resultados un tanto diferentes, lo que indica que este tipo de ecuaciones solo puede servir para un tanteo preliminar” (Mataix 1986, p. 401) [1].

En consecuencia, la metodología adoptada permite obtener una estimación teórica preliminar del ANPA requerido en función del punto de operación, adecuada para el análisis hidráulico del banco de ensayos.

Desarrollo de cálculo para un punto representativo: A modo ilustrativo, se desarrolla a continuación, el cálculo correspondiente al punto de operación definido por:

$$Q = 5.6 \frac{m^3}{s} = 0.0155 \frac{m^3}{s}; \quad H = 6 \text{ m}; \quad n = 2800 \text{ rpm}$$

El número específico de revoluciones en este punto de operación viene dado por:

$$n_s = 3.65 \cdot \frac{2800 \sqrt{0.0155}}{6^{3/4}} = 105,14$$

Por lo que el coeficiente crítico de Thoma resulta:

$$\sigma_{crit} = 2,14 \times 10^{-4} \cdot 105,14^{4/3} = 0,106$$

Obteniendo entonces, en este punto de operación, un $ANPA_{Req}$ de:

$$ANPA_{Req} = \sigma_{crit} \cdot H = 0,106 \cdot 6 = 0,637 \text{ m}$$

El procedimiento anterior se repite para cada uno de los valores de caudal informados por el fabricante, obteniéndose los resultados resumidos en la tabla 1:

Tabla 1. ANPA requerido para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.

Q [m³/h]	n [rpm]	n_s	σ	ANPAreq [m]
5,6	2800	105,14	0,106	0,64
5,45	2800	83,60	0,078	0,63
5,3	2800	69,73	0,061	0,61
5,1	2800	59,66	0,050	0,60
4,95	2800	52,36	0,042	0,59
4,75	2800	46,40	0,036	0,57
4,55	2800	41,58	0,031	0,55
4,25	2800	37,13	0,027	0,53
3,95	2800	33,33	0,023	0,50
3,5	2800	29,39	0,019	0,47
2,9	2800	25,19	0,016	0,41
2,1	2800	20,28	0,012	0,33
1,2	2800	14,56	0,008	0,23
0,5	2800	8,95	0,004	0,13

Una vez obtenidos todos los valores, se traza la curva de $ANPA_{req}$ en función del caudal, tal y como se muestra en la Figura 17:

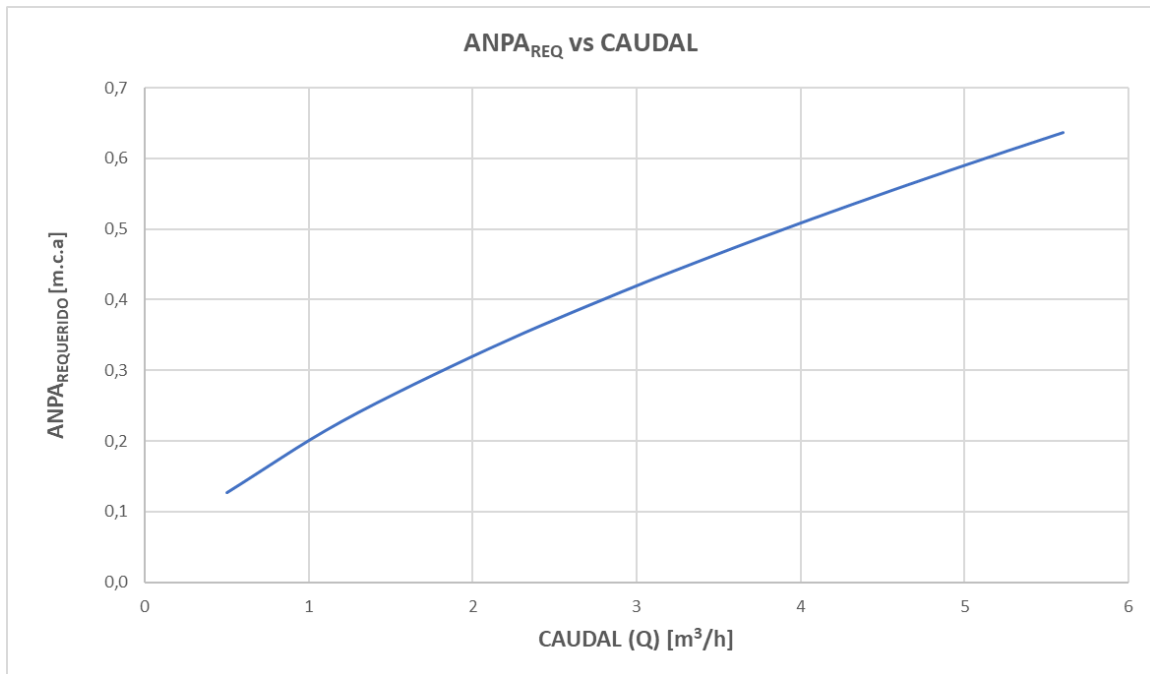


Figura 17. Curva de ANPA_{req} vs CAUDAL.

Fuente: Del autor.

Dicha curva, si bien ha sido obtenida mediante un procedimiento de estimación teórica, permite establecer una primera aproximación al comportamiento del ANPA requerido en todo el rango operativo de la bomba. Esta información será posteriormente comparada con la curva de ANPA disponible, a fin de analizar las condiciones de inicio de cavitación bajo distintos niveles de vacío aplicado.

Debe señalarse que el valor definitivo de ANPA requerido deberá determinarse experimentalmente durante los ensayos del banco, adoptando el criterio de caída del 3 % de la altura manométrica como condición de inicio de cavitación.

2.3.5 Determinación del ANPA disponible de la instalación

La Altura Neta Positiva de Aspiración disponible, o ANPA disponible, representa la energía total que tiene el fluido en la línea de succión. Este parámetro resulta determinante para evaluar la posibilidad de cavitación, ya que indica la diferencia entre la presión absoluta existente en la superficie libre del fluido y su presión de vapor, considerando además la altura geométrica y las pérdidas de carga en la línea de succión.

De acuerdo con la formulación general desarrollada en el marco teórico, el ANPA disponible se expresa como:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_t - P_s}{\gamma} - H_s - h_r$$

Donde:

P_t = Presión absoluta en el tanque [Pa] (Igual a P_{atm} si no se aplica vacío en el tanque)

P_s = Presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo [Pa]

γ = Peso específico del líquido [N/m^3]

H_s = Altura geométrica de succión [m]

h_r = Pérdidas totales en la línea de succión (distribuidas + localizadas) [m]

En el presente trabajo, el valor de $ANPA_{disp}$ dependerá de tres variables de control:

- El caudal circulante (Q), que modifica las velocidades y pérdidas de carga.
- El coeficiente de pérdida asociado a la válvula de globo en la succión.
- El nivel de vacío aplicado sobre la superficie libre del tanque.

2.3.5.1 Determinación de velocidades y pérdidas de carga en la línea de succión:

Cálculo de velocidades: Para cada valor de caudal informado por el fabricante, se determina la velocidad media del fluido en la tubería mediante la ecuación de continuidad:

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

Donde:

v = velocidad del fluido [m/s]

Q = caudal volumétrico [m^3/s]

A = área de la sección transversal de la cañería [m^2]

Esta expresión se encuentra ampliamente documentada en bibliografía técnica. En particular, puede consultarse en Mataix (1976), Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Cap. 5: Definición de caudal y ecuación de continuidad [1], donde se presenta la formulación práctica para flujos en tuberías.

A modo ilustrativo, se calcula la velocidad del fluido para un caudal de 5,6 m^3/h .

Teniendo en cuenta que:

$$Q = 5,6 \frac{m^3}{h} = 0,00155 \frac{m^3}{s} ; \quad A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,025^2}{4} = 0,00049 m^2$$

Se obtiene una velocidad de:

$$v = \frac{0,00155}{0,00049} = 3,169 \frac{m}{s}$$

Cálculo del número de Reynolds (Re) y el Coeficiente de fricción (λ): Con la velocidad determinada, se procede a calcular el número de Reynolds mediante la fórmula:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu}$$

Donde los valores de densidad del agua y de la viscosidad dinámica se obtienen de la Tabla A-3 (que se observa en la Figura 18) y de la tabla 2-3 (expuesta en la Figura 19) respectivamente.

924
TABLAS Y GRÁFICAS

TABLA A-3
Propiedades del agua saturada

Temp. <i>T</i> , °C	Presión de Saturación <i>F_{sat}</i> , kPa	Densidad <i>ρ</i> , kg/m ³		Entalpía de Vaporización <i>h_{fg}</i> , kJ/kg	Calor específico <i>c_p</i> , J/kg · K		Conductividad técnica <i>k</i> , W/m · K		Viscosidad dinámica <i>μ</i> , kg/m · s		Número de Prandtl <i>Pr</i>		Coeficiente de expansión volumétrica <i>β</i> , 1/K	Tensión superficial, N/m
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor		
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³	0.0756
5	0.8721	999.9	0.0058	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³	0.0749
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³	0.0742
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³	0.0735
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³	0.0727
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³	0.0720
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³	0.0712
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³	0.0704
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³	0.0696
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³	0.0688
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³	0.0679
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³	0.0671
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³	0.0662
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³	0.0654
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³	0.0645
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³	0.0636
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³	0.0627
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³	0.0617
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³	0.0608
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³	0.0599
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³	0.0589
110	143.27	950.6	0.8253	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³	0.0570
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³	0.0550
130	270.1	934.6	1.495	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³	0.0529
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³	0.0509
150	475.8	916.6	2.545	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³	0.0487
160	617.8	907.4	3.255	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³	0.0466
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³	0.0444
180	1,002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³	0.0422
190	1,254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³	0.0399
200	1,553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³	0.0377
220	2,318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³	0.0331
240	3,344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0481	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³	0.0284
260	4,588	783.7	23.69	1563	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³	0.0237
280	6,412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³	0.0190
300	8,581	713.8	46.15	1405	5750	5580	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³	0.0144
320	11,274	657.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97		0.0099
340	14,586	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43		0.0056
360	18,551	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73		0.0019
374.14	22,090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵				0

Nota 1: La viscosidad cinemática ν y la difusividad térmica α se pueden calcular a partir de sus definiciones, $\nu = \mu/\rho$ y $\alpha = k/\rho c_p = \nu/Pr$. Las temperaturas 0.01 °C, 100 °C y 374.14 °C son las temperaturas del punto triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades ρ dadas anteriormente (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cerca del valor de punto crítico.

Nota 2: La unidad kJ/kg · °C para calor específico es equivalente a kJ/kg · K, y la unidad W/m · °C para conductividad térmica es equivalente a W/m · K.

Fuente: Los datos de viscosidad y conductividad térmica están tomados de J.V. Sengers y J.T.R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291-1322. Otros datos se obtuvieron de diversas fuentes o se calcularon.

Figura 18. Tabla A-3 de propiedades del agua saturada.

Fuente: Del autor, a partir de [4]

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	
TABLA 2-3	
Viscosidades dinámicas de algunos fluidos a 1 atm y 20°C (a menos que se indique otra cosa)	
Fluido	Viscosidad dinámica μ , kg/m · s
Glicerina:	
–20°C	134.0
0°C	10.5
20°C	1.52
40°C	0.31
Aceite para motor:	
SAE 10W	0.10
SAE 10W30	0.17
SAE 30	0.29
SAE 50	0.86
Mercurio	0.0015
Alcohol etílico	0.0012
Agua:	
0°C	0.0018
20°C	0.0010
100°C (líquido)	0.00028
100°C (vapor)	0.00012
Sangre, 37°C	0.00040
Gasolina	0.00029
Amoniaco	0.00015
Aire	0.000018
Hidrógeno, 0°C	0.0000088

Figura 19. Tabla 2-3 de propiedades de fluidos.

Fuente: Del autor, a partir de [4].

Obteniendo entonces:

$$Re = \frac{998 \cdot 3,169 \cdot 0,025}{0,001} = 79065,35$$

Ahora bien, para la determinación del coeficiente de fricción es necesario conocer primero la rugosidad absoluta del material de la tubería. En la Figura 20 se presentan los valores de rugosidad absoluta (k) para distintos materiales de conducción, extraídos del catálogo técnico del fabricante [14].

Material	Ks (mm)
Vidrio	0,0003
PVC, CPVC, PEAD	0,0015
Acero	0,046
Hierro Forjado	0,06
Hierro Dúctil	0,25
Concreto	0,3-3,0

Figura 20. Rugosidad absoluta (k) para distintos materiales de tuberías.

Fuente: Del autor, a partir de [14].

Con este valor y el número de Reynolds, valiéndonos de la ecuación de Swamee – Jain, calculamos el coeficiente de fricción:

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Reemplazando valores:

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{0,0000015}{3,7 \cdot 0,025} + \frac{5,74}{79065,35^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Con lo que se obtiene:

$$\lambda = 0,0191$$

Para el cálculo del coeficiente de fricción en régimen turbulento puede emplearse esta ecuación explícita de Swamee y Jain (1976), ya que es válida para números de Reynolds superiores a 5000 y aplicable a la región turbulenta del diagrama de Moody, tanto en tuberías lisas como rugosas.

Cálculo de pérdidas primarias: Una vez obtenido el coeficiente de fricción, y conociendo la velocidad y la geometría de la instalación, se procede a calcular las pérdidas primarias o distribuidas, conforme lo exponen Darcy – Weisbach en su fórmula:

$$h_{rp} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

λ = Coeficiente de fricción (adimensional)

L = Longitud recta de la cañería de succión [m]

D = Diámetro interno del caño [m]

v = Velocidad del fluido calculada previamente [m/s]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

Reemplazando valores se obtiene:

$$h_{rp} = 0,0191 \cdot \frac{1,5}{0,025} \cdot \frac{3,169^2}{2 \cdot 9,81} = 0,586 [m]$$

El procedimiento anterior se repite para cada uno de los valores de caudal informados por el fabricante, obteniéndose los resultados resumidos en la tabla 2:

Tabla 2. Pérdidas primarias para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.

Q [m³/h]	Q [m³/s]	v [m/s]	Re	λ	h_{rp}
5,6	0,00156	3,169	79065,35	0,0191	0,586
5,45	0,00151	3,084	76947,52	0,0192	0,558
5,3	0,00147	2,999	74829,70	0,0193	0,531
5,1	0,00142	2,886	72005,94	0,0195	0,496
4,95	0,00138	2,801	69888,12	0,0196	0,470
4,75	0,00132	2,688	67064,36	0,0197	0,436
4,55	0,00126	2,575	64240,59	0,0199	0,404
4,25	0,00118	2,405	60004,95	0,0202	0,357
3,95	0,00110	2,235	55769,31	0,0205	0,314
3,5	0,00097	1,981	49415,84	0,0211	0,253
2,9	0,00081	1,641	40944,55	0,0219	0,181
2,1	0,00058	1,188	29649,50	0,0236	0,102
1,2	0,00033	0,679	16942,57	0,0271	0,038
0,5	0,00014	0,283	7059,41	0,0343	0,008

Cálculo de pérdidas secundarias: Obtenidas las pérdidas primarias, se procede a calcular las pérdidas secundarias (también llamadas *localizadas*), que se originan en los accesorios, uniones y cambios de geometría del conducto, tales como válvulas, codos, entradas o salidas, reducciones, etc.

De acuerdo con lo expuesto en el marco teórico, las pérdidas secundarias pueden determinarse tanto mediante el método de longitudes equivalentes como mediante el uso de coeficientes de pérdida localizada. En el presente trabajo se adopta este último enfoque, debido a la disponibilidad de coeficientes tabulados específicos para los accesorios utilizados, provenientes de bibliografía técnica reconocida.

Por lo tanto, las pérdidas secundarias se calculan mediante la expresión general:

$$h_{rs} = \sum \zeta \frac{v^2}{2g}$$

donde:

ζ = Coeficiente de pérdida secundaria adimensional, característico de cada accesorio.

v = velocidad media del flujo en la sección considerada [m/s].

g = aceleración de la gravedad [m/s^2].

Los valores de ζ se determinan a partir de datos experimentales, recopilados en tablas y manuales técnicos.

En este trabajo, para la entrada al caño desde el tanque, se adoptaron los coeficientes propuestos por Robert L Mott [3] mostrados en la Figura 21, y, para la válvula de globo, el valor de referencia de Cengel y Cimbala mostrado en la Figura 22 [4], dado que esta fuente proporciona correlaciones específicas para distintos grados de apertura.

FIGURA 10.14 Coeficientes de resistencia de entrada.

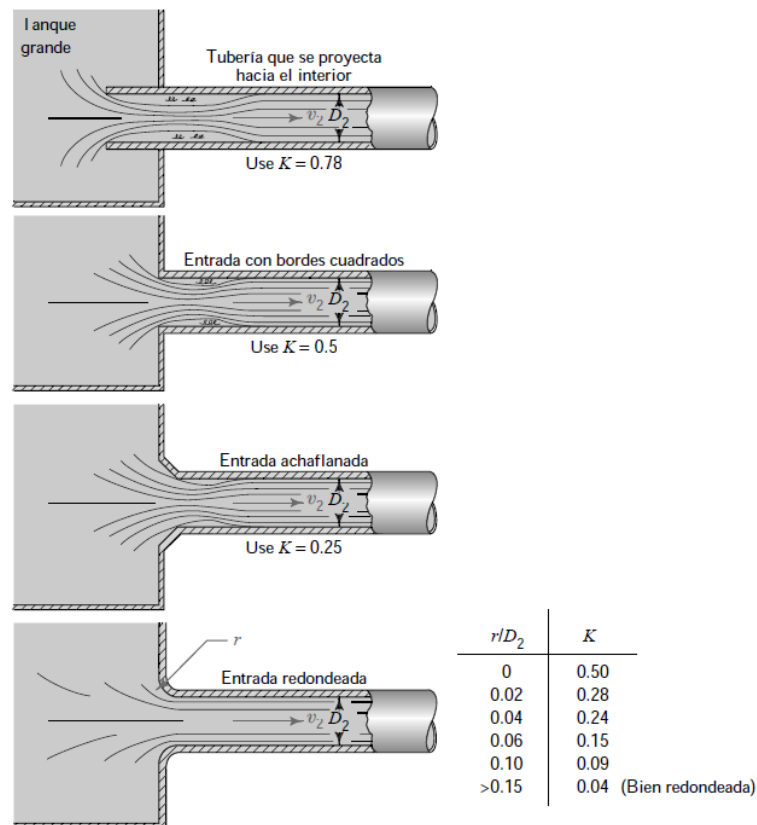


Figura 21. Coef de pérdida según Robert L Mott [3].

TABLA 8-4 (CONCLUSIÓN)

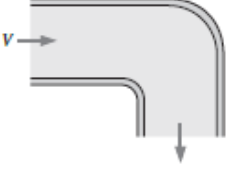
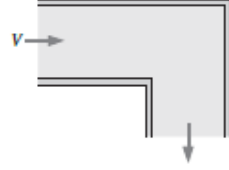
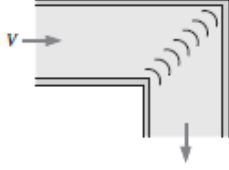
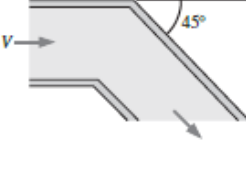
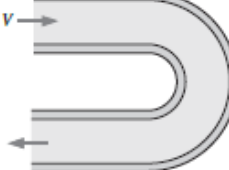
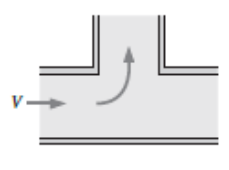
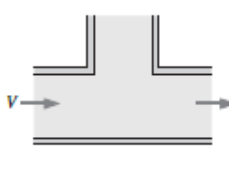
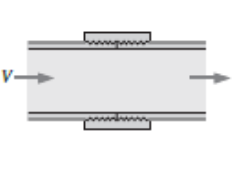
Codos y ramificaciones Codo suave de 90°: Embridado: $K_L = 0.3$ Enroscado: $K_L = 0.9$ 	Codo esquinado de 90° (sin álabes directores): $K_L = 1.1$ 	Codo esquinado de 90° (con álabes directores): $K_L = 0.2$ 	Codo enroscado de 45°: $K_L = 0.4$ 
Codo de retorno de 180°: Embridado: $K_L = 0.2$ Enroscado: $K_L = 1.5$ 	Conexión en T (flujo deriv.): Embridado: $K_L = 1.0$ Enroscado: $K_L = 2.0$ 	Conexión en T (flujo en línea): Embridado: $K_L = 0.2$ Enroscado: $K_L = 0.9$ 	Unión enroscada: $K_L = 0.08$ 
Válvulas Válvula de globo, totalmente abierta: $K_L = 10$ Válvula de ángulo, totalmente abierta: $K_L = 5$ Válvula de bola, totalmente abierta: $K_L = 0.05$ Válvula de charnela: $K_L = 2$			
Válvula de compuerta, totalmente abierta: $K_L = 0.2$ 1/4 cerrada: $K_L = 0.3$ 1/2 cerrada: $K_L = 2.1$ 3/4 cerrada: $K_L = 17$			

Figura 22. Coeficiente de pérdida según Cengel & Cimbala [4].

Por lo tanto, podemos resumir que los elementos presentes en la línea de succión son los siguientes:

Tabla 3. Coeficientes de pérdidas localizadas (ζ).

Elemento	Cantidad	Coef ζ	Fuente	ζ total
Entrada al caño desde el tanque	1	0,5	Robert L Mott	0,5
Llave de paso tipo globo	1	10	Cengel y Cimbala	10
Total				10,5

Es importante destacar que el coeficiente de pérdida adoptado para la válvula tipo globo corresponde a la condición de válvula completamente abierta, es decir, al valor mínimo tabulado para este tipo de accesorio.

Esta hipótesis representa la condición más exigente para la inducción del fenómeno de cavitación, ya que al minimizarse las pérdidas localizadas en la línea de succión se obtiene el

mayor valor posible de ANPA disponible. En consecuencia, si la cavitación puede inducirse bajo esta configuración, también podrá lograrse para cualquier grado de cierre adicional de la válvula, dado que el incremento del coeficiente ζ produciría un aumento de las pérdidas y, por lo tanto, una disminución adicional del ANPA disponible.

Cabe señalar que la válvula de globo cumple una doble función dentro del diseño del banco de ensayos. Por un lado, actúa como elemento de aislamiento, permitiendo realizar tareas de mantenimiento en la bomba sin necesidad de vaciar el tanque. Por otro, posibilita la variación controlada del coeficiente de pérdida localizada, constituyendo una variable adicional de ajuste para modificar el ANPA disponible y analizar la sensibilidad del sistema frente a cambios en las pérdidas de succión.

En el desarrollo base de los cálculos se considera la válvula totalmente abierta; no obstante, el modelo implementado en la planilla de cálculo permite modificar el valor de ζ con fines de análisis paramétrico.

A modo ilustrativo, se calculan las pérdidas para un caudal de 5,6 m³/h. Para esto se reemplazan los valores en la fórmula anterior, obteniendo:

$$h_{rs} = \sum \zeta \frac{v^2}{2g} = 10,5 \cdot \frac{(3,169)^2}{2 \cdot 9,81} = 5,376 [m]$$

El procedimiento anterior se repite para cada uno de los valores de caudal informados por el fabricante, obteniéndose los resultados resumidos en la tabla 4:

Tabla 4. Pérdidas secundarias para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T

Q [m ³ /h]	h _{rs}
5,6	5,376
5,45	5,092
5,3	4,816
5,1	4,459
4,95	4,201
4,75	3,868
4,55	3,549
4,25	3,097
3,95	2,675
3,5	2,100
2,9	1,442
2,1	0,756
1,2	0,247
0,5	0,043

Cálculo de pérdidas totales: Una vez calculadas las pérdidas primarias y secundarias, se procede a calcular las pérdidas totales, que es la suma de las dos primeras.

$$h_r = h_{rp} + h_{rs}$$

Es decir, para nuestro caso ilustrativo, las pérdidas totales son:

$$h_r = h_{rp} + h_{rs} = 0,586 [m] + 5,376[m] = 5,963 [m]$$

El procedimiento anterior se repite para cada uno de los valores de caudal informados por el fabricante, obteniéndose los resultados resumidos en la tabla 5:

Tabla 5. Pérdidas totales para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T

Q [m³/h]	h _r
5,6	5,963
5,45	5,650
5,3	5,347
5,1	4,955
4,95	4,670
4,75	4,304
4,55	3,953
4,25	3,454
3,95	2,988
3,5	2,353
2,9	1,623
2,1	0,858
1,2	0,285
0,5	0,051

2.3.5.2 Modelado paramétrico de la válvula de globo como variable de ajuste de h_{rs}:

En la bibliografía técnica consultada se dispone de valores tabulados del coeficiente de pérdida localizada ζ correspondientes a válvulas de globo completamente abiertas. Sin embargo, no se encuentran tablas ni gráficos que permitan determinar de manera directa los valores teóricos de ζ para grados de apertura intermedios entre 0 % y 100 %.

Dado que la válvula instalada en la línea de succión puede operar con distintos grados de apertura y que resulta de interés analizar la influencia del estrangulamiento sobre las pérdidas en

succión y el ANPA disponible, se adopta una estrategia de modelado basada en datos reales de fabricante.

Como referencia experimental se considera una válvula de globo DN25 como la que se muestra en la Figura 23.



Figura 23. Válvula de globo con fuelle - Genebre [15].

En el catálogo técnico [15] proporcionado por el fabricante, se informa un coeficiente de caudal para la válvula completamente abierta de:

$$k_{v\ 100} = 11,5 \frac{m^3}{h}$$

Tal y como se observa en la Figura 24



Edificio Genebre. Av. de Joan Carles I, 46-48
08908 L'Hospitalet de Llobregat. Barcelona (Spain)
genebre@genebre.es - www.genebre.es

VALORES DE K_v / K_v VALUES

K_v = Es la cantidad de metros cúbicos por hora (m^3/h) que pasará a través de la válvula generando una pérdida de carga de 1 bar.

K_v = Flow rate of water in cubic meter per hour (m^3/h) generating a pressure drop of 1 bar across the valve

DN 15	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40	DN 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150	DN 200
4.2	6.9	11.5	18	28	45	78	121	185	280	400	730

DIAGRAMA DE PÉRDIDAS DE CARGA / HEADLOSS CHART

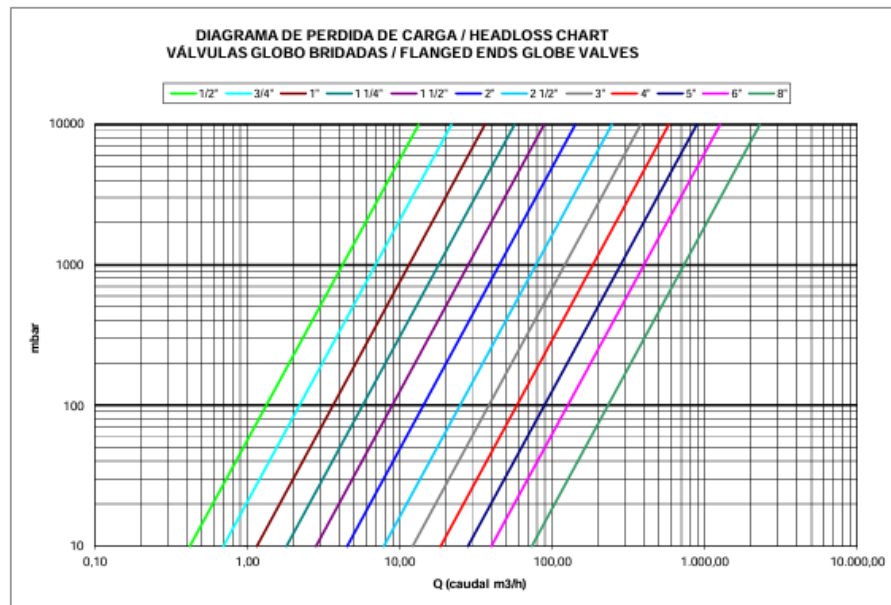


Figura 24. Valores K_v y diagrama de pérdidas de una válvula de globo – Genebre [15].

A partir de este valor, y utilizando la relación entre el coeficiente de caudal y el coeficiente de pérdida localizada desarrollada previamente en el marco teórico, se obtiene que dicha válvula real equivale aproximadamente a:

$$\zeta_{100} = 4,7$$

Este resultado evidencia que la válvula real de referencia presenta pérdidas menores que las adoptadas en el cálculo base del presente trabajo, donde se considera, según Cengel & Cimbala [4], un coeficiente $\zeta_{100} = 10$ para una válvula de globo completamente abierta.

Por lo tanto, se construye un modelo paramétrico de la válvula teórica utilizada en los cálculos que reproduzca el mismo comportamiento no lineal de estrangulamiento, tomando como referencia una válvula de globo real.

Para ello, se determina el coeficiente de caudal equivalente $K_{v\ 100}$ que reproduce una pérdida localizada $\zeta_{100} = 10$ para el diámetro interno adoptado en la línea de succión ($D = 0,025$ m) y para agua a $20\ ^\circ\text{C}$ ($\rho = 998\ \text{kg/m}^3$) [4], partiendo de la siguiente expresión de pérdidas localizadas:

$$h = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

y recordando que:

$$h = \frac{10^5}{\rho g} \left(\frac{Q}{k_v} \right)^2 \cdot GE$$

Entonces, si igualamos ambas ecuaciones teniendo en cuenta que: $v = Q/3600A$ (Para poder utilizar Q en m^3/h ya que esa es la unidad del coeficiente de caudal k_v), y que: $GE = 1$ ya que el fluido es agua a 20°C , obtenemos:

$$\frac{10^5}{\rho g} \frac{Q^2}{K_v^2} = \zeta \frac{Q^2}{3600^2 A^2 2g}$$

Simplificando Q^2 y g , obtenemos:

$$\frac{10^5}{K_v^2 \rho} = \frac{\zeta}{3600^2 A^2 2}$$

Despejando k_v^2 , se obtiene:

$$K_v^2 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 3600^2 A^2}{\zeta \rho}$$

Finalmente:

$$K_v = 3600 \cdot A \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5}{\zeta \rho}}$$

Reemplazando valores (con $\zeta_{100} = 10$), se obtiene:

$$k_{v\,100} \approx 7,91 \frac{m^3}{h}$$

Este valor no corresponde a un dato de catálogo, sino a un coeficiente de caudal equivalente que permite que el modelo basado en K_v reproduzca exactamente la pérdida de carga correspondiente a $\zeta_{100} = 10$ utilizada en el cálculo base.

Una vez determinado el valor equivalente K_{v100} , se modela la variación del coeficiente de caudal con el grado de apertura mediante la expresión:

$$k_v(\alpha) = k_{v\,100} \left(\frac{\alpha}{100} \right)^n$$

Se adopta $n = 2$ para representar el comportamiento no lineal característico de las válvulas de globo en régimen de estrangulamiento.

A partir de $K_v(\alpha)$ se determinan los valores de $\zeta(\alpha)$ correspondientes a aperturas discretas entre 30% y 100%, con incrementos del 5%, obteniendo los valores resumidos en la tabla 6.

Tabla 6. Coeficiente de pérdidas en función del grado de apertura

$\alpha =$ %Apertura	n=2
	$\zeta(\alpha)$ valv de globo
100	10
95	12,3
90	15,2
85	19,2
80	24,4
75	31,6
70	41,7
65	56
60	77,2
55	109,3
50	160,1
45	243,9
40	390,8
35	666,6
30	1235

Graficando estos valores, se obtiene la curva de la variación del coeficiente de pérdidas de una válvula de globo en función del grado de apertura de la misma, evidenciándose su no linealidad, tal y como se muestra en la Figura 25.

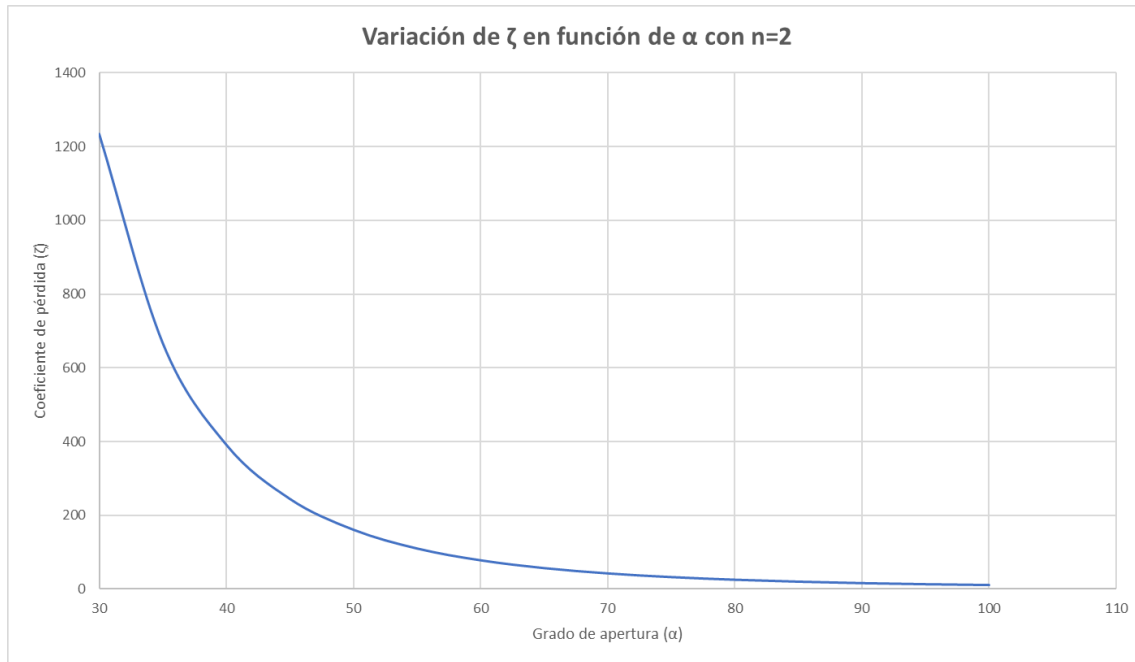


Figura 25. Curva de variación de $\zeta(\alpha)$ de una válvula de globo.

Fuente: Del autor.

Este procedimiento permite construir un modelo continuo y coherente con el diseño hidráulico base, posibilitando el análisis paramétrico de la influencia del estrangulamiento sobre las pérdidas totales y, en consecuencia, sobre el ANPA disponible.

Cabe destacar que el cálculo del ANPA disponible desarrollado en las secciones siguientes se efectúa manteniendo la condición base de válvula completamente abierta, adoptando el coeficiente de pérdida localizada $\zeta = 10$. El modelado paramétrico presentado tiene carácter complementario y se incorpora con fines de análisis de sensibilidad, sin alterar la configuración hidráulica de referencia empleada para la determinación del ANPA disponible.

2.3.5.3 Cálculo del ANPA disponible:

Una vez determinadas las pérdidas totales en la línea de succión para cada punto de operación, calculadas considerando la válvula de globo completamente abierta ($\zeta = 10$) como condición base de diseño, se calcula la Altura Neta Positiva de Aspiración disponible aplicando la expresión:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_t - P_s}{\gamma} - H_s - h_r$$

donde:

P_t = Presión en el tanque (o P_{atm} si el tanque es abierto)

P_s = Presión de saturación (o presión de vapor) del fluido de trabajo

H_s = Altura geométrica de aspiración

h_r = Pérdidas de carga en la línea de succión

γ = Peso específico del fluido de trabajo.

Este cálculo permite comparar el valor de ANPA disponible con el ANPA requerido por la bomba (provisto por el fabricante), y así determinar si el sistema opera con un margen de seguridad adecuado o si existe riesgo de cavitación.

En el caso particular del banco de ensayos, este cálculo se realizará para distintas condiciones de operación, incluyendo situaciones donde se reduce la presión en el tanque mediante una bomba de vacío, con el fin de provocar cavitación en forma controlada. Para ello, se ajustará el valor de P_t en la fórmula, manteniendo constante el resto de los parámetros.

Caso 1: ANPA_{disp} SIN VACÍO aplicado: Cuando el tanque está herméticamente cerrado, pero sin aplicar vacío, puede considerarse

$$P_t \approx P_{atm} = 95.378 \text{ [Pa]}$$

Por lo tanto, y valiéndonos de la tabla A-3 de la Figura 18 [4], podemos definir los siguientes valores:

$$P_t = 95378 \text{ [Pa]} \text{ (Presión atmosférica normal)}$$

$$P_s = 2340 \text{ [Pa]} \text{ (Presión de saturación del agua a } 20^\circ\text{C)}$$

$$\rho = 998 \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ (Densidad del agua a } 20^\circ\text{C)}$$

$$\gamma = \rho \cdot g = 998 \cdot 9,81 = 9,79 \times 10^3 \text{ [N/m}^3\text{]} \text{ (Peso específico del agua a } 20^\circ\text{C)}$$

$$H_s = -1,5 \text{ [m.c.a]} \text{ (Negativo, ya que la bomba esta en carga)}$$

Con estos datos, y a modo ilustrativo, se procede a calcular el ANPA_{disp} para un caudal $Q = 5,6 \text{ m}^3 / \text{h}$, al que le corresponde unas pérdidas totales de $h_r = 5,963 \text{ m}$.

Por lo tanto, reemplazando los valores en la fórmula de ANPA disponible, se obtiene:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_t - P_s}{\gamma} - H_s - h_r = \frac{95378 - 2.340}{9,79 \times 10^3} + 1,5 - 5,963 = 5,044 \text{ m}$$

El procedimiento anterior se repite para cada uno de los valores de caudal informados por el fabricante, obteniéndose los resultados resumidos en la tabla 7:

Tabla 7. ANPA disponible SIN VACÍO aplicado para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T

Q [m³/h]	ANPA _{DISP}
5,6	5,044
5,45	5,356
5,3	5,660
5,1	6,052
4,95	6,336
4,75	6,702
4,55	7,053
4,25	7,552
3,95	8,018
3,5	8,654
2,9	9,384
2,1	10,148
1,2	10,721
0,5	10,955

Graficando estos valores, obtenemos la curva de ANPA disponible en función del caudal para todo el rango operativo de la bomba BC100T, como se muestra en la Figura 26.

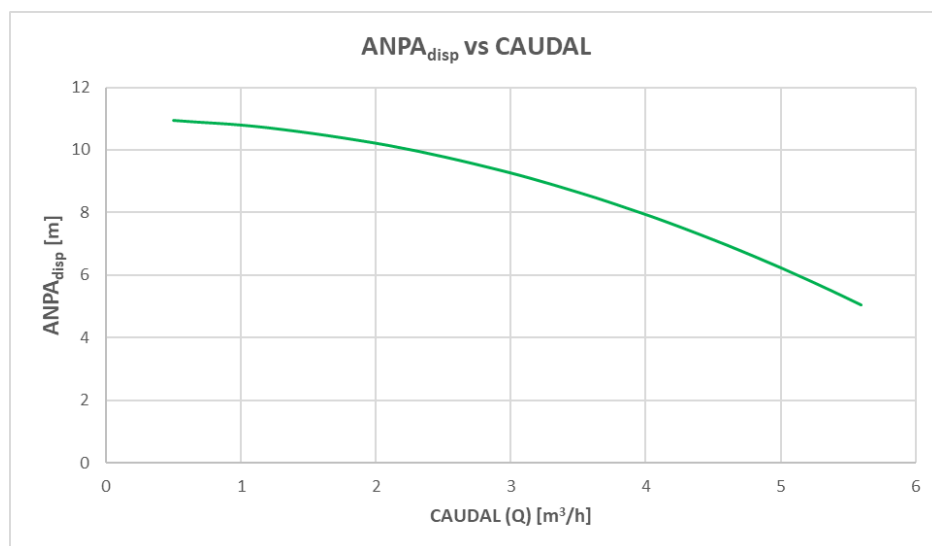


Figura 26. Curva de ANPA disponible SIN VACÍO aplicado.

Fuente: Del autor.

Caso 2: ANPA_{disp}. CON VACÍO aplicado: Cuando se aplica el vacío mediante la bomba de vacío, la presión absoluta en el tanque disminuye ($P_t < P_{atm}$), reduciendo el primer término de

la ecuación y, en consecuencia, el valor del ANPA disponible, permitiendo controlar este valor y provocar cavitación en condiciones seguras y reproducibles.

Para los cálculos, se adopta un nivel de vacío aplicado del 75%, valor que resulta alcanzable con una bomba de características similares a la utilizada en el presente trabajo. Asimismo, este nivel de vacío permite evidenciar claramente los efectos producidos sobre el ANPA disponible del sistema, facilitando la comparación entre las condiciones del sistema antes y después de su aplicación. Por lo tanto, la presión dentro del tanque ahora viene dada por:

$$\rightarrow P_t = P_{atm} \cdot (1 - \%Vacío\ aplicado) = 95378 [Pa] \cdot (1 - 0,75)$$

$$\therefore P_t = 23844,64 [Pa]$$

Los otros valores se mantienen iguales, es decir:

$$P_s = 2.340 [Pa] \text{ (Presión de saturación del agua a } 20^\circ C \text{)}$$

$$\rho = 998 [kg/m^3] \text{ (Densidad del agua a } 20^\circ C \text{)}$$

$$\gamma = 9,79 \times 10^3 [N/m^3] \text{ (Peso específico del agua a } 20^\circ C \text{)}$$

$$H_s = -1,5 [m] \text{ (Negativo, ya que la bomba esta en carga)}$$

$$h_r = 5,963 [m] \text{ (Pérdidas totales calculadas)}$$

Sustituyendo en la ecuación del ANPA_{disp}, se obtiene:

$$ANPA_{DISP} = \frac{23844,64 - 2340}{9,79 \times 10^3} - (-1,5) - 5,963$$

$$ANPA_{DISP} = -2,265 [m]$$

Se observa que, para un nivel de vacío aplicado del 75%, el valor obtenido de ANPA_{disp} resulta negativo (-2,265 m). Este resultado no implica la existencia de “energía negativa” en el sistema, sino que indica que la presión absoluta disponible en la succión de la bomba, una vez descontadas la altura geométrica y las pérdidas de carga, es inferior a la presión de vapor del líquido.

En tales condiciones, el fluido no puede mantenerse en estado líquido continuo en la entrada del rodete, produciéndose cavitación de manera inmediata e intensa. Por lo tanto, un ANPA_{disp} negativo representa una situación físicamente coherente dentro del modelo adoptado, correspondiente a un régimen ampliamente cavitante.

El procedimiento anterior se repite para cada uno de los valores de caudal informados por el fabricante, obteniéndose los resultados resumidos en la tabla 8:

Tabla 8. ANPA disponible CON VACÍO aplicado del 75% para todo el rango de caudales de la bomba BC 100 T.

Q [m ³ /h]	ANPA _{disp} [m]
5,6	-2,265
5,45	-1,953
5,3	-1,649
5,1	-1,257
4,95	-0,973
4,75	-0,607
4,55	-0,256
4,25	0,243
3,95	0,709
3,5	1,345
2,9	2,075
2,1	2,839
1,2	3,412
0,5	3,646

Graficando estos valores, obtenemos la curva de ANPA disponible con vacío aplicado en función del caudal para todo el rango operativo de la bomba BC100T, como se muestra en la Figura 27.

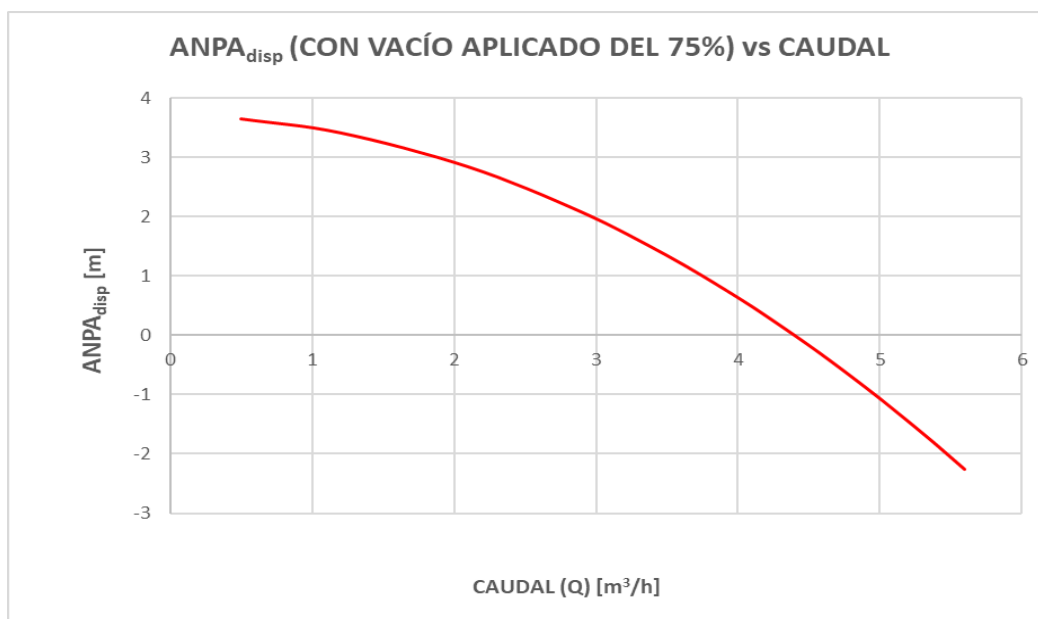


Figura 27. Curva de ANPA disponible CON VACÍO aplicado del 75%.

Fuente: Del autor.

2.3.6 Comparación entre ANPA requerido y ANPA disponible

Con el objeto de determinar las condiciones de inicio de cavitación, se procede a comparar las curvas de ANPA requerido y ANPA disponible obtenidas en las secciones anteriores.

En la Figura 28 se presentan superpuestas:

- La curva de ANPA requerido estimada mediante el coeficiente de Thoma.
- La curva de ANPA disponible sin aplicación de vacío.
- La curva de ANPA disponible correspondiente a un vacío aplicado del 75%.

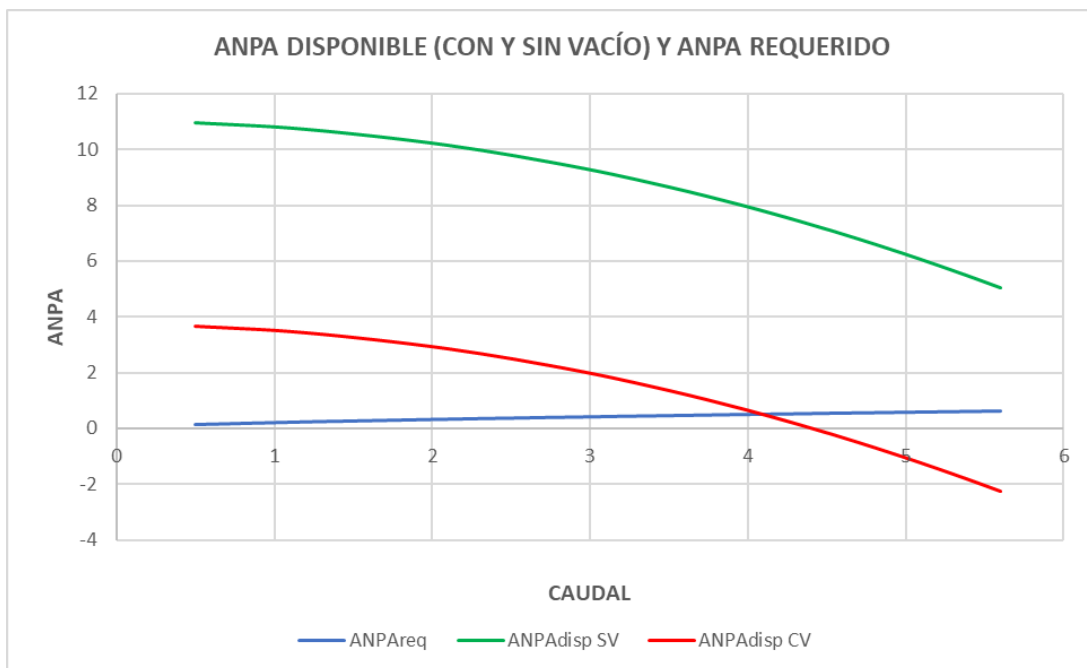


Figura 28. Comparación entre ANPA requerido y ANPA disponible con y sin vacío aplicado.

Fuente: Del autor.

De la comparación gráfica se observa que:

- En ausencia de vacío, la curva de ANPA disponible se mantiene en todo momento por encima de la curva de ANPA requerido, garantizando la operación libre de cavitación en todo el rango de caudales.
- Al aplicar un vacío del 75%, la curva de ANPA disponible se desplaza hacia valores considerablemente menores, intersectando a la curva de ANPA requerido aproximadamente en un caudal de 4,07 m³/h.

Este punto de intersección representa la condición límite de inicio de cavitación para el nivel de vacío considerado.

Para valores de caudal superiores a dicho punto, se verifica que:

$$ANPA_{disp} < ANPA_{req}$$

por lo que el sistema operaría en régimen cavitante.

Determinación precisa del punto de inicio de cavitación (Q_{crit}): El inicio del fenómeno de cavitación se produce en el punto en el cual la curva de ANPA disponible intersecta a la curva de ANPA requerido. En dicha condición se cumple que:

$$ANPA_{disp} = ANPA_{req}$$

Por lo tanto, si se define la diferencia entre curvas como:

$$\Delta ANPA = ANPA_{disp} - ANPA_{req}$$

La condición de inicio del fenómeno se verifica cuando:

$$\Delta ANPA = 0$$

Este criterio permite determinar de manera analítica el caudal crítico correspondiente, sin depender únicamente de la inspección visual del gráfico.

Dado que ambas curvas presentan un comportamiento continuo y suave en el intervalo analizado, y considerando que la discretización entre caudales es suficientemente pequeña, puede asumirse que, en cada tramo comprendido entre dos caudales consecutivos, la variación del ANPA puede aproximarse mediante una función lineal. Por lo tanto, se puede aplicar interpolación lineal entre los dos valores de caudal en los cuales la diferencia $\Delta ANPA$ cambia de signo (porque es en ese intervalo en donde, en algún punto, pasó por cero), permitiendo estimar con mayor precisión el caudal crítico correspondiente. Bajo estas condiciones, el error asociado a la aproximación lineal resulta despreciable para los fines del presente análisis.

Para nuestro caso concreto de un vacío aplicado del 75%, se observa, en la Tabla 9, que la diferencia $\Delta ANPA$ cambia de signo entre los caudales 4,25 m³/h y 3,95 m³/h.

Tabla 9 Diferencia entre $ANPA_{disp.}$ y $ANPA_{req.}$

Q [m ³ /h]	ANPA _{req}	ANPA _{disp} CV	$\Delta ANPA$
5,6	0,637	-2,265	-2,902
5,45	0,626	-1,953	-2,579
5,3	0,614	-1,649	-2,264
5,1	0,599	-1,257	-1,856
4,95	0,587	-0,973	-1,560
4,75	0,571	-0,607	-1,178
4,55	0,555	-0,256	-0,810
4,25	0,530	0,243	-0,287
3,95	0,505	0,709	0,204
3,5	0,466	1,345	0,879
2,9	0,411	2,075	1,664
2,1	0,331	2,839	2,508
1,2	0,228	3,412	3,184
0,5	0,127	3,646	3,519

Es decir que:

- Para $Q_1 = 4,25 \text{ m}^3/\text{h}$, se obtiene $\Delta ANPA_1 = ANPA_{disp.} - ANPA_{req} = -0,287 \text{ m}$
- Para $Q_2 = 3,95 \text{ m}^3/\text{h}$, se obtiene $\Delta ANPA_2 = ANPA_{disp.} - ANPA_{req} = +0,204 \text{ m}$

Dado que la función es continua en dicho intervalo, el caudal crítico se determina mediante interpolación lineal, aplicando la expresión:

$$Q_{crit} = Q_1 + \frac{0 - \Delta ANPA_1}{\Delta ANPA_2 - \Delta ANPA_1} (Q_2 - Q_1)$$

Reemplazando los valores correspondientes:

$$Q_{crit} = 4,25 + \frac{0 - (-0,287)}{0,204 - 0,287} \cdot (0,204 - 0,287) \approx 4,07 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Por lo tanto, para un vacío aplicado del 75%, el inicio de cavitación se produce aproximadamente a un caudal de $4,07 \text{ m}^3/\text{h}$, valor que coincide con el punto de intersección observado en la representación gráfica de la Figura 28.

2.3.7 Análisis e interpretación de resultados

En primer lugar, la determinación teórica del ANPA requerido permitió estimar la curva característica de la bomba en función del caudal, estableciendo el nivel mínimo de energía en succión necesario para evitar la cavitación en cada punto de operación. No obstante, debe señalarse que dicha curva fue obtenida mediante correlaciones empíricas basadas en el coeficiente de cavitación de Thoma, por lo que constituye una aproximación preliminar. La determinación definitiva del ANPA requerido para la bomba BC 100T deberá realizarse experimentalmente en el banco de ensayos, adoptando el criterio de caída del 3% de la altura manométrica. Este criterio se encuentra estandarizado en normas internacionales, como la ANSI/HI 14.6 del Hydraulic Institute [16], y es ampliamente adoptado en ensayos de bombas centrífugas.

Posteriormente, el cálculo del ANPA disponible sin aplicación de vacío mostró que, en condiciones atmosféricas normales, la curva correspondiente se mantiene por encima de la curva de ANPA requerido en todo el rango operativo analizado. Esto confirma que, bajo estas condiciones, la bomba funciona en régimen seguro, sin riesgo de cavitación en todo su rango de caudales.

Al considerar la aplicación de vacío sobre la superficie libre del tanque, se observa un desplazamiento descendente de la curva de ANPA disponible. Para un nivel de vacío equivalente al 75%, dicha curva intersecta a la curva de ANPA requerido dentro del rango operativo de la bomba, produciéndose la condición:

$$ANPA_{disp} = ANPA_{req}$$

Mediante interpolación lineal se determinó que, para este caso, el inicio de cavitación ocurre a un caudal aproximado de 4,07 m³/h.

Desde el punto de vista físico, este resultado indica que la reducción de la presión absoluta en el tanque constituye el mecanismo principal de control del fenómeno, ya que disminuye directamente la energía disponible en la entrada del rodete hasta alcanzar el límite en el cual comienza la formación de cavidades de vapor.

En consecuencia, el modelo desarrollado permite no solo identificar el punto de inicio de cavitación para distintos escenarios de vacío aplicado, sino también analizar la influencia conjunta de las variables que gobiernan el fenómeno. En particular, el banco de ensayos permitirá modificar de manera independiente tres parámetros fundamentales: el nivel de vacío aplicado sobre la superficie libre del tanque, el caudal circulante a través de la regulación en la línea de descarga, y el coeficiente de pérdidas mediante la válvula de globo en la succión.

La posibilidad de actuar sobre estas tres variables permite modificar la posición y el comportamiento de la curva de ANPA disponible. En particular, la aplicación de vacío produce un desplazamiento vertical descendente de la curva, mientras que la variación del coeficiente de pérdidas en succión altera su pendiente, intensificando la caída del ANPA disponible a medida que aumenta el caudal. En conjunto, estos efectos permiten modificar el punto de intersección con la curva de ANPA requerido y, por lo tanto, controlar la condición de inicio de cavitación.

2.4 Dimensionamiento de componentes complementarios e instrumentación

Con el diseño hidráulico del banco de ensayos ya definido, resulta necesario ahora seleccionar y dimensionar los componentes complementarios y la instrumentación que permitirán la operación, control y medición de las variables relevantes durante los ensayos experimentales.

La correcta elección de estos elementos es fundamental para garantizar:

- La obtención de datos confiables y reproducibles,
- La seguridad operativa del banco de ensayos,
- El cumplimiento de los objetivos didácticos propuestos.

En este trabajo se abordará el dimensionamiento preliminar de los siguientes dispositivos:

- **Caudalímetro:** para medición del caudal circulante en el circuito.
- **Manómetro:** para medición de la presión a la salida de la bomba.
- **Vacuómetro 1:** para medición de la presión en el tanque hermético
- **Vacuómetro 2:** para medición de la presión en la succión de la bomba.
- **Termómetro:** para monitoreo de la temperatura del fluido.
- **Variador de frecuencia:** para el control de la velocidad de rotación del motor de la bomba.

Para cada elemento se establecerán los criterios básicos de selección, los rangos de medición adecuados y las recomendaciones de instalación, en función de las condiciones de operación del banco y de los fines pedagógicos del proyecto. Asimismo, las imágenes incluidas en esta sección tienen carácter meramente ilustrativo y se incorporan con el fin de facilitar la identificación de los instrumentos, no constituyendo una selección específica de equipos desde el punto de vista técnico ni comercial.

2.4.1 Selección del Caudalímetro

Para la medición del caudal circulante en el banco de ensayos, se seleccionará un **caudalímetro digital para agua, con conexión de 1 pulgada de diámetro**, diseñado para medición de caudales en instalaciones hidráulicas de baja y mediana presión.

El equipo elegido ofrece las siguientes características técnicas:

- **Diámetro de conexión:** 1" (25 mm), compatible con la cañería principal del banco.
- **Rango de medición:** 15 a 120 litros por minuto (equivalente a aproximadamente 0,9 a 7,2 m³/h).
- **Rango de temperatura de operación:** 0 °C a 60 °C.
- **Presión máxima de operación:** 2 MPa (40 bar).

Estas especificaciones cubren adecuadamente el rango de caudales esperados en el banco de ensayos, cuyo caudal nominal de diseño se ubica alrededor de 3,6 m³/h, garantizando suficiente margen de medición tanto en condiciones de operación normal como en eventuales variaciones debidas a cambios de velocidad mediante el variador de frecuencia. En la Figura 29 se presenta dicho caudalímetro:



Figura 29. Caudalímetro digital de 1" seleccionado para el banco de ensayos.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Las características adoptadas se corresponden con las indicadas en catálogos comerciales de caudalímetros digitales para agua de diámetro nominal del orden de DN25 (1") [17], comúnmente utilizados en aplicaciones hidráulicas de control y ensayo a escala de laboratorio. Este tipo de caudalímetros, basados en sensores de flujo o sistemas cuenta-litros, resulta adecuado para la medición de caudales moderados, priorizando la visualización directa y la repetibilidad de las mediciones por sobre la precisión industrial.

Justificación de la selección:

- **Compatibilidad hidráulica:** El diámetro de conexión de 1 pulgada coincide exactamente con el de la tubería prevista.
- **Adecuación de rango:** El caudalímetro cubre desde caudales mínimos (funcionamiento a baja velocidad) hasta valores por encima del caudal máximo nominal de la bomba.
- **Facilidad de lectura:** La pantalla digital permite obtener mediciones directas, rápidas y de fácil interpretación durante los ensayos, facilitando la toma de datos para el trazado de curvas y análisis de fenómenos.
- **Robustez y simplicidad:** Su diseño robusto y su construcción apta para presiones muy superiores a las que estarán presentes en el banco garantizan una operación segura y prolongada.
- **Costo accesible:** El precio de adquisición es razonable, ajustándose a las limitaciones presupuestarias del proyecto.

Consideraciones de instalación:

- Se recomienda instalar el caudalímetro en la línea de descarga de la bomba, en un tramo de cañería recto, alejado de perturbaciones como codos o válvulas, para garantizar lecturas estables.
- Se deberá respetar la orientación de montaje indicada por el fabricante y asegurar una correcta alineación para evitar errores de medición.

2.4.2 Selección del Manómetro

Para la medición de la presión a la salida de la bomba, se seleccionará un **manómetro analógico de escala circular**, de fácil lectura y apto para fluidos como el agua a bajas temperaturas.

Dado que la bomba BC 100 T puede alcanzar una altura manométrica de aproximadamente 24 m.c.a. en su punto de operación óptimo, lo que equivale a una presión aproximada de:

$$P = \gamma \times h = 9810 \text{ N/m}^3 \times 24 \text{ m} = 235440 \text{ Pa} \approx 2.35 \text{ bar}$$

Se recomienda la utilización de un manómetro cuyo rango nominal abarque al menos hasta 4 bar, para contemplar eventuales sobrepresiones y brindar un margen de seguridad en las lecturas.

Las características adoptadas se corresponden con catálogos comerciales de manómetros industriales, como el modelo **213.53 del fabricante WIKA** [18], comúnmente utilizados en bancos de ensayo y sistemas de bombeo, empleados como **referencia técnica**.

Especificaciones recomendadas:

- **Rango de medición:** 0 a 4 bar (preferentemente).
- **Diámetro de carátula:** 63 mm o superior, para facilitar la visualización.
- **Conexión:** Rosca inferior de 1/4" o 3/8" BSP (estándar para instrumentación hidráulica).
- **Clase de precisión:** 1,6 o 2,5 (suficiente para ensayos didácticos).
- **Material de construcción:** Carcasa metálica y elemento sensor de bronce o acero inoxidable.

En la Figura 30, se presenta un manómetro como el recomendado:



Figura 30. Manómetro analógico de glicerina: Rango: 0-4 bar – rosca ¼.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Justificación de la selección:

- **Adecuación de rango:** Permite medir la presión normal de descarga de la bomba y eventuales valores superiores sin riesgo de daño al instrumento.

- **Facilidad de lectura:** El diseño analógico de carátula amplia facilita la rápida interpretación de las lecturas durante los ensayos.
- **Robustez y simplicidad:** Se trata de instrumentos de bajo costo, alta disponibilidad en el mercado y mantenimiento sencillo, compatibles con los objetivos y limitaciones del proyecto.

Consideraciones de instalación:

- Instalar el manómetro en la línea de descarga, inmediatamente después de la bomba, en un punto donde se asegure flujo uniforme.
- Se recomienda utilizar un tramo corto de tubería flexible o un pequeño montaje antivibratorio para proteger el instrumento de las pulsaciones o vibraciones producidas durante la operación.

2.4.3 Selección de los Vacuómetros

Para la medición de la presión en el sistema de aspiración del banco de ensayos se requiere instrumentación capaz de registrar valores inferiores a la presión atmosférica, dado que el circuito operará bajo condiciones de depresión controlada y se busca monitorear el comportamiento del ANPA disponible durante los ensayos.

Con este objetivo, se prevé la instalación de **dos vacuómetros**: uno ubicado en el tanque hermético y otro en la línea de succión de la bomba centrífuga. El primero permitirá medir la depresión generada por la bomba de vacío en el volumen gaseoso del tanque, representativa de la presión actuante sobre la superficie libre del agua, mientras que el segundo registrará la presión efectiva en la brida de aspiración de la bomba, incorporando el efecto de las pérdidas de carga en la línea de succión. A fin de facilitar la comparación directa de lecturas, se seleccionan **dos vacuómetros de características equivalentes**.

En ambos casos, el instrumento adecuado es un vacuómetro o manómetro de vacío, calibrado en unidades de presión negativa relativa respecto al ambiente (generalmente en bar negativos o mmHg), lo que permite una lectura directa de los niveles de vacío alcanzados durante el funcionamiento del banco.

Dado que el objetivo experimental es detectar condiciones cercanas a la cavitación, caracterizadas por valores reducidos de presión en la aspiración, resulta fundamental contar con un rango de medición apropiado y una resolución suficiente en bajas presiones.

Las especificaciones adoptadas se corresponden con las indicadas en catálogos comerciales de vacuómetros industriales, como los manómetros de vacío con relleno de glicerina utilizados en aplicaciones hidráulicas e industriales, por ejemplo, los instrumentos de la serie

213.53 del fabricante WIKA [19], disponibles con escala de vacío, presión o compuesta, empleados aquí como referencia técnica.

En la Figura 31 se presenta un vacuómetro como el recomendado.



Figura 31. Vacuómetro analógico de glicerina: Rango: 0 a -1 bar – rosca 1/4.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Especificaciones recomendadas:

- Rango de medición: 0 a -1 bar (presión relativa negativa) o su equivalente en mmHg (0 a -760 mmHg).
- Diámetro de carátula: 63 mm o superior, para facilitar la lectura.
- Conexión: rosca inferior de 1/4" BSP.
- Clase de precisión: 1,6 o 2,5.
- Material de construcción: carcasa metálica, con elemento sensor de cobre o acero inoxidable.

Justificación de la selección:

- **Adecuación al fenómeno estudiado:** La medición precisa de la presión negativa es esencial para evaluar el ANPA disponible y analizar la aparición de cavitación en la bomba.
- **Complementariedad de mediciones:** La utilización de dos vacuómetros permite distinguir entre el vacío impuesto al sistema (tanque) y el vacío efectivo en la succión de la bomba, aportando mayor claridad al análisis experimental.

- **Simplicidad y robustez:** Los vacuómetros analógicos resultan adecuados para aplicaciones didácticas, ya que son económicos, confiables, de fácil lectura y no requieren alimentación eléctrica.

Consideraciones de instalación:

- El vacuómetro de succión se instalará lo más próximo posible a la entrada de la bomba, mediante una derivación lateral de la cañería principal.
- El vacuómetro del tanque se ubicará en un punto representativo del volumen gaseoso del tanque hermético (zona superior / línea de vacío), de modo de medir la depresión actuante sobre la superficie libre del agua.
- Se recomienda montar ambos instrumentos en posición vertical, con buena accesibilidad visual desde la zona de operación del banco, y considerar la incorporación de soportes antivibratorios si fuera necesario.

2.4.4 Selección del Termómetro

Si bien el banco de ensayos no contempla en esta etapa un sistema activo de calentamiento del fluido, resulta conveniente incorporar un **termómetro** que permita monitorear la temperatura del agua en el circuito durante los ensayos.

La inclusión de este instrumento responde a dos razones principales:

Control de las condiciones de operación: La temperatura del fluido influye directamente sobre sus propiedades físicas, especialmente la presión de vapor, y por ende, sobre el cálculo del ANPA disponible y el análisis de cavitación.

Seguridad del sistema: Un incremento inesperado de la temperatura podría alterar las condiciones del ensayo o comprometer la integridad de componentes sensibles (como caudalímetros electrónicos o sensores de presión).

El instrumento seleccionado corresponde a un termómetro industrial de lectura directa, del tipo bimetálico, ampliamente utilizado en instalaciones hidráulicas e industriales por su simplicidad, robustez y confiabilidad. Las características adoptadas se corresponden con las indicadas en catálogos comerciales de termómetros industriales [20], empleados aquí como referencia técnica.

En la Figura 32 se presenta un termómetro como el recomendado.



Figura 32. Termómetro bimetalico analógico de inmersión 0-60°C.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Especificaciones recomendadas:

- **Tipo de termómetro:** Bimetalico analógico de inmersión o digital con sensor de sonda.
- **Rango de medición:** 0 °C a 70 °C (suficiente para condiciones normales de laboratorio).
- **Precisión:** ± 1 °C o mejor.
- **Conexión:** Sonda tipo roscada o vaina de inmersión en línea, según el modelo.
- **Materiales:** Acero inoxidable o bronce para contacto con el fluido.

Justificación de la selección:

- **Simplicidad y bajo costo:** Un termómetro de inmersión es económico, fácil de instalar y adecuado para el nivel de precisión requerido en un banco de fines didácticos.
- **Relevancia técnica:** Aunque no se emplee como variable principal de análisis, la temperatura es un parámetro de contexto clave al trabajar con cavitación, dado su efecto sobre la presión de saturación del fluido.
- **Futuro potencial de expansión:** En etapas posteriores, el banco podría incorporar ensayos térmicos o ajustes de ANPA mediante calentamiento controlado, para lo cual el sensor ya instalado resultará útil.

Consideraciones de instalación:

- Se recomienda ubicar el termómetro en la línea de succión, preferentemente cerca del tanque, para registrar la temperatura promedio del fluido antes de ingresar a la bomba.
- Asegurar una correcta inmersión del bulbo o sonda en el flujo principal, evitando interferencias que alteren la medición.

2.4.5 Observaciones generales

La selección de la instrumentación propuesta responde al criterio de equilibrar la funcionalidad técnica con las limitaciones presupuestarias y de infraestructura del laboratorio. Todos los dispositivos considerados cumplen con los requisitos necesarios para el monitoreo básico de las variables hidráulicas más relevantes del sistema, tales como caudal, presión y temperatura, así como para el control del régimen de operación de la bomba, sin necesidad de recurrir a tecnología de alto costo o complejidad.

Se priorizó la utilización de instrumentos de lectura directa, adecuados tanto para fines pedagógicos como para la realización de ensayos experimentales básicos, asegurando robustez, facilidad de instalación y confiabilidad en un entorno de uso frecuente por parte de estudiantes.

Dado el carácter académico del banco, se aceptan márgenes de precisión propios de instrumentos de clase 1,6 a 2,5 para la medición de variables hidráulicas, los cuales resultan suficientes para el análisis cualitativo de curvas características y la detección de fenómenos como la cavitación.

2.5 Dimensionamiento y selección de la instrumentación eléctrica

Con el diseño hidráulico y la instrumentación asociada al banco de ensayos ya definidos, resulta necesario abordar ahora el dimensionamiento y la selección de los componentes eléctricos que permitirán la alimentación, el control y la protección del sistema durante su operación.

La instrumentación eléctrica del banco cumple un rol fundamental, no solo desde el punto de vista funcional, sino también en términos de seguridad y uso académico, ya que el equipo será operado de manera frecuente por estudiantes y docentes. Por este motivo, la correcta selección de los dispositivos eléctricos resulta indispensable para garantizar una operación confiable, segura y acorde a las condiciones reales de infraestructura disponibles en el laboratorio.

En particular, se debe tener en cuenta que el laboratorio no dispone de una red trifásica, lo cual condiciona el esquema de alimentación del banco y requiere la incorporación de dispositivos específicos para el accionamiento del motor eléctrico de la bomba. Asimismo, resulta imprescindible incorporar protecciones adecuadas frente a sobrecorrientes, cortocircuitos y contactos indirectos, así como elementos de maniobra que permitan una operación clara y controlada del sistema.

En este trabajo se abordará el dimensionamiento preliminar y la selección de los siguientes componentes eléctricos principales:

- Interruptor termomagnético, para la protección de la instalación frente a sobrecargas y cortocircuitos.
- Interruptor diferencial, para la protección de las personas frente a contactos indirectos.
- Variador de frecuencia, para el control de la velocidad de rotación del motor eléctrico de la bomba.
- Pulsadores de mando y parada de emergencia, para la operación segura del banco de ensayos.
- Tablero eléctrico, como elemento integrador de los distintos dispositivos eléctricos y de control.

Para cada uno de estos componentes se establecerán los criterios básicos de selección y las consideraciones generales de instalación, priorizando la seguridad operativa, la simplicidad del sistema y su adecuación a los fines didácticos del proyecto. Asimismo, las imágenes incluidas en esta sección tienen carácter meramente ilustrativo y se incorporan con el fin de facilitar la identificación de los componentes, no constituyendo una selección específica desde el punto de vista técnico ni comercial.

2.5.1 Selección del interruptor termomagnético

Para la protección de la instalación eléctrica del banco de ensayos frente a sobrecargas y cortocircuitos, se prevé la incorporación de interruptores termomagnéticos como dispositivos de protección principales de los circuitos de alimentación. Estos elementos resultan indispensables para preservar la integridad de los componentes eléctricos y garantizar una operación segura del sistema.

El interruptor termomagnético combina dos funciones de protección: protección térmica, que actúa ante sobrecargas prolongadas, y protección magnética, que actúa de forma instantánea ante cortocircuitos. De este modo, se asegura la desconexión automática del circuito ante condiciones anómalas de funcionamiento que puedan comprometer el equipamiento o generar riesgos eléctricos.

Dado que el banco de ensayos incorpora dos equipos accionados de manera independiente —la bomba centrífuga principal y la bomba de vacío—, se adoptan interruptores termomagnéticos independientes para cada uno de ellos, permitiendo una protección adecuada y selectiva de cada circuito.

Como referencia instrumental se consideran interruptores termomagnéticos comerciales de uso industrial para instalaciones de baja tensión, ampliamente utilizados en tableros eléctricos de control y protección de motores de pequeña y mediana potencia, tales como los dispositivos

fabricados por Schneider Electric, ABB o Siemens, entre otros fabricantes de prestaciones equivalentes [16]. Estos equipos presentan características técnicas adecuadas para la protección de circuitos monofásicos alimentados a 220 V, ajustándose a los requerimientos de seguridad y confiabilidad del banco de ensayos.

Interruptor termomagnético para la bomba centrífuga (con variador de frecuencia)

Considerando que la bomba centrífuga es accionada mediante un variador de frecuencia monofásico-trifásico, con una potencia nominal del orden de 0,75 kW (1 HP) y una corriente de entrada aproximada de 8,2 A, se recomienda la siguiente selección:

Especificaciones recomendadas:

- Tipo: Interruptor termomagnético monofásico
- Número de polos: 2 polos (fase y neutro)
- Corriente nominal: 16 A
- Curva de disparo: Curva C, adecuada para cargas con corrientes de arranque moderadas, como motores alimentados mediante variador de frecuencia
- Tensión nominal: 230 V – 50 Hz
- Capacidad de corte: Acorde a instalaciones de baja tensión en entornos de laboratorio

Estas características permiten una protección eficaz del circuito de alimentación del variador sin provocar disparos intempestivos durante el arranque o la operación normal del banco.

En la Figura 33 se presenta un interruptor termomagnético como el recomendado.



Figura 33. Interruptor termomagnético bipolar 16 A – Curva C.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Interruptor termomagnético para la bomba de vacío:

La bomba de vacío instalada en el banco se encuentra accionada por un motor monofásico de 1/4 HP, alimentado a 220 V, con una corriente nominal aproximada de 2,6 A, según los datos de placa del fabricante. Dado que se trata de un motor de baja potencia y arranque directo, se recomienda la utilización de un interruptor termomagnético de menor corriente nominal, adecuado a esta condición de funcionamiento.

Especificaciones recomendadas:

- Tipo: Interruptor termomagnético monofásico
- Número de polos: 2 polos (fase y neutro)
- Corriente nominal: 6 A (admisible también 10 A, según disponibilidad comercial)
- Curva de disparo: Curva C
- Tensión nominal: 230 V – 50 Hz
- Capacidad de corte: Acorde a instalaciones de baja tensión

La selección de este interruptor permite una protección adecuada del motor de la bomba de vacío, evitando sobredimensionamientos innecesarios y manteniendo la selectividad del sistema.

En la Figura 34 se observa un interruptor termomagnético como el recomendado.



Figura 34. Interruptor termomagnético bipolar 6 A – Curva C.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Justificación de la selección

- Protección individualizada: La utilización de interruptores termomagnéticos independientes permite proteger de manera específica cada equipo del banco.
- Adecuación al tipo de carga: Las corrientes nominales seleccionadas se corresponden con las características eléctricas reales de cada motor.
- Compatibilidad con el entorno académico: Se emplean dispositivos estándar, de amplia difusión y fácil interpretación para fines didácticos.
- Confiabilidad y simplicidad: Se trata de protecciones robustas, de bajo mantenimiento y alta disponibilidad comercial.

Consideraciones de instalación

- Los interruptores termomagnéticos deberán instalarse aguas arriba del interruptor diferencial, protegiendo cada uno de los circuitos de alimentación del banco.
- Se recomienda su montaje dentro del tablero eléctrico, correctamente identificados y accesibles para tareas de operación y mantenimiento.

2.5.2 Selección de los interruptores diferenciales

Para la protección de las personas frente a contactos eléctricos directos e indirectos durante la operación del banco de ensayos, se prevé la incorporación de interruptores diferenciales como elementos fundamentales del sistema de seguridad eléctrica. Estos dispositivos permiten detectar corrientes de fuga a tierra y desconectar automáticamente el circuito cuando dichas corrientes superan un valor prefijado, reduciendo significativamente el riesgo de electrocución.

El interruptor diferencial actúa comparando la corriente que circula por los conductores activos del circuito (fase y neutro). Ante la presencia de una diferencia entre ambas —indicativa de una fuga de corriente hacia tierra—, el dispositivo interrumpe el suministro eléctrico en un tiempo muy reducido, protegiendo al operador frente a contactos accidentales con partes energizadas.

Dado que el banco de ensayos será operado en un entorno académico, con participación de estudiantes y docentes, y considerando la coexistencia de instalaciones eléctricas con agua, tuberías metálicas y equipos en funcionamiento, la incorporación de este tipo de protección resulta indispensable para garantizar condiciones seguras de trabajo.

Si bien desde el punto de vista normativo y funcional sería posible proteger todo el tablero eléctrico mediante un único interruptor diferencial general ubicado aguas arriba de los distintos circuitos, en el presente diseño se adopta una solución con dos interruptores diferenciales independientes, uno para cada circuito principal del banco: Un interruptor diferencial para el circuito de la bomba centrífuga accionada mediante variador de frecuencia, y un interruptor diferencial para el circuito de la bomba de vacío, de funcionamiento independiente.

Esta configuración permite mejorar la selectividad del sistema, evitando que una falla de aislamiento o una fuga de corriente en el circuito de la bomba de vacío provoque la desconexión total del banco durante ensayos en régimen normal de la bomba centrífuga. De este modo, se incrementa la continuidad operativa del banco sin comprometer la seguridad de las personas.

Como referencia instrumental se consideran interruptores diferenciales comerciales de uso industrial y residencial, ampliamente empleados en instalaciones eléctricas de baja tensión, tales como los fabricados por empresas reconocidas del sector (por ejemplo, Schneider Electric, ABB, Siemens u otros fabricantes de prestaciones equivalentes) [21]. Estos dispositivos presentan características técnicas adecuadas para la protección de circuitos monofásicos de 220 V, cumpliendo con las normativas de seguridad vigentes.

Especificaciones recomendadas:

Se adopta el mismo modelo de interruptor diferencial para ambos circuitos, a fin de mantener homogeneidad constructiva y simplificar el mantenimiento del tablero.

- **Tipo:** Interruptor diferencial para corriente alterna (tipo AC o tipo A).
- **Número de polos:** 2 polos (fase y neutro).
- **Corriente nominal:** 25 A o superior, compatible con los interruptores termomagnéticos asociados a cada circuito.
- **Corriente diferencial nominal:** 30 mA, valor recomendado para la protección de personas.
- **Tensión nominal:** 230 V – 50 Hz.
- **Tiempo de actuación:** Instantáneo, acorde a dispositivos de protección personal.

En la Figura 35 se observa un interruptor diferencial como el recomendado para ambos circuitos.



Figura 35. Interruptor diferencial bipolar 2x25A – 30mA.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Justificación de la selección:

- Protección de las personas: El valor de sensibilidad adoptado (30 mA) es el recomendado para minimizar el riesgo de electrocución.
- Mejora de la selectividad: La utilización de diferenciales independientes por circuito evita la desconexión total del banco ante una falla localizada.
- Adecuación al entorno de trabajo: Resulta especialmente apropiado para un banco de ensayos hidráulico, donde existe presencia de agua y partes metálicas accesibles.
- Complementariedad con otras protecciones: Actúa en conjunto con los interruptores termomagnéticos y el variador de frecuencia, completando el esquema de protección eléctrica del sistema.
- Simplicidad y confiabilidad: Se trata de dispositivos estándar, de alta disponibilidad comercial y uso extendido en entornos educativos e industriales.

Consideraciones de instalación:

- Cada interruptor diferencial deberá instalarse aguas abajo del interruptor termomagnético correspondiente y aguas arriba de los elementos de control y potencia de cada circuito.
- Ambos dispositivos deberán montarse dentro del tablero eléctrico, correctamente identificados y con acceso sencillo para tareas de inspección, prueba y mantenimiento periódico.

2.5.3 Selección del Variador de Frecuencia

Para dotar al banco de ensayos de la capacidad de operar la bomba a diferentes condiciones de caudal y presión, se propone la incorporación de un **variador de frecuencia (VDF)** que permita modificar la velocidad de rotación del motor eléctrico, y con ello, el régimen de operación de la bomba.

Dado que el motor correspondiente a la bomba seleccionada es trifásico, con una potencia nominal de 1 HP, y que el laboratorio de la FICA no dispone de red eléctrica trifásica, se selecciona un variador de frecuencia de tipo especial, capaz de operar con alimentación monofásica y generar una salida trifásica adecuada para el accionamiento del motor.

Como referencia instrumental se consideran variadores de frecuencia comerciales de uso industrial, tales como los modelos de la serie GK100 [22], cuyas características técnicas se ajustan a los requerimientos del banco de ensayos.

Especificaciones recomendadas:

- **Tipo:** Variador de frecuencia monofásico/trifásico.
- **Tensión de entrada:** 220 V monofásica.
- **Tensión de salida:** 220 V trifásica.
- **Potencia nominal mínima:** 0,75 kW (1 HP).
- **Frecuencia de salida:** 0 a 60 Hz (o superior, si es posible).
- **Protecciones:** Contra sobrecarga, cortocircuito, sobretensión.
- **Control de velocidad:** De tipo V/f (Voltaje/Frecuencia) o vectorial simple.

En la Figura 36 se observa un variador de frecuencia como el recomendado.



Figura 36. Variador de frecuencia monofásico / trifásico.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Justificación de la selección:

- **Adaptabilidad a las condiciones de infraestructura:** Permite operar motores trifásicos en entornos donde sólo se dispone de alimentación monofásica, como es el caso del laboratorio de la FICA.
- **Versatilidad operativa:** Permite realizar ensayos a diferentes velocidades de la bomba, modificando así los caudales, alturas manométricas y condiciones de ANPA disponible, facilitando el estudio de las curvas características y del comportamiento frente a cavitación.
- **Control didáctico seguro:** Los variadores modernos incorporan protecciones que aseguran la operación segura tanto para el motor como para el operador.

Consideraciones de instalación:

- Instalar el VDF en un lugar accesible, protegido contra polvo y humedad, y adecuadamente ventilado.
- Incorporar señalización clara de las funciones básicas de control de velocidad y parada de emergencia.
- Asegurar la correcta parametrización inicial del equipo, configurando límites de frecuencia acordes a las características del motor y bomba instalados.

2.5.4 Selección de pulsadores de mando y parada de emergencia

Para la operación segura y controlada del banco de ensayos, se prevé la incorporación de pulsadores de mando y un dispositivo de parada de emergencia, integrados al tablero eléctrico. Estos elementos permiten al operador accionar los distintos equipos de manera simple e intuitiva, así como interrumpir inmediatamente el funcionamiento del sistema ante una situación anómala o de riesgo.

Los pulsadores de mando cumplen la función de habilitar y detener el funcionamiento de los equipos del banco, disponiéndose dos conjuntos independientes de pulsadores de marcha y parada: uno correspondiente al accionamiento de la bomba centrífuga, controlada mediante variador de frecuencia, y otro destinado al accionamiento de la bomba de vacío. De este modo, se garantiza la maniobra independiente de ambos equipos, permitiendo operar el banco tanto en régimen normal como en condiciones de vacío para la inducción de cavitación.

La parada de emergencia constituye un dispositivo de seguridad destinado a provocar la desconexión inmediata de la totalidad del sistema eléctrico del banco, actuando sobre ambos

circuitos ante cualquier condición que pueda comprometer la integridad del equipamiento o la seguridad de los usuarios.

Dado el carácter didáctico del banco y su utilización en un entorno académico, resulta fundamental que los dispositivos de mando sean claramente identificables, de accionamiento sencillo y con una disposición accesible para el operador.

Como referencia instrumental se consideran pulsadores industriales normalizados de uso habitual en tableros de control de máquinas eléctricas, tales como los fabricados por empresas reconocidas del sector (por ejemplo, Schneider Electric, ABB, Siemens u otros fabricantes de prestaciones equivalentes) [23] [24] [25]. Se adopta el mismo modelo de pulsador para ambos conjuntos de mando, a fin de mantener homogeneidad constructiva y facilitar su comprensión y mantenimiento.

Especificaciones recomendadas:

Pulsadores de mando (marcha y parada):

- Tipo: Pulsadores momentáneos, normalmente abiertos (marcha) y normalmente cerrados (parada)
- Tensión nominal: 230 V CA
- Diámetro estándar de montaje: 22 mm
- Grado de protección: IP54 o superior
- Identificación: Pulsador de marcha en color verde y pulsador de parada en color rojo, conforme a prácticas habituales de señalización

En la Figura 37 se observa un par de pulsadores de marcha y parada como los recomendados.



Figura 37. Pulsadores de marcha y parada – Schneider.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Parada de emergencia:

- Tipo: Pulsador tipo “seta” de accionamiento por golpe.
- Contactos: Normalmente cerrados, con enclavamiento mecánico.
- Rearme: Manual por giro o tracción, según el modelo.
- Color: Rojo sobre fondo amarillo.
- Grado de protección: IP54 o superior.

En la Figura 38 se observa un pulsador de parada de emergencia como el recomendado.



Figura 38. Pulsador “parada de emergencia” tipo “seta” – Schneider.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Justificación de la selección:

- **Seguridad operativa:** La parada de emergencia permite interrumpir de forma inmediata el funcionamiento completo del banco ante cualquier situación imprevista.
- **Claridad de operación:** La diferenciación cromática y funcional de los pulsadores facilita su identificación y uso por parte de estudiantes y docentes.
- **Maniobra independiente de los equipos:** La disposición de pulsadores diferenciados para la bomba centrífuga y la bomba de vacío permite seleccionar el modo de funcionamiento del banco según el ensayo a realizar.
- **Compatibilidad con el sistema de control:** Los pulsadores son plenamente compatibles con las entradas de control del variador de frecuencia y con los circuitos de mando previstos.
- **Adecuación al entorno académico:** Se trata de dispositivos robustos, de uso extendido en laboratorios y talleres educativos, que favorecen la comprensión de esquemas básicos de mando y protección eléctrica.

Consideraciones de instalación:

- Los pulsadores de mando y la parada de emergencia deberán instalarse en el frente del tablero eléctrico, a una altura accesible y visible para el operador.

- El pulsador de parada de emergencia deberá ubicarse en una posición claramente destacada, permitiendo su accionamiento rápido sin necesidad de maniobras complejas.
- Se recomienda una correcta rotulación de cada elemento, indicando de manera inequívoca la función correspondiente a cada equipo del banco.

2.5.5 Tablero eléctrico del banco de ensayos

El tablero eléctrico constituye el elemento central de distribución, mando y protección del sistema eléctrico del banco de ensayos. En él se integran los dispositivos de protección, control y accionamiento necesarios para el funcionamiento seguro y confiable de los distintos actuadores eléctricos del banco, en particular la bomba centrífuga accionada mediante variador de frecuencia y la bomba de vacío de funcionamiento independiente, permitiendo una operación ordenada y fácilmente comprensible desde el punto de vista didáctico.

El diseño del tablero se concibe como una solución compacta, accesible y modular, adecuada para su instalación en un entorno académico y compatible con futuras ampliaciones o modificaciones del banco. Su función principal es alojar y organizar los componentes eléctricos seleccionados, garantizando una correcta coordinación entre ellos y facilitando tanto la operación como las tareas de mantenimiento.

El tablero eléctrico del banco de ensayos estará compuesto, de manera general, por los siguientes elementos:

- **Interruptores termomagnéticos**, destinados a la protección individual de cada circuito del banco frente a sobrecargas y cortocircuitos.
- **Interruptores diferenciales independientes por circuito**, orientados a la protección de las personas frente a contactos eléctricos directos e indirectos.
- **Variador de frecuencia**, encargado del control de la velocidad de rotación del motor de la bomba centrífuga y de la protección específica del mismo.
- **Pulsadores de mando (marcha y parada)** para cada actuador, y **pulsador de parada de emergencia** de acción general, destinado a la desconexión inmediata de todo el sistema en caso de necesidad.
- **Bornes de conexión, canalizaciones internas y elementos de señalización**, necesarios para una correcta distribución, identificación y ordenamiento del cableado interno.

Como referencia instrumental se consideran gabinetes metálicos o plásticos de uso industrial, aptos para instalaciones de baja tensión, ampliamente utilizados en tableros de control

y protección de máquinas eléctricas [26]. Estos gabinetes se encuentran disponibles en diversas dimensiones y grados de protección, permitiendo seleccionar una configuración acorde a los requerimientos del banco de ensayos, al espacio disponible en el laboratorio y a las condiciones ambientales de operación.

En la Figura 39 se observa un gabinete metálico como el recomendado.



Figura 39. Gabinete metálico estanco para tablero eléctrico – Schneider.

Fuente: Imagen de referencia (uso ilustrativo).

Justificación de la selección:

- **Seguridad eléctrica:** La integración de los distintos dispositivos dentro de un tablero cerrado reduce el riesgo de contactos accidentales con partes energizadas.
- **Orden y claridad funcional:** La disposición organizada de los componentes facilita la comprensión del esquema eléctrico y su utilización con fines pedagógicos.
- **Facilidad de operación y mantenimiento:** El acceso frontal a los elementos de protección y mando permite realizar maniobras, inspecciones y verificaciones de manera simple y segura.
- **Adaptabilidad futura:** El tablero admite la incorporación de nuevos dispositivos o instrumentos eléctricos en etapas posteriores del proyecto, sin requerir modificaciones estructurales significativas.

Consideraciones de instalación:

- El tablero eléctrico deberá instalarse en una ubicación accesible, protegida de salpicaduras de agua y adecuadamente ventilada.

- Todos los componentes deberán estar correctamente identificados mediante rótulos normalizados, indicando de forma clara su función.
- Se deberá asegurar una correcta puesta a tierra del gabinete y de todas las masas metálicas accesibles del banco, conforme a las normas de seguridad eléctrica vigentes.
- El diseño del cableado interno deberá priorizar recorridos ordenados y seguros, utilizando canalizaciones y bornes adecuados que faciliten futuras intervenciones y tareas de mantenimiento.

2.5.6 Observaciones generales sobre la protección eléctrica

La protección eléctrica del banco de ensayos ha sido concebida de manera integral, priorizando la seguridad de las personas, la protección de la instalación y la confiabilidad del sistema. El esquema adoptado combina dispositivos de protección convencionales con electrónica de potencia, asegurando una actuación adecuada frente a distintas condiciones de falla y modos de operación.

El diseño contempla la existencia de dos circuitos eléctricos principales, correspondientes a la bomba centrífuga accionada mediante variador de frecuencia y a la bomba de vacío de funcionamiento independiente. Cada uno de estos circuitos cuenta con sus propios dispositivos de protección, lo que permite mejorar la selectividad del sistema y evitar desconexiones innecesarias ante fallas localizadas.

Cabe destacar que, en el presente diseño, no se incorpora un dispositivo guardamotor específico para la protección del motor eléctrico de la bomba centrífuga, ya que el motor es alimentado y controlado mediante un variador de frecuencia, el cual integra funciones avanzadas de protección frente a sobrecorriente, sobrecarga, sobretemperatura y condiciones anómalas de funcionamiento.

En sistemas de accionamiento mediante variador de frecuencia, la protección del motor se encuentra incorporada en el propio equipo electrónico, que permite ajustar los parámetros de corriente nominal, límites de torque y tiempos de actuación, brindando una protección más precisa y adecuada que la ofrecida por dispositivos electromecánicos tradicionales. La incorporación de un guardamotor aguas abajo del variador no resulta recomendable, ya que estos dispositivos están diseñados para operar con corrientes sinusoidales y podrían generar disparos intempestivos o interferencias al trabajar con señales moduladas en ancho de pulso (PWM) propias de los variadores de frecuencia.

Por este motivo, la protección del sistema se resuelve mediante la combinación de interruptores termomagnéticos y diferenciales independientes por circuito, encargados de

proteger la instalación eléctrica y a las personas, respectivamente, mientras que la protección específica del motor de la bomba centrífuga queda a cargo del variador de frecuencia. Esta configuración resulta habitual en sistemas modernos de accionamiento eléctrico y se considera adecuada para el funcionamiento seguro y confiable del banco de ensayos propuesto.

Finalmente, se priorizó un esquema de protección simple, claro y correctamente rotulado, que facilite la comprensión del funcionamiento eléctrico del banco por parte de los estudiantes, sin resignar niveles adecuados de seguridad ni robustez operativa, y manteniendo coherencia con los objetivos didácticos del proyecto.

2.5.7 Circuitos de comando y potencia del banco ensayos – Plano eléctrico

El sistema eléctrico del banco de ensayos se encuentra estructurado en dos subsistemas claramente diferenciados: el circuito de potencia, encargado de la alimentación y transferencia de energía hacia los equipos, y el circuito de comando, responsable de la lógica de control y operación del sistema. Esta separación permite un diseño más ordenado, seguro y didáctico, facilitando tanto la comprensión como el análisis del funcionamiento eléctrico del banco.

Circuito de potencia:

El circuito de potencia está constituido por los elementos encargados de suministrar energía a la bomba centrífuga y a la bomba de vacío, incluyendo los dispositivos de protección asociados. En el caso de la bomba centrífuga, la alimentación se realiza a través de un variador de frecuencia, el cual permite controlar la velocidad del motor y, por ende, el caudal del sistema. La energía eléctrica proveniente de la red es conducida hacia el variador mediante un interruptor termomagnético y un interruptor diferencial, garantizando la protección frente a sobrecorrientes y fallas a tierra.

El variador de frecuencia transforma la alimentación de red monofásica en una señal trifásica de frecuencia y tensión variables, adaptada a las condiciones de operación requeridas, y la suministra al motor de la bomba centrífuga. Este esquema permite no solo el control del punto de funcionamiento del sistema hidráulico, sino también la incorporación de funciones de protección específicas del motor, integradas en el propio equipo electrónico.

Por otro lado, la bomba de vacío es alimentada directamente desde la red eléctrica, disponiendo también de sus correspondientes dispositivos de protección, y de un elemento de maniobra que permite su accionamiento independiente. Esta configuración (Figura 40) responde a la necesidad de operar ambos equipos de manera autónoma, en función de los requerimientos del ensayo.

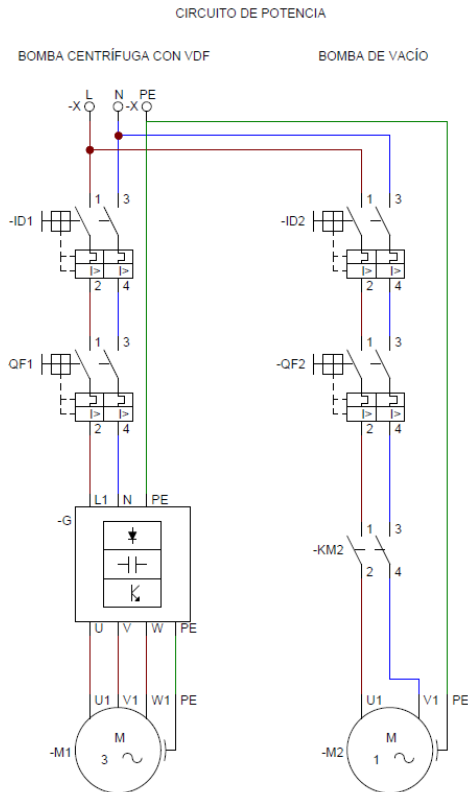


Figura 40. Circuito de potencia del banco de ensayos.

Fuente: Del autor.

Circuito de comando:

El circuito de comando está diseñado para gestionar la operación del sistema mediante una lógica de control simple y robusta, basada en pulsadores de marcha y parada independientes para cada uno de los equipos. Esta disposición permite al usuario accionar la bomba centrífuga y la bomba de vacío de manera individual, adaptando el funcionamiento del banco a las condiciones del ensayo.

El sistema incorpora una parada de emergencia general, que actúa sobre ambos circuitos, permitiendo la desconexión inmediata del sistema ante situaciones de riesgo. Esta característica constituye un elemento fundamental en términos de seguridad operativa.

Además, el circuito de comando contempla la interacción con el variador de frecuencia, permitiendo la transmisión de señales de control necesarias para la puesta en marcha y detención de la bomba centrífuga. Esta integración resulta esencial para lograr un control adecuado del sistema durante los ensayos.

Dicho circuito de comando puede observarse en la Figura 41.

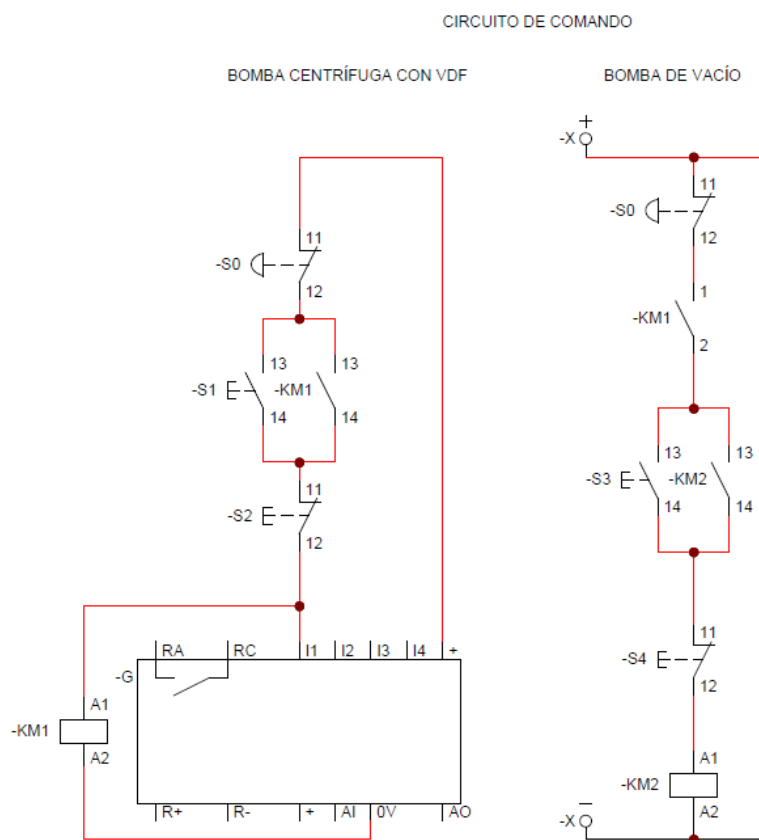


Figura 41. Circuito de comando del banco de ensayos.

Fuente: Del autor.

Plano eléctrico:

El plano eléctrico completo del banco de ensayos, que integra los circuitos de potencia y de comando previamente descritos, se presenta en el **Apéndice C** del presente trabajo. Este documento permite una visualización detallada de la totalidad del sistema eléctrico, su interconexión, y una lista de identificación y descripción de los principales componentes utilizados en el sistema, constituyendo un complemento técnico del desarrollo expuesto en esta sección.

CAPÍTULO 3: CONDICIONES DE SEGURIDAD OPERATIVA Y PREVENCIÓN DE RIESGOS

El diseño y la utilización de un banco de ensayos hidráulico implican no solo el cumplimiento de objetivos técnicos y pedagógicos, sino también la consideración de aspectos vinculados a la seguridad de los usuarios y a la prevención de incidentes. La manipulación de componentes eléctricos, el uso de bombas hidráulicas, la presencia de agua en circulación y la posibilidad de inducir cavitación de manera controlada generan un entorno que requiere previsión, controles adecuados y la adopción de buenas prácticas de laboratorio.

En este contexto, el presente capítulo expone las condiciones de seguridad operativa definidas para el banco de ensayos, incluyendo:

- Los riesgos potenciales identificados durante la etapa de diseño,
- Las medidas adoptadas para minimizar dichos riesgos, y
- Las recomendaciones para una operación segura del sistema.

El objetivo es garantizar un funcionamiento estable, controlado y seguro, tanto para los operadores como para la integridad del equipamiento, preservando a su vez el valor pedagógico del banco de ensayos.

3.1 Identificación de riesgos potenciales

Durante el diseño del banco de ensayos se identificaron diversos factores de riesgo que podrían comprometer la seguridad del usuario o del equipo en ausencia de medidas preventivas adecuadas. A continuación, se describen los principales riesgos, agrupados según su naturaleza:

a) Riesgos eléctricos

- Contacto directo o indirecto con componentes bajo tensión.
- Manipulación inadecuada del variador de frecuencia o del tablero eléctrico.
- Posibilidad de cortocircuitos asociados a la presencia de humedad en el entorno de trabajo.

b) Riesgos hidráulicos y mecánicos

- Fugas de agua originadas por fallas en las uniones o en los componentes del circuito.
- Sobrepresiones locales debidas a obstrucciones, maniobras incorrectas de válvulas o fallos de funcionamiento.

- Incremento de vibraciones y ruidos asociados al fenómeno de cavitación.
- Fallas estructurales del banco o de sus soportes por solicitaciones mecánicas excesivas.

c) Riesgos asociados a la cavitación inducida

- Daños en el impulsor de la bomba centrífuga como consecuencia de cavitación sostenida.
- Aumento significativo de vibraciones, ruidos y desequilibrios mecánicos.
- Alteraciones en el comportamiento hidráulico del sistema debido a la formación de burbujas de vapor.

Cabe señalar que la cavitación en el banco de ensayos puede presentarse de manera no deseada, constituyendo un riesgo operativo, o de forma controlada y deliberada como parte del ensayo experimental. Ambas situaciones requieren la aplicación de medidas de prevención específicas.

d) Riesgos operativos generales

- Manipulación incorrecta de válvulas, instrumentos de medición o elementos del circuito.
- Falta de capacitación del operador.
- Descuidos durante las tareas de montaje, desmontaje o mantenimiento del sistema.

3.2 Medidas de prevención y recomendaciones de seguridad

Con el fin de garantizar una operación segura del banco de ensayos, se establecen las siguientes medidas preventivas, organizadas de acuerdo con los riesgos identificados:

a) Seguridad eléctrica

- Utilizar un tablero eléctrico provisto de disyuntor diferencial y protección termomagnética adecuada a la alimentación monofásica del sistema, con correcta puesta a tierra.
- Proteger el variador de frecuencia de la humedad y ubicarlo de modo que se limite el acceso a sus componentes eléctricos, permitiendo al operador únicamente el uso de la interfaz de control para la variación de la velocidad del motor.
- Realizar todas las conexiones eléctricas conforme a la normativa vigente y por personal capacitado.

b) Seguridad hidráulica y mecánica

- Verificar la correcta ejecución de las uniones termofusionadas en la cañería de PEAD, asegurando la continuidad del material y la ausencia de fugas. En aquellos puntos donde se utilicen adaptadores o conexiones roscadas (por ejemplo, en instrumentación o accesorios), comprobar su correcta estanqueidad mediante sellado adecuado.
- Utilizar válvulas de seccionamiento que permitan aislar sectores del circuito para realizar tareas de mantenimiento de manera segura.
- Incorporar tramos de caño flexible en puntos específicos del sistema, con el objetivo de absorber vibraciones y facilitar el montaje y desmontaje del conjunto.
- Realizar inspecciones periódicas del estado de cañerías, soportes y accesorios, prestando especial atención a signos de fatiga o deterioro.

c) Operación bajo cavitación controlada

- Inducir cavitación únicamente bajo supervisión docente y con monitoreo en tiempo real del ANPA disponible, comparándolo con el valor requerido por la bomba (ver sección 2.3.8).
- Evitar tiempos prolongados de funcionamiento en condiciones de cavitación, a fin de prevenir daños en la bomba centrífuga.
- Controlar el nivel de vacío generado en el tanque mediante instrumentos de medición adecuados, evitando descensos excesivos de presión que puedan comprometer la integridad del sistema o la seguridad operativa.

d) Capacitación y señalización

- Capacitar previamente a los estudiantes sobre el funcionamiento del banco, los riesgos asociados y los procedimientos de operación segura.
- Señalizar de forma clara las zonas de riesgo y los componentes eléctricos del sistema.
- Establecer un protocolo de actuación ante fallas, fugas o situaciones anómalas durante los ensayos.

El correcto funcionamiento del banco de ensayos no depende únicamente de un diseño técnico eficiente, sino también de una operación segura y responsable. Las condiciones de seguridad abordadas en este capítulo permiten reducir los riesgos asociados a la manipulación eléctrica, las sobrepresiones, las vibraciones propias del fenómeno de cavitación y las tareas de mantenimiento.

La incorporación de estas medidas desde la etapa de diseño asegura no solo la integridad del equipo y la protección de los usuarios, sino también la continuidad del banco como herramienta pedagógica confiable. La supervisión docente, la señalización adecuada y la formación previa de los operadores resultan aspectos fundamentales para garantizar una experiencia de laboratorio segura, eficiente y formativa.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE COSTOS

4.1 Criterios de estimación y alcances

El presente análisis de costos tiene por objetivo estimar la inversión requerida para la construcción del banco de ensayos hidráulico propuesto, considerando todos los componentes necesarios para su funcionamiento, instrumentación, estructura y acondicionamiento general.

Los valores presentados se basan en presupuestos relevados en plataformas de venta online y proveedores locales de materiales e insumos industriales. Todos los precios están expresados en pesos argentinos y corresponden al momento de redacción de este trabajo.

Cabe destacar que los costos podrán sufrir variaciones dependiendo de la disponibilidad de materiales, la región de compra, y eventuales condiciones de compra institucional o mayorista. En consecuencia, el objetivo de este análisis no es presentar un presupuesto definitivo, sino dimensionar el orden de magnitud de la inversión necesaria, identificando los elementos más relevantes.

4.2 Componentes considerados

Tabla 10. Costos estimados de la instrumentación

A. Instrumentación			
Ítem	Cantidad	Precio unitario estimado [\$]	Precio total [\$]
Caudalímetro digital 1"	1	\$150.000	\$150.000
Manómetro analógico c/glicerina 1"	1	\$23.000	\$23.000
Vacuómetro analógico c/glicerina 1"	2	\$37.000	\$74.000
Termómetro bimetálico	1	\$35.000	\$35.000
Subtotal A			\$245.000

Tabla 11. Costos estimados de los componentes del sistema hidráulico

B. Sistema hidráulico (Bomba, cañerías, válvulas y accesorios)			
Ítem	Cantidad	Precio unitario estimado [\$]	Precio total [\$]
Bomba centrífuga BC 100 T	1	\$200.000	\$200.000
Caño PEAD PN16 1"	15 m	\$3.000	\$45.000
Válvula de globo 1"	1	\$190.000	\$190.000
Válvula de compuerta 1"	1	\$60.000	\$60.000
Manguera de goma (flexible)	30 cm	\$5000	\$1.500
Subtotal B			\$496.500

Tabla 12. Costos estimados de los componentes del tablero eléctrico

C. Equipamiento eléctrico y de accionamiento del banco de ensayos			
Ítem	Cantidad	Precio unitario estimado [\$]	Precio total [\$]
Variador de frecuencia monofásico-trifásico (GK100 o equivalente)	1	\$-	\$-
Bomba de vacío CZERVENY – línea DOSIVAC, tipo 48MC4RB, 220 V monofásica, motor 1/4 CV	1	\$-	\$-
Interruptor termomagnético bipolar 16 A – Curva C (circuito bomba centrífuga)	1	\$26.000	\$26.000
Interruptor termomagnético bipolar 6 A – Curva C (circuito bomba de vacío)	1	\$23000	\$23000
Interruptor diferencial bipolar 30 mA – 25 A (1 por circuito)	2	\$80.000	\$160.000
Par de pulsadores de mando (marcha/parada) (1 por equipo)	2	\$100.000	\$200.000
Pulsador de parada de emergencia	1	\$35.000	\$35.000
Gabinete metálico estanco para tablero eléctrico (IP65 o superior)	1	\$135.000	\$135.000
Subtotal C			\$579.000

Tabla 13. Costos estimados de materiales auxiliares y accesorios

D. Misceláneos y conexiones menores			
Ítem	Cantidad	Precio unitario estimado [\$]	Precio total [\$]
Abrazaderas / soportes de cañerías	1	\$10.000	\$10.000
Llave de aguja ¼" para instrumentación (aislar vacuómetros)	2	\$6.000	\$12.000
Subtotal D			\$22.000

Tabla 14. Costos estimados del tanque y estructura metálica

E. Soporte estructural y tanque			
Ítem	Cantidad	Precio unitario estimado [\$]	Precio total [\$]
Tanque metálico reacondicionado	1	\$-	\$-
Reacondicionamiento del tanque (soldadura, limpieza, tapa, hermeticidad)	1	\$50.000	\$50.000
Perfil estructural 20x20 6m	4	\$11.500	\$46.000

Tornillería y anclajes	1	\$20.000	\$20.000
Pintura antióxido / terminación	1	\$35.000	\$35.000
Subtotal E			\$151.000

Tabla 15. Costos estimados totales

Presupuesto total	
A. Instrumentación	\$245.000
B. Sistema hidráulico	\$496.500
C. Equipamiento eléctrico y de accionamiento del banco de ensayos	\$579.000
D. Misceláneos y conexiones menores	\$22.000
E. Soporte estructural y tanque	\$151.000
TOTAL	\$1.493.500

El análisis de costos presentado permite dimensionar económicamente la construcción del banco de ensayos, brindando una estimación clara de los materiales, instrumentos y dispositivos requeridos. El costo total estimado del proyecto asciende a aproximadamente **\$1.493.500 ARS**, valor que representa el orden de magnitud necesario para su implementación. Si bien los precios pueden variar levemente en función de la disponibilidad en el mercado y de las condiciones económicas del contexto, se considera adecuado contemplar un margen adicional del orden del **10% al 15%** destinado a imprevistos, gastos indirectos o variaciones de precios. Aun bajo estas consideraciones, se concluye que el diseño propuesto resulta técnica y económicamente viable dentro del contexto institucional. Esta planificación económica constituye un paso fundamental para la futura ejecución del proyecto y para su posible financiación parcial por parte de terceros.

CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

5.1 Consideraciones generales

El diseño y construcción de un banco de ensayos hidráulicos, aun cuando se desarrolla en un entorno académico y didáctico, no está exento de generar impactos ambientales. Estos impactos pueden estar asociados a la selección de materiales, al consumo energético requerido para su funcionamiento y al manejo de los residuos generados tanto durante la etapa de montaje como en su operación habitual.

El presente proyecto fue concebido bajo una filosofía de diseño racional y sostenible, priorizando la reutilización de componentes existentes siempre que fue posible, optimizando el consumo energético y seleccionando materiales de menor impacto ambiental considerando disponibilidad local y capacidad de reciclaje. Asimismo, el banco funcionará con agua en circuito cerrado, evitando consumos excesivos del recurso hídrico y minimizando la generación de efluentes hacia el ambiente.

A continuación, se analiza el impacto ambiental potencial del sistema, dividiendo los factores según las distintas etapas de vida del banco (construcción, operación y fin de vida útil), con el objetivo de identificar los aspectos relevantes y proponer estrategias de mitigación si fueran necesarias.

5.2 Análisis por aspectos ambientales

a) Uso de materiales

El banco ha sido diseñado priorizando el uso de cañerías y accesorios de polietileno de alta densidad (PEAD) PN16, en reemplazo de materiales plásticos menos resistentes o de metales más costosos en términos ambientales y energéticos. El PEAD se caracteriza por su alta durabilidad, facilidad de reciclaje y confiabilidad en uniones por termofusión, lo que reduce pérdidas y fugas. Además, se incorporó un tanque metálico hermético reacondicionado (proveniente de un sistema ablandador en desuso), lo que permite extender la vida útil de un componente existente y disminuir la necesidad de fabricar un componente nuevo, evitando la generación de residuos metálicos. Esta decisión también responde a criterios económicos y de disponibilidad, integrando criterios de sostenibilidad desde el diseño.

b) Energía eléctrica

El banco requiere energía eléctrica para el funcionamiento de dos equipos principales:

- La **bomba centrífuga de 1 HP (0,75 kW)** destinada a los ensayos.
- La **bomba de vacío**, de potencia reducida, necesaria para inducir cavitación en condiciones controladas.

Ambos equipos se integran en un tablero eléctrico que incluye un variador de frecuencia, que permite optimizar el funcionamiento, reduciendo picos de consumo innecesarios. Asimismo, la elección de una bomba de baja potencia responde a un criterio didáctico y de bajo consumo, reduciendo el impacto ambiental por uso energético.

c) Uso del agua

El sistema funciona en recirculación cerrada, por lo que el agua se reutiliza indefinidamente en los distintos ensayos. De este modo, se evita el vertido de efluentes al ambiente y se minimiza la extracción de recurso hídrico. Sólo será necesaria una reposición ocasional por evaporación o durante purgas de mantenimiento o limpieza. Esta característica convierte al banco en un equipo de bajo impacto hídrico y plenamente compatible con prácticas de sostenibilidad en laboratorios académicos.

d) Generación de residuos

Durante la construcción del banco se espera una generación limitada de residuos sólidos, principalmente restos de caños de PEAD, empaques de accesorios y material metálico proveniente del reacondicionamiento del tanque.

En operación habitual, el sistema no genera residuos contaminantes ni efluentes líquidos. Únicamente se contemplan residuos menores derivados de tareas de mantenimiento preventivo (ej. purga de limpieza del tanque, reemplazo de juntas u O-rings). En todos los casos, se prevé un manejo adecuado que incluye la segregación de materiales reciclables y la disposición segura de los no reciclables.

e) Emisiones y ruidos

El banco no genera emisiones gaseosas de ningún tipo, ya que trabaja únicamente con agua como fluido de ensayo, y, además, el sistema no incluye motores de combustión ni procesos químicos. En cuanto al ruido, el nivel sonoro proviene del funcionamiento de la bomba centrífuga y, en menor medida, de la bomba de vacío. Ambos equipos son de baja potencia y estarán

instalados en un ambiente controlado, por lo que el impacto acústico se considera moderado y aceptable para un entorno de laboratorio académico.

Consideraciones al final de la vida útil del banco

Aunque el banco de ensayos ha sido concebido para una larga vida útil, resulta necesario contemplar su impacto ambiental una vez concluido su ciclo operativo. En esta etapa, los principales aspectos a evaluar son la disposición final de los materiales, la posibilidad de reutilización de componentes y el tratamiento adecuado de los residuos.

Dado que la mayoría de las partes del sistema —como cañerías y accesorios de PEAD, válvulas, instrumentos y estructura metálica— son desmontables, se favorece su reutilización parcial en futuros montajes, prácticas didácticas o incluso en otros equipos de laboratorio. Aquellos elementos que no puedan reutilizarse (caños dañados, instrumentos fuera de servicio o componentes eléctricos obsoletos) deberán ser descartados según las normativas locales de gestión de residuos sólidos urbanos y peligrosos. Se recomienda clasificar los residuos por tipo (plásticos, metales, componentes eléctricos/electrónicos) y derivarlos a programas de reciclaje o tratamiento autorizado.

El tanque metálico reacondicionado, debido a su robustez, puede destinarse a otros usos dentro de la facultad, prolongando así su ciclo de vida. La bomba centrífuga y la bomba de vacío, al contener partes metálicas y bobinados eléctricos, deben gestionarse como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), sujetos a normativas específicas de disposición y reciclado. En este sentido, al finalizar su vida útil, se recomienda que el banco sea desarmado de forma controlada, promoviendo la separación de materiales valorizables y evitando su disposición conjunta con residuos urbanos.

Aunque el volumen total de residuos generados por este equipo es acotado, la aplicación de buenas prácticas de gestión al cierre de su ciclo de vida contribuye al compromiso ambiental institucional y a la formación integral de los estudiantes en términos de sustentabilidad.

5.3 Conclusión del análisis de impacto ambiental

El diseño y construcción del banco de ensayos fue abordado considerando activamente su impacto ambiental, tanto en la etapa de implementación como en su posterior uso. La reutilización de componentes, el uso de materiales de bajo impacto como el PEAD, la integración de un tanque metálico reacondicionado, el sistema de recirculación de agua y el consumo energético reducido de las bombas lo convierten en un proyecto alineado con criterios de sostenibilidad. Además, al tratarse de una herramienta educativa, este banco permite transmitir

a los estudiantes la importancia de integrar la conciencia ambiental en los proyectos de ingeniería, fomentando una visión integral, responsable y comprometida con la sociedad y el entorno.

CAPÍTULO 6: APLICACIÓN PEDAGÓGICA Y GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS

El objetivo principal del banco no es únicamente su construcción como sistema funcional, sino su integración efectiva como herramienta didáctica dentro de las asignaturas relacionadas con la Mecánica de los Fluidos y las Máquinas Hidráulicas.

A través de distintos ensayos y experiencias, los estudiantes podrán interactuar con un sistema real, relevar variables, trazar curvas características y estudiar fenómenos como la cavitación. Todo ello permite consolidar aprendizajes teóricos mediante la práctica experimental, promoviendo una comprensión profunda de los principios hidráulicos.

En esta sección se presentan los ensayos planificados, las variables medibles, los tipos de experiencias a realizar y las curvas que se podrán construir. Finalmente, se incluye una guía de trabajos prácticos diseñada específicamente para este banco, la cual se propone como recurso pedagógico adaptable a distintos niveles y objetivos académicos.

6.1 Planificación de los ensayos y curvas características

Una vez desarrollado el diseño hidráulico del banco de ensayos y definidos los instrumentos de medición, es posible planificar una serie de actividades prácticas orientadas a la comprensión del comportamiento de las bombas centrífugas bajo diferentes condiciones de operación.

El banco permitirá a los estudiantes relevar datos reales de funcionamiento, identificar fenómenos clave como la cavitación, y construir curvas características reales. De esta manera, se busca no solo consolidar los conocimientos teóricos sobre máquinas hidráulicas, sino también desarrollar competencias prácticas en la medición, análisis e interpretación de variables hidráulicas.

6.1.1 Objetivos de los ensayos

Los ensayos a realizar con el banco propuesto tienen por finalidad:

- **Analizar el comportamiento hidráulico de una bomba centrífuga** en condiciones normales de operación, registrando presiones, caudales y variaciones asociadas a la velocidad de rotación.

- **Observar y estudiar el fenómeno de cavitación inducida**, mediante la reducción controlada de la presión absoluta en el tanque hermético con la ayuda de la bomba de vacío, identificando su inicio y efectos sobre el rendimiento de la bomba.
- **Relevar datos experimentales que permitan trazar curvas características reales** de la bomba, como la relación entre altura manométrica y caudal (curva H-Q), curva de potencia, rendimiento hidráulico y curva del ANPA disponible en distintas condiciones de succión.
- **Desarrollar habilidades experimentales** en los estudiantes, tales como: la toma ordenada de datos, análisis de variables hidráulicas, interpretación de resultados y utilización de instrumentos de medición.
- **Fomentar el pensamiento crítico y la comprensión profunda de conceptos** como pérdidas de carga, rendimiento hidráulico, régimen de aspiración, punto de diseño y operación fuera de condiciones ideales.

6.1.2 Variables que se pueden medir

El banco de ensayos diseñado permite la medición de una serie de variables hidráulicas fundamentales para el análisis del comportamiento de las bombas centrífugas bajo diferentes condiciones de operación.

Las principales variables que se podrán medir son:

- **Caudal (Q):** Medido mediante el caudalímetro digital instalado en la línea de descarga, permite determinar el volumen de fluido circulante por unidad de tiempo.
- **Presión de descarga (P_d):** Registrada con el manómetro instalado en la salida de la bomba, será utilizada para calcular la altura manométrica generada y para construir la curva H-Q.
- **Presión en el tanque (P_A), y de succión (P_{suc}):** Medidas con dos vacuómetros (uno en el tanque hermético y otro en la línea de succión de la bomba). El valor de P_A se utiliza para el cálculo del ANPA disponible, mientras que P_{suc} se emplea como referencia experimental para comparar con los resultados teóricos y evaluar el efecto del vacío aplicado.

- **Temperatura del fluido (t):** Monitoreada con el termómetro de inmersión, necesaria para relacionar la presión de vapor del agua con las condiciones de cavitación.
- **Velocidad de rotación del motor (n):** Controlada mediante el variador de frecuencia, y estimada indirectamente a través del porcentaje de frecuencia aplicado, permite realizar ensayos a diferentes puntos de operación de la bomba.

Estas mediciones, tomadas en conjunto, permiten construir curvas características experimentales, analizar la eficiencia hidráulica, determinar el punto de operación óptimo de la bomba y estudiar los efectos de la cavitación en condiciones controladas.

6.1.3 Tipos de ensayos a realizar

El banco de ensayos permitirá la realización de diversas experiencias prácticas, orientadas a la observación, análisis y comprensión del comportamiento hidráulico de bombas centrífugas en diferentes condiciones de operación.

Los principales tipos de ensayos que se podrán llevar a cabo son:

Ensayo de funcionamiento normal de la bomba (realizado con la bomba de vacío inactiva):

- Medición del caudal, presión en el tanque, presión de succión, presión de descarga, temperatura del fluido y velocidad de rotación del motor en condiciones normales de operación.
- Verificación de la curva característica de la bomba (altura manométrica H vs caudal Q) en su régimen de diseño y en regímenes parciales, utilizando el variador de frecuencia para explorar diferentes puntos de operación.
- Evaluación del comportamiento hidráulico en función de variaciones en la apertura de válvulas o la velocidad del motor.

Ensayo de cavitación inducida:

- Reducción progresiva del ANPA disponible mediante la disminución controlada de la presión absoluta en el tanque hermético utilizando la bomba de vacío.
- Observación de los efectos de la cavitación: incremento de vibraciones y ruidos, reducción del caudal y caída de rendimiento hidráulico.

- Comparación de las lecturas de presiones, tanto en el tanque (P_A) como en la succión de la bomba (P_{suc}), para correlacionar la condición de cavitación con los valores de ANPA disponibles calculados.
- Determinación del ANPA crítico para la bomba seleccionada.

6.1.4 Aplicación didáctica de los ensayos

Uno de los principales objetivos del banco de ensayos diseñado es su utilización como herramienta didáctica en el contexto de las asignaturas vinculadas a la mecánica de los fluidos y a las máquinas hidráulicas. La posibilidad de observar directamente fenómenos como la cavitación, o de relevar experimentalmente curvas de funcionamiento reales, brinda un complemento invaluable a los contenidos teóricos desarrollados en clase.

A través de la realización de los distintos ensayos propuestos, los estudiantes podrán:

- Aplicar los conceptos aprendidos sobre caudal, presión, altura manométrica, pérdidas de carga y rendimiento.
- Medir y registrar variables reales con instrumental técnico, interpretando su relación con el comportamiento de la bomba.
- Analizar el fenómeno de cavitación a partir de condiciones de ANPA reducida, comprendiendo sus causas, efectos y métodos de prevención.
- Trazar curvas características y comparar los resultados obtenidos con las curvas teóricas provistas por el fabricante.
- Adquirir criterios de análisis, diagnóstico y evaluación de equipos hidráulicos en funcionamiento.

El banco permite también el planteo de consignas específicas dentro de guías de trabajos prácticos, tales como:

- Determinar el punto de máximo rendimiento de la bomba.
- Evaluar experimentalmente cómo afectan los distintos elementos del circuito (válvulas, accesorios, variación de la presión en el tanque) al valor del ANPA disponible.

De esta forma, el banco no solo cumple una función experimental, sino que se convierte en una plataforma versátil de aprendizaje activo, promoviendo la participación, el razonamiento técnico y el desarrollo de habilidades prácticas en el ámbito de la ingeniería.

A partir de las mediciones que permite realizar el banco y de los distintos ensayos propuestos, es posible construir un conjunto de curvas y análisis que acercan a los estudiantes a la realidad operativa de las bombas centrífugas. La planificación experimental desarrollada considera tanto el funcionamiento normal como el comportamiento en condiciones críticas, incluyendo la cavitación, lo cual permite ampliar el espectro de aprendizajes posibles.

La posibilidad de relacionar conceptos teóricos con datos experimentales reales, interpretando sus causas y consecuencias, convierte al banco de ensayos en una herramienta pedagógica de gran valor. Su diseño flexible y su instrumentación accesible lo hacen especialmente apto para su integración en prácticas de laboratorio, guiadas por objetivos didácticos claros y adaptables al nivel de los estudiantes.

6.2 Guía teórico - práctica

6.2.1 Introducción a la guía didáctica

Como complemento del diseño y construcción del banco de ensayos, se propone una **Guía teórico – práctica** tentativa para el Laboratorio de mecánica de los fluidos de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la ciudad de Villa Mercedes, San Luis, específicamente para las carreras de Ingeniería Electromecánica e Ingeniería Mecatrónica, en las asignaturas de Mecánica de los fluidos y/o Máquinas Hidráulicas, con el objetivo de facilitar la comprensión de los principios hidráulicos vinculados al funcionamiento de bombas centrífugas, las curvas características de operación y el fenómeno de cavitación.

La guía de trabajos prácticos fue estructurada con un enfoque pedagógico progresivo, orientado a integrar fundamentos teóricos, análisis experimental e interpretación técnica de resultados. Su organización busca acompañar al estudiante desde la comprensión conceptual inicial hasta el análisis global del comportamiento del sistema de bombeo frente al fenómeno de cavitación. Para ello, la guía se compone de cuatro partes principales:

1. **Marco teórico de apoyo:** Reúne los conceptos fundamentales necesarios para el desarrollo de las actividades experimentales, incluyendo nociones sobre máquinas de fluidos, bombas rotodinámicas, curvas características, pérdidas de carga, cavitación y Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA). Su función no es reemplazar la bibliografía

específica de la asignatura, sino ofrecer al estudiante una base conceptual ordenada y directamente vinculada con los ensayos a realizar en el banco.

2. **Preguntas de repaso teórico-conceptual:** Están orientadas a que el estudiante recupere, relacione y afiance los fundamentos necesarios para abordar el trabajo experimental. No apuntan a respuestas memorísticas ni textuales, sino al razonamiento técnico, la interpretación física de los fenómenos y la articulación con la bibliografía de referencia.
3. **Ejercicios prácticos progresivos:** Se presentan en orden creciente de complejidad y permiten aplicar los conceptos teóricos a situaciones reales del banco de ensayos. Incluyen la determinación experimental de variables hidráulicas, el cálculo de altura manométrica, pérdidas de carga en la línea de succión, ANPA disponible y el análisis de condiciones de cavitación, promoviendo la interpretación de mediciones y la construcción de curvas características del sistema.
4. **Ejercicio integrador final:** Propone un análisis global del funcionamiento del banco de cavitación, requiriendo que el estudiante articule los conocimientos y procedimientos desarrollados en las etapas anteriores. En esta instancia se busca que el alumno interprete cómo las distintas condiciones hidráulicas del sistema modifican el ANPA disponible y el nivel de vacío necesario para inducir cavitación, compare los resultados experimentales con las estimaciones teóricas obtenidas mediante la planilla de cálculo desarrollada para el banco, y formule conclusiones técnicas junto con posibles propuestas de mejora del equipo.

6.2.2 Contenido y estructura de la guía

En esta sección se presenta una guía estructurada en tres bloques: preguntas teóricas, ejercicios prácticos progresivos y un ejercicio integrador. El objetivo es que los estudiantes puedan aplicar, razonar y conectar los conceptos abordados en clase con la práctica experimental.

La guía completa se incluye como **Apéndice B** para facilitar su implementación directa en laboratorio.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió desarrollar el diseño teórico de un banco de ensayos para bombas centrífugas, concebido para operar tanto en condiciones normales como en régimen de cavitación inducida. A partir del análisis realizado, se concluye que es posible reproducir y controlar el fenómeno de cavitación mediante la reducción de la presión en el tanque de alimentación, actuando directamente sobre el valor del ANPA disponible del sistema.

El diseño adoptado, basado en la aplicación de vacío mediante un tanque hermético, constituye una solución eficaz para inducir cavitación de manera controlada y reproducible. Se destaca que este método permite modificar el ANPA disponible sin alterar significativamente el punto de operación hidráulico de la bomba, lo que representa una ventaja frente a otras estrategias, ya que posibilita analizar el fenómeno manteniendo prácticamente constantes el caudal y la altura manométrica. Asimismo, la incorporación de una válvula en la línea de succión permite introducir variaciones adicionales en las pérdidas de carga, ampliando las posibilidades de análisis del sistema.

Desde el punto de vista experimental, el banco de ensayos permite medir variables hidráulicas fundamentales, como presiones, caudal y temperatura, a partir de las cuales es posible determinar empíricamente las pérdidas de carga, el ANPA disponible y el ANPA requerido. Esto permite validar los resultados obtenidos en el análisis teórico y evaluar el comportamiento real del sistema en todo el rango operativo de la bomba.

En el plano académico, el banco se constituye como una herramienta de alto valor didáctico, ya que no solo permite reproducir el fenómeno de cavitación, sino también analizar la interacción entre la bomba y el sistema hidráulico en distintas condiciones de operación. La guía de trabajos prácticos asociada al banco favorece la integración entre teoría y experimentación, promoviendo el aprendizaje activo y el desarrollo de habilidades en la interpretación de resultados experimentales.

El desarrollo del proyecto también permitió identificar diversas limitaciones asociadas a su implementación en un contexto real. Entre ellas se destacan las restricciones de espacio físico, las limitaciones presupuestarias y la ausencia de red eléctrica trifásica en el lugar de instalación. Estas condiciones implicaron la adopción de soluciones técnicas específicas, como la reutilización de un tanque metálico existente y la incorporación de un variador de frecuencia para la alimentación del motor, evidenciando la necesidad de adaptar el diseño a las condiciones reales de disponibilidad de recursos sin comprometer la funcionalidad del sistema.

Finalmente, el proyecto deja abiertas diversas líneas de mejora y desarrollo futuro. Entre ellas se destacan la posible incorporación de sistemas de instrumentación digital para la adquisición automática de datos, la integración de sensores conectados a interfaces de monitoreo en tiempo real y la optimización estructural del banco para su instalación definitiva en un laboratorio específico. Estas mejoras permitirían ampliar las capacidades experimentales del sistema y profundizar el estudio del comportamiento hidráulico de bombas centrífugas y del fenómeno de cavitación en un entorno académico.

GLOSARIO

Altura manométrica: Energía por unidad de peso que la bomba entrega al fluido, expresada en metros de columna de agua, equivalente a la diferencia de energía total entre la descarga y la succión de la bomba.

ANPA (Altura Neta Positiva de Aspiración): Diferencia entre la presión absoluta del fluido en la entrada de la bomba y la presión de vapor correspondiente a la temperatura de operación, expresada en metros de columna de agua. Su valor determina la condición de funcionamiento sin cavitación del sistema.

ANPA disponible ($ANPA_{disp}$): Valor de ANPA efectivamente presente en la instalación, determinado por las condiciones del sistema hidráulico, la presión en el tanque, la geometría de la succión y las pérdidas de carga.

ANPA requerido ($ANPA_{req}$): Valor mínimo de ANPA especificado por el fabricante para una bomba determinada, necesario para evitar la aparición de cavitación en condiciones normales de funcionamiento.

Banco de ensayos: Instalación experimental diseñada para el análisis y la medición del comportamiento de equipos hidráulicos bajo condiciones controladas, permitiendo la observación de variables reales de funcionamiento.

Bomba centrífuga: Máquina hidráulica rotodinámica que transfiere energía al fluido mediante la acción de un rodete en rotación, transformando energía mecánica en energía hidráulica.

Bomba de vacío: Equipo destinado a reducir la presión absoluta de un recinto cerrado, utilizado en el banco de ensayos para disminuir la presión sobre la superficie libre del fluido y controlar el ANPA disponible.

Caudal (Q): Volumen de fluido que circula por una sección del sistema por unidad de tiempo, generalmente expresado en metros cúbicos por hora (m^3/h) o litros por segundo (L/s).

Caudalímetro: Instrumento de medición utilizado para determinar el caudal de fluido que circula por una cañería del sistema, permitiendo la lectura directa del caudal instantáneo durante el funcionamiento del banco de ensayos.

Cavitación: Fenómeno hidráulico caracterizado por la formación y colapso de burbujas de vapor en el interior del fluido cuando la presión local desciende por debajo de la presión de vapor, generando ruido, vibraciones y daños mecánicos.

Coefficiente de caudal (K_v): Parámetro característico de válvulas de control que relaciona el caudal que atraviesa la válvula con la caída de presión generada. Se define como el caudal

volumétrico de agua a 20 °C, expresado en m³/h, que produce una caída de presión de 1 bar a través de la válvula completamente abierta.

Coeficiente de pérdida localizada (ζ): Parámetro adimensional que representa la pérdida de energía generada por accesorios o cambios de geometría en un sistema hidráulico, tales como válvulas, codos, entradas o reducciones. Se utiliza para calcular las pérdidas de carga localizadas.

Curva característica H–Q: Representación gráfica de la relación entre la altura manométrica generada por una bomba y el caudal suministrado, para una velocidad de rotación determinada.

Instrumentación: Conjunto de dispositivos destinados a la medición de variables hidráulicas y operativas del sistema, tales como presión, caudal y temperatura.

Manómetro: Instrumento de medición utilizado para determinar la presión del fluido en un punto del sistema, generalmente referido a la presión atmosférica.

PEAD (Polietileno de Alta Densidad): Material termoplástico utilizado en cañerías hidráulicas, caracterizado por su resistencia mecánica, química y la posibilidad de realizar uniones por termofusión.

Pérdidas de carga: Disminución de energía del fluido debida al rozamiento en cañerías (pérdidas distribuidas) y al paso por accesorios como válvulas y codos (pérdidas localizadas).

Presión de vapor: Presión a la cual un fluido comienza a cambiar de fase líquida a vapor a una temperatura determinada.

Tanque hermético: Recipiente cerrado diseñado para operar a presiones inferiores a la atmosférica, utilizado en el banco de ensayos para controlar las condiciones de succión de la bomba.

Vacuómetro: Instrumento de medición destinado a registrar presiones inferiores a la atmosférica, empleado para monitorear la presión en el tanque y en la succión de la bomba.

VDF (Variador de Frecuencia): Dispositivo electrónico que permite regular la velocidad de rotación del motor eléctrico mediante el control de la frecuencia de alimentación, posibilitando el análisis del comportamiento de la bomba a distintos regímenes de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Mataix, Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, Madrid: Ediciones del Castillo, 1976.
- [2] R. W. Fox, Introducción a la mecánica de los fluidos, México: McGraw-Hill, 1995.
- [3] R. L. Mott, Mecánica de fluidos, Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [4] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, México: McGraw-Hill Interamericana, 2009.
- [5] Crane Co., «Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe,» Crane Co., 2009.
- [6] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), «Cavitación y erosión en bombas centrífugas,» CONUEE.
- [7] Interempresas Media S.L., «Interempresas Media, S.L.,» Interempresas, [En línea]. Available: https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/34521-Cavitacion-en-el-bombeo-de-fluidos.html. [Último acceso: 18 Marzo 2026].
- [8] «Fluid Mechanics – Basic of Fluid Mechanics,» SlideShare, [En línea]. Available: https://es.slideshare.net/slideshow/001-fluid_mechanics-pptx-basic-of-fluid-mechnanics/272147979. [Último acceso: 18 Febrero 2026].
- [9] L. E. Díaz F., Y. Mustafá I. y L. G. Ríos A., «Construcción y puesta en marcha de un banco de cavitación para bombas centrífugas pequeñas,» *Scientia et Technica*, vol. XII, nº 30, pp. 125-130, 2006.
- [10] D. D. Camargo Martin y C. J. Arévalo Carvajal, «Máquinas hidráulicas,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., 2016.
- [11] Motorarg S.A., «Ficha técnica: Línea BC – Bombas centrífugas,» Motorarg, [En línea]. Available: <https://www.motorarg.com.ar/download/linea-bc-ficha/>. [Último acceso: 11 Octubre 2025].
- [12] Electromecánica MM S.R.L, «Bombas de vacío Dosivac,» Electromecánica MM, [En línea]. Available: <https://www.electromecanicamm.com.ar/imagenes/archivos/20150716093042.pdf>. [Último acceso: 11 Octubre 2025].

- [13] Bricomark, «Tubo PEAD hidráulico liso,» Bricomark, [En línea]. Available: <https://bricomark.mx/producto/tubo-pead-hidraulico-liso-1-rollo-de-100-metros/>. [Último acceso: 19 marzo 2026].
- [14] Tigre Argentina S.A., «PEAD: Polietileno de alta densidad,» [En línea]. [Último acceso: 16 Noviembre 2025].
- [15] Genebre S.A., «Válvula de globo con fuelle – Ficha técnica modelo 2231,» Genebre.
- [16] H. Institute, «ANSI/HI 14.6 – Rotodynamic Pumps for Hydraulic Performance Acceptance Tests,» Hydraulic Institute, Parsippany, NJ, 2011.
- [17] Patagonia Tools, «Caudalímetro cuenta-litros – sensor de flujo para líquidos. Ficha técnica y especificaciones generales,» Patagonia Tools, [En línea]. Available: <https://patagoniatools.com.ar/productos/refinerias-oil-gas/caudalimetros/caudalimetro-cuenta-litros-sensor-flujo-3-pulgadas-fluidos-0-6-mpa-zhizhou/>. [Último acceso: 09 Febrero 2026].
- [18] WIKA Instrument Corporation, «Manómetro con relleno de glicerina modelo 213.53 – Ficha técnica,» WIKA, [En línea]. Available: https://www.wika.com/es-es/213_53.WIKA. [Último acceso: 09 Febrero 2026].
- [19] WIKA Instrument Corporation, «Manómetro de vacío con relleno de glicerina modelo 213.53 – Ficha técnica,» WIKA, [En línea]. Available: https://www.wika.com/es-es/213_53.WIKA. [Último acceso: 09 Febrero 2026].
- [20] WIKA Instrument Corporation, «Termómetro bimetalico industrial, serie A50/A52 – Ficha técnica,» WIKA, [En línea]. Available: https://www.wika.com/es-es/a52_r52.WIKA. [Último acceso: 09 Febrero 2026].
- [21] Schneider Electric, «Interruptor diferencial Acti9 iID – Ficha técnica y características,» Schneider Electric, [En línea]. Available: <https://www.se.com/ar/es/product/A9R91225/>. [Último acceso: 09 Febrero 2026].
- [22] Schneider Electric, «Manual de usuario traducido – Variador de frecuencia serie GK100 (o equivalente),» Schneider Electric.
- [23] Schneider Electric, «Pulsadores y dispositivos de mando Harmony XB5 – Pulsador rasante verde (1NA),» Schneider Electric, [En línea]. Available: <https://www.se.com/ar/es/product/XB4BA31/>. [Último acceso: 09 Febrero 2026].

- [24] Schneider Electric, «Pulsadores y dispositivos de mando Harmony XB5 – Pulsador rasante rojo (1NC),» Schneider Electric, [En línea]. Available: <https://www.se.com/ar/es/product/XB4BA42/>. [Último acceso: 09 Febrero 2026].
- [25] Schneider Electric, «Pulsadores y dispositivos de mando Harmony XB5 – Parada de emergencia,» Schneider Electric, [En línea]. Available: <https://www.se.com/ar/es/product/XB7NS8442/>.
- [26] Schneider Electric, «Gabinete metálico estanco PanelSeT CRN – Envolverte de acero para tableros eléctricos. Ficha técnica,» Schneider Electric, [En línea]. Available: <https://www.se.com/ar/es/product/NSYCRN86400/>. [Último acceso: 09 Febrero 2026].

APÉNDICES

Apéndice A – Planilla del modelo de cálculo paramétrico

COMPARACIÓN ENTRA ANPA _{DISP} SIN VACÍO, ANPA _{DISP} CON VACÍO Y ANPA _{REQ}				
P _t	23844,64 Pa			
Q [m ³ /h]	ANPA _{req}	ANPA _{disp} SV	ANPA _{disp} CV	ΔANPA
5,6	0,637	5,044	-2,265	-2,902
5,45	0,626	5,356	-1,953	-2,579
5,3	0,614	5,660	-1,649	-2,264
5,1	0,599	6,052	-1,257	-1,856
4,95	0,587	6,336	-0,973	-1,560
4,75	0,571	6,702	-0,607	-1,178
4,55	0,555	7,053	-0,256	-0,810
4,25	0,530	7,552	0,243	-0,287
3,95	0,505	8,018	0,709	0,204
3,5	0,466	8,654	1,345	0,879
2,9	0,411	9,384	2,075	1,664
2,1	0,331	10,148	2,839	2,508
1,2	0,228	10,721	3,412	3,184
0,5	0,127	10,955	3,646	3,519

ANPA DISPONIBLE (CON Y SIN VACÍO) Y ANPA REQUERIDO

CAUDAL

— ANPA_{req} — ANPA_{disp} SV — ANPA_{disp} CV

% VACÍO APLICADO	75 %
Condición	
Sin riesgo	0 ≤ %V < 46
Bajo/Moderado riesgo	46 ≤ %V < 59
Moderado/Alto riesgo	59 ≤ %V < 77
Máximo riesgo	77 ≤ %V ≤ 90

% APERTURA válvula globo	ζ valv de globo
100	10,0

CAUDAL DE INICIO DE CAVITACIÓN	4,07
--------------------------------	------

Q objetivo	1,9
% VACÍO NECESARIO	102,29

Tabla para calcular %V(Qobj)	
Patm	95378,56
Pt	23844,64
Índice tramo	12
Interpolación	0,308
ANPA _{disp} obj	2,967
B(Qobj)	0,531
Pt requerido	-2180,16

Apéndice B – Guía de Trabajos prácticos del banco de ensayos

A continuación, se presenta la guía de trabajos prácticos completa.



Universidad Nacional de San Luis
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

GUÍA TEÓRICO - PRÁCTICA

BANCO DE ENSAYOS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN BOMBAS ROTODINÁMICAS

Laboratorio de mecánica de los fluidos

Villa Mercedes, San Luis

2026

ÍNDICE

MARCO TEÓRICO	1
Máquinas De Fluidos	1
Turbomáquinas hidráulicas	1
Bombas rotodinámicas – principio de funcionamiento y clasificación.....	2
Determinación experimental de la altura manométrica:	4
Curva de la instalación y punto de operación de un sistema de bombeo:	5
Pérdidas de carga en sistemas hidráulicos	7
Determinación experimental de pérdidas de carga:.....	9
Cavitación – fundamentos y características	10
Altura neta positiva de aspiración (ANPA):	11
PREGUNTAS TEÓRICAS:	16
EJERCICIOS PRÁCTICOS.....	17
Ejercicio 1 – Reconocimiento de la instrumentación y registro de datos.....	17
Ejercicio 2 – Determinación empírica de la curva característica de la bomba	17
Ejercicio 3 – Determinación experimental de las pérdidas de carga en la línea de succión.....	18
Ejercicio 4 – Influencia de la válvula de globo sobre las pérdidas de carga en la línea de succión	20
Ejercicio 5 – Determinación experimental del ANPA disponible	21
Ejercicio 6 – Determinación experimental del ANPA requerido de la bomba..	23
EJERCICIO FINAL INTEGRADOR.....	26
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Curva característica H-Q con curva de potencia y rendimiento.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Curvas superpuestas de carga-caudal del sistema y de carga-capacidad de la bomba, mostrando el punto de operación</i>	<i>6</i>
Figura 3. Esquema del circuito hidráulico del banco de cavitación – Aplicación de Bernoulli	9
<i>Figura 4. Comportamiento del ANPA disponible y del ANPA requerido en función del caudal.</i>	<i>14</i>
Figura 5. Curva de pérdidas de carga en la succión – diseño teórico del banco de ensayos.....	19
Figura 6. Pérdidas de carga según % de apertura de la valvula de globo – diseño teórico del banco de ensayos	21
Figura 7. Curva de $ANPA_{disp}$ con un vacío aplicado del 75%	23
Figura 8. Curva del $ANPA_{req}$ estimado mediante aproximación por coeficiente de Thoma.....	25

MARCO TEÓRICO

Máquinas De Fluidos

Las máquinas son dispositivos que transforman energía de una forma a otra. Dentro de esta clasificación general, las **máquinas de fluidos** son aquellas en las que el fluido actúa como medio de intercambio energético, ya sea cediendo energía al medio mecánico o recibiendo de él [1].

Se distinguen dos grandes grupos:

- **Máquinas hidráulicas:** el fluido atraviesa la máquina sin experimentar variaciones apreciables de densidad. Ejemplos: bombas de agua, ventiladores.
- **Máquinas térmicas:** el fluido varía su densidad de manera significativa durante el proceso, debido a cambios de presión y temperatura. Ejemplos: turbinas de vapor, compresores de gas.

Dentro de las máquinas hidráulicas, la clasificación más habitual las divide en:

- **Máquinas de desplazamiento positivo:** intercambian energía con el fluido por variaciones de presión. Entregan un caudal prácticamente constante, independiente de las condiciones del sistema. Ejemplos: bombas de pistón, émbolo o engranajes.
- **Turbomáquinas:** transfieren energía al fluido por variaciones en la cantidad de movimiento, modificando su velocidad y dirección. Su órgano principal es un rodete en rotación continua. Su principio de funcionamiento está regido por la ecuación general de las turbomáquinas, conocida como ecuación de Euler.

Turbomáquinas hidráulicas

Las turbomáquinas hidráulicas constituyen un subgrupo de las máquinas de fluidos en el que el rodete intercambia energía con el fluido en movimiento. Según la dirección del intercambio energético, se clasifican en:

- **Turbomáquinas motoras:** extraen energía del fluido y la convierten en energía mecánica (ejemplo: turbinas hidráulicas como Pelton, Francis o Kaplan).

- **Turbomáquinas generadoras:** transmiten energía mecánica al fluido, aumentando su energía hidráulica (ejemplo: bombas rotodinámicas, turbo ventiladores).

El análisis de estas máquinas se fundamenta en la **ecuación de Euler de las turbomáquinas**, que relaciona la variación de momento angular del fluido con la energía intercambiada en el rodete. Esta formulación constituye la base teórica para comprender el funcionamiento de bombas y turbinas, y explica cómo la variación de velocidad y dirección del fluido se traduce en energía hidráulica disponible o absorbida.

Bombas rotodinámicas – principio de funcionamiento y clasificación

Las **bombas rotodinámicas** constituyen un subgrupo de las turbomáquinas hidráulicas generadoras, en las cuales la energía se transfiere al fluido mediante un rodete en rotación. A diferencia de las bombas de desplazamiento positivo, que entregan un caudal prácticamente constante independientemente de la instalación, las bombas rotodinámicas impulsan el fluido de manera continua a través del intercambio de cantidad de movimiento. El aumento de velocidad impartido por el rodete se transforma posteriormente en presión mediante un difusor o un caracol (voluta).

Entre sus principales ventajas se destacan la simplicidad constructiva, el menor número de piezas móviles y la posibilidad de manejar grandes caudales con mantenimiento relativamente bajo. No obstante, su comportamiento hidráulico depende fuertemente de las condiciones del sistema, por lo que son sensibles a fenómenos como la cavitación o las variaciones de presión en la línea de succión.

Clasificación según la dirección del flujo interno:

Centrífugas: el fluido ingresa axialmente al rodete y es impulsado radialmente hacia el exterior por efecto de la fuerza centrífuga. Son las más difundidas en la industria, debido a su versatilidad y facilidad de operación.

Axiales: el flujo sigue una trayectoria paralela al eje de rotación. Se emplean en aplicaciones de gran caudal y baja carga.

Mixtas: combinan el movimiento radial y axial, ofreciendo un compromiso entre altura y caudal.

Clasificación según la geometría del rodete:

Rotores cerrados: los álabes se encuentran confinados entre discos. Mayor eficiencia, adecuados para líquidos limpios.

Rotores abiertos o semiabiertos: permiten el paso de fluidos con sólidos en suspensión, aunque con menores rendimientos.

Rodete de simple aspiración: el fluido ingresa por un solo lado del impulsor.

Rodete de doble aspiración: el fluido ingresa por ambos lados, equilibrando fuerzas axiales y permitiendo mayores caudales.

En todos los casos, el rodete debe trabajar completamente lleno de líquido; por este motivo, las bombas rotodinámicas no son **autocebantes**, requiriendo que la carcasa y la succión estén previamente llenas de fluido antes de su puesta en marcha.

Principio de funcionamiento:

El intercambio energético en las bombas rotodinámicas se fundamenta en la ecuación de Euler para turbomáquinas. El rodete transmite energía cinética al fluido, aumentando su velocidad y, en consecuencia, su presión al pasar por el difusor (alabes del rodete) y la voluta.

La relación entre la altura manométrica (H) y el caudal (Q) se representa mediante la **curva característica H-Q**, en la cual se observa que, a mayor caudal, la altura disminuye.

Además de la curva H-Q, suelen representarse conjuntamente:

- **La curva de potencia absorbida (P)**, que indica el aumento de energía requerida por el motor a medida que crece el caudal; y
- **La curva de rendimiento (η)**, que alcanza un máximo en el denominado **punto de mejor eficiencia (BEP, Best Efficiency Point)**.

Estas curvas constituyen la base para interpretar el desempeño de la bomba en distintas condiciones de operación, y sirven como referencia tanto en instalaciones reales como en ensayos de laboratorio. La Figura 1 ilustra un ejemplo típico de estas relaciones para una bomba centrífuga, donde pueden apreciarse conjuntamente las variaciones de altura, potencia hidráulica y rendimiento en función del caudal.

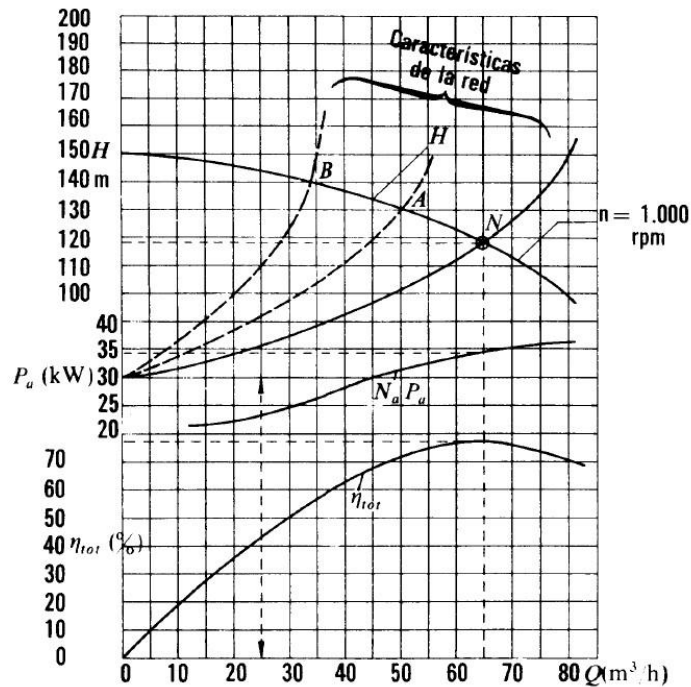


Figura 1. Curva característica H-Q con curva de potencia y rendimiento. [1]

Determinación experimental de la altura manométrica:

En un banco de ensayos de bombas, la altura manométrica desarrollada por la máquina puede determinarse experimentalmente a partir de las presiones medidas en la succión y en la descarga. Este procedimiento se fundamenta en la aplicación de la ecuación de Bernoulli entre las secciones de entrada y salida de la bomba, considerando el incremento de energía hidráulica producido por el equipo.

De forma general, la altura manométrica desarrollada por una bomba se define como el incremento de energía específica del fluido entre la sección de descarga y la de succión [1], expresado en metros de columna de fluido. Matemáticamente puede escribirse como:

$$H = \frac{P_d - P_{suc}}{\gamma} + \frac{v_d^2 - v_{suc}^2}{2g} + (Z_d - Z_{suc})$$

Donde:

P_d = Presión en la descarga

P_{suc} = Presión en la succión

γ = *Peso específico del fluido*

v_d = *Velocidad en la descarga*

V_{suc} = *Velocidad en la succión*

g = *Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)*

Z_d = *Altura geométrica del punto de lectura en la descarga*

Z_{suc} = *Altura geométrica del punto de lectura en la succión*

En el presente banco de ensayos, las tomas de presión en succión y descarga se ubican a distancias cortas de la bomba (por lo que Z_d es casi igual a Z_{suc}), y las tuberías de descarga y de succión tienen el mismo diámetro, por lo tanto, las velocidades del fluido en ambas secciones resultan prácticamente iguales. En consecuencia, tanto el término asociado a la variación de energía cinética, como el término asociado a la variación de energía potencial, pueden despreciarse en la ecuación, quedando simplificada a:

$$H = \frac{P_d - P_{suc}}{\gamma}$$

Esta relación permite determinar directamente la altura manométrica desarrollada por la bomba a partir de las lecturas de presión en la succión y en la descarga. En los ensayos experimentales del banco de pruebas, esta expresión se utiliza para calcular los valores de H correspondientes a distintos caudales de operación, permitiendo así construir la curva característica H-Q de la bomba.

Curva de la instalación y punto de operación de un sistema de bombeo:

En los sistemas de bombeo reales, el funcionamiento de una bomba no depende únicamente de sus características hidráulicas, sino también de las condiciones impuestas por la instalación a la cual se encuentra conectada. Esta interacción se analiza mediante la denominada curva de la instalación, que representa la carga o altura requerida por el sistema para diferentes valores de caudal.

La curva del sistema surge de considerar la suma de dos componentes principales: la altura estática, asociada a diferencias de elevación entre el punto de succión y el de descarga, y las pérdidas de carga por fricción, que dependen del caudal circulante en las tuberías y accesorios. Mientras que la contribución debida a la elevación permanece

constante para cualquier caudal, las pérdidas por fricción aumentan aproximadamente con el cuadrado del caudal, lo que da lugar a una curva de comportamiento típicamente parabólico.

En consecuencia, la carga total requerida por la instalación puede expresarse como la suma de ambos términos, y su representación gráfica permite visualizar cómo varía la exigencia hidráulica del sistema a medida que cambia el caudal.

El funcionamiento real del conjunto bomba–instalación se determina mediante la superposición de la curva característica de la bomba ($H-Q$) y la curva de la instalación. El punto de intersección entre ambas curvas define el denominado punto de operación o punto de trabajo del sistema, que corresponde a la única condición en la que la carga generada por la bomba coincide exactamente con la carga requerida por la instalación. En este punto se establecen simultáneamente el caudal circulante y la altura manométrica efectiva del sistema.

Este procedimiento constituye el método clásico para determinar el régimen de funcionamiento en instalaciones de bombeo. La Figura 2 ilustra esquemáticamente la superposición de ambas curvas y la determinación del punto de operación del sistema.

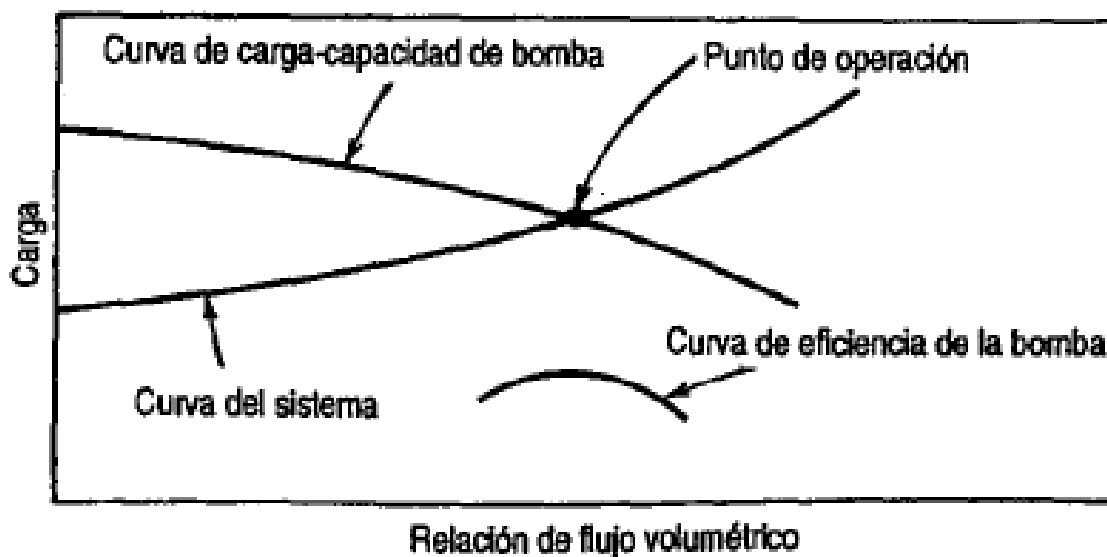


Figura 2. Curvas superpuestas de carga–caudal del sistema y de carga–capacidad de la bomba, mostrando el punto de operación [2]

Pérdidas de carga en sistemas hidráulicos

En una instalación de bombeo, las pérdidas de carga representan la disipación de energía del fluido debida al rozamiento con las paredes de la tubería y a las perturbaciones locales. Se expresan como **metros de columna de fluido (m.c.f) o, (m.c.a), si el fluido es agua** y, en la línea de succión, determinan el término h_r que interviene en el cálculo del ANPA.

Las pérdidas de carga en tuberías son de dos clases:

Pérdidas primarias (o distribuidas): Se producen a lo largo de tramos rectos de tubería de diámetro constante y se calculan mediante la fórmula de **Darcy Weisbach** [1]:

$$h_{rp} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

λ = *coeficiente de fricción (Función de Re y $k/D \rightarrow$ rugosidad relativa)*

L = *longitud*

D = *diámetro*

v = *velocidad media*

El valor de λ se obtiene mediante las fórmulas de Poiseuille, Blasius, Kármán-Prandtl ó Colebrook-White según sea el tipo de régimen del fluido y el tipo de tubería (laminar, turbulento liso o turbulento rugoso).

Pérdidas secundarias (o localizadas): Las pérdidas de carga secundarias (también denominadas localizadas) se originan en los accesorios, uniones y cambios de geometría del conducto, tales como válvulas, codos, entradas, salidas y tramos flexibles.

Estas pérdidas pueden calcularse mediante **dos métodos equivalentes**, ampliamente utilizados en la literatura técnica:

a) Método del coeficiente de pérdida localizada

Este método utiliza un coeficiente de pérdida secundaria adimensional, característico de cada accesorio, y se expresa mediante la siguiente relación:

$$h_{rs} = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

ζ = coeficiente adimensional propio de cada accesorio

v = velocidad en la sección considerada

g = aceleración de la gravedad

Los valores del coeficiente ζ se determinan a partir de datos experimentales recopilados en tablas y manuales técnicos como Cengel & Cimbala [3].

a) Método de las longitudes equivalentes

Alternativamente, las pérdidas secundarias pueden calcularse mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, con el método de longitudes equivalentes, que consiste en sustituir cada accesorio por una longitud equivalente, L_e , de tubería recta del mismo diámetro, capaz de producir las mismas pérdidas de carga que el accesorio en cuestión. En este caso, la expresión resulta:

$$h_{rs} = \lambda \cdot \frac{\sum L_e}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

λ = factor de fricción de Darcy

L_e = longitud equivalente del accesorio

D = diámetro de la tubería

Ambos métodos son **matemáticamente equivalentes**, ya que el coeficiente de pérdida localizada puede expresarse como:

$$\zeta = \lambda \frac{L_e}{D}$$

C) Pérdidas de carga totales: Las pérdidas de carga totales se calculan sumando las primarias y las secundarias, es decir:

$$h_r = h_{rp} + h_{rs}$$

O bien:

$$h_r = \lambda \cdot \frac{L + \sum L_e}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Estas pérdidas reducen la presión en la entrada de la bomba, por lo tanto, a mayor h_r , menor ANPA disponible y mayor riesgo de cavitación.

Determinación experimental de pérdidas de carga:

Además de calcularse mediante expresiones teóricas como la ecuación de Darcy–Weisbach o el método de longitudes equivalentes, las pérdidas de carga también pueden determinarse experimentalmente a partir de mediciones de presión en distintos puntos del sistema.

En particular, si se aplica la ecuación de Bernoulli entre la superficie libre del tanque y la entrada de la bomba (como se observa en la Figura 3), se obtiene:

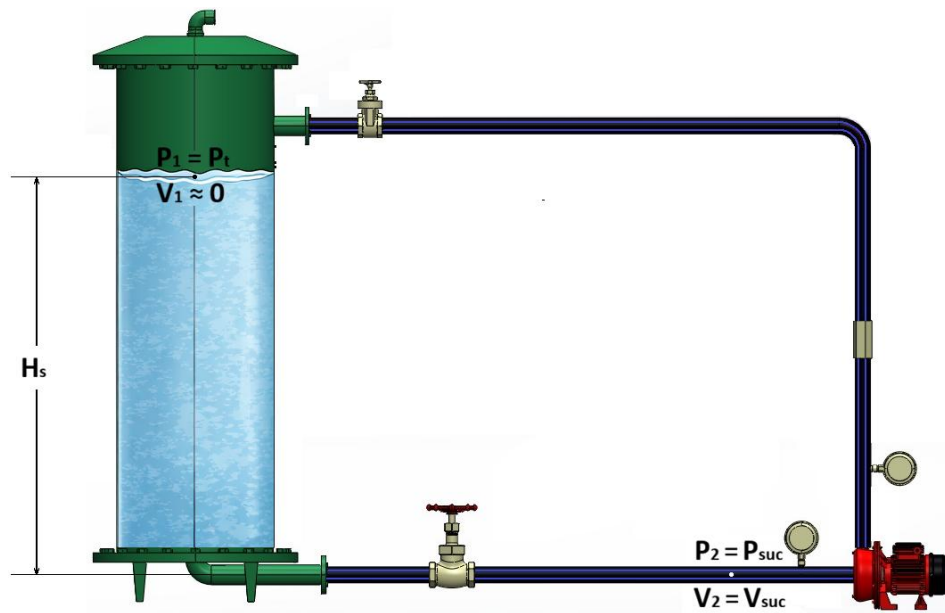


Figura 3. Esquema del circuito hidráulico del banco de cavitación – Aplicación de Bernoulli

Fuente: Del autor

$$\frac{P_t}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_r = \frac{P_{suc}}{\gamma} + z_2 + \frac{V_{suc}^2}{2g}$$

Despejando las pérdidas de carga en la línea de succión, se obtiene:

$$h_r = \frac{P_t - P_{suc}}{\gamma} - (z_2 - z_1) - \frac{V_{suc}^2}{2g}$$

Esta expresión permite determinar experimentalmente las pérdidas de carga en la línea de succión a partir de las presiones medidas en el tanque y en la entrada de la bomba, junto con el caudal circulante, a partir del cual puede calcularse la velocidad del fluido en la tubería.

Cavitación – fundamentos y características

La cavitación es un fenómeno que se produce en los líquidos cuando la presión local desciende por debajo de la presión de vapor, originando la formación de cavidades o burbujas de vapor. Estas burbujas, al desplazarse hacia zonas de mayor presión, colapsan violentamente y generan ondas de choque de gran intensidad.

Este colapso provoca efectos mecánicos —como picaduras (pitting) en superficies metálicas, erosión acelerada de álabes y carcasa— y efectos dinámicos, tales como vibraciones, ruidos anómalos y pérdida de estabilidad en la operación. A nivel de rendimiento, la cavitación se traduce en una caída del caudal y de la altura manométrica entregada por la bomba, junto con un aumento del consumo energético.

En bombas centrífugas, la cavitación aparece principalmente en la entrada del rodete, donde se generan depresiones locales que pueden alcanzar valores inferiores a la presión de vapor del fluido bombeado. Si esta condición se mantiene, el deterioro del equipo puede volverse progresivo, comprometiendo la integridad de la instalación.

Entre las causas más frecuentes de cavitación incluyen:

- Excesiva altura de aspiración o insuficiente presión en la entrada.
- Pérdidas elevadas en la línea de succión (accesorios, codos, válvulas).
- Presencia de burbujas de aire o gases disueltos en el fluido.

A su vez, existen factores que agravan el fenómeno, tales como la elevada temperatura del fluido, la presencia de partículas sólidas en suspensión o rugosidades internas que favorezcan la nucleación de burbujas.

La cavitación puede analizarse también mediante criterios cuantitativos. Uno de los más utilizados es el coeficiente de cavitación (σ), que relaciona la presión absoluta en la entrada de la bomba con la presión de vapor del líquido. Otro enfoque práctico es la determinación de la altura máxima de aspiración ($H_{s\text{ máx}}$) permitida, parámetro directamente vinculado con la Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA).

Por su impacto tanto en la vida útil de los equipos como en la eficiencia del sistema, el estudio de la cavitación resulta fundamental en ingeniería hidráulica. Una correcta evaluación de las presiones de trabajo, de las condiciones de aspiración y de las características del fluido permite prever su aparición. En este trabajo, la cavitación no solo

se considera como fenómeno indeseado, sino que se busca provocarla en condiciones seguras y controladas con fines didácticos, de manera de analizar sus efectos y comprender mejor la interacción entre bomba y sistema.

Altura neta positiva de aspiración (ANPA):

La Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA) es un parámetro fundamental en el diseño y operación de sistemas de bombeo, ya que determina la energía disponible en la entrada de la bomba para que el fluido llegue al rodete sin que su presión descienda por debajo de la presión de vapor. El valor de ANPA debe ser suficiente para evitar la formación de cavidades de vapor y, por lo tanto, la cavitación.

Se distinguen dos conceptos complementarios:

ANPA disponible: es la altura real con la que cuenta la instalación en el punto de succión de la bomba. Depende de la presión atmosférica en el lugar de operación, la altura estática del fluido respecto al eje de la bomba, las pérdidas de carga en la línea de aspiración y la presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo.

ANPA requerida: es un valor característico de cada bomba, suministrado por el fabricante, que indica la altura mínima necesaria para que la bomba funcione sin cavitación.

La condición de funcionamiento seguro se expresa como:

$$ANPA_{disp} > ANPA_{req}$$

Cuando esta desigualdad no se cumple, la presión en la succión cae por debajo de la presión de vapor y se inicia el proceso de cavitación.

Matemáticamente, la definición de ANPA disponible, viene dada por la ecuación:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_t - P_s}{\gamma} - H_S - h_r$$

donde:

P_t = Presión en el tanque (o P_{atm} si el tanque es abierto)

P_s = Presión de saturación (o presión de vapor) del fluido de trabajo

H_S = Altura geométrica de aspiración

h_r = Pérdidas de carga en la línea de succión

γ = *Peso específico del fluido de trabajo.*

Es decir, que podemos calcular el $ANPA_{disp.}$ en función de la presión en el tanque, de la altura geométrica de aspiración y de las pérdidas de carga en la tubería de succión.

Por otra parte, planteando Bernoulli entre la superficie libre del tanque y la entrada de la bomba (Como se ve en la Figura 3), se tiene:

$$\frac{P_t}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_r = \frac{P_{suc}}{\gamma} + z_2 + \frac{V_{suc}^2}{2g}$$

donde:

P_t = *Presión en el tanque (o P_{atm} si el tanque es abierto)*

P_s = *Presión de saturación (o presión de vapor) del fluido de trabajo*

v_1 = *Velocidad del fluido en el tanque*

z_1 = *Altura geométrica del agua en el tanque*

v_{suc} = *Velocidad del fluido en la tubería de succión*

z_2 = *Altura geométrica del agua en la tubería de succión*

h_r = *Pérdidas de carga en la línea de succión*

γ = *Peso específico del fluido de trabajo.*

Reagrupando y considerando que la velocidad a la que disminuye el fluido dentro del tanque es casi nula, se tiene:

$$\frac{P_t}{\gamma} = \frac{P_{suc}}{\gamma} + z_2 - z_1 + \frac{V_{suc}^2}{2g} + h_r$$

Llamando $H_s = z_2 - z_1$ y despejando P_t / γ , se obtiene:

$$\frac{P_t}{\gamma} = \frac{P_{suc}}{\gamma} + H_s + \frac{V_{suc}^2}{2g} + h_r$$

Donde:

H_s = *Altura geométrica de aspiración*

Note que, según el esquema de la Figura 3, la altura geométrica de aspiración, H_s , resulta negativa. Esto se debe a que la bomba se encuentra instalada “en carga”, es decir, por debajo del nivel del fluido del tanque. En esta configuración, la columna de agua situada

sobre la succión de la bomba contribuye a aumentar el ANPA disponible. Matemáticamente, esto se explica porque H_s aparece restando en la expresión del ANPA, sin embargo, al tratarse de un valor negativo, su efecto final es equivalente a una suma, incrementando así el valor de este parámetro.

Reemplazando esta última ecuación en la ecuación de definición de $ANPA_{disp.}$, se obtiene:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_{suc}}{\gamma} + H_s + \frac{V_2^2}{2g} + h_r - \frac{P_s}{\gamma} - H_s - h_r$$

Reordenando y simplificando, obtenemos:

$$ANPA_{disp} = \frac{P_{suc} - P_s}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Es decir, que también podemos calcular el $ANPA_{disp.}$ mediante la lectura de presión en la succión y la velocidad en la tubería de aspiración (que podemos obtener mediante la ec. de continuidad en función del caudal).

De manera intuitiva, el significado de la Altura Neta Positiva de Aspiración, puede resumirse así:

$ANPA_{disp} > ANPA_{req.}$: Operación segura, sin cavitación.

$ANPA_{disp} = ANPA_{req.}$: Operación al límite, con riesgo inminente de cavitación.

$ANPA_{disp} < ANPA_{req.}$: Operación con cavitación segura.

En la Figura 4 se presenta un gráfico típico del comportamiento hidráulico de una bomba centrífuga, en el cual se representa la variación de la altura manométrica entregada por la bomba y de la Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA) en función del caudal. En particular, se muestran las curvas correspondientes a la ANPA disponible de la instalación y a la ANPA requerida por la bomba, cuya intersección define el límite de operación sin cavitación. Este tipo de representación permite identificar claramente las regiones de funcionamiento seguro y aquellas en las que se inicia el fenómeno de cavitación, resultando de gran utilidad para el análisis y comprensión del comportamiento del sistema de bombeo.

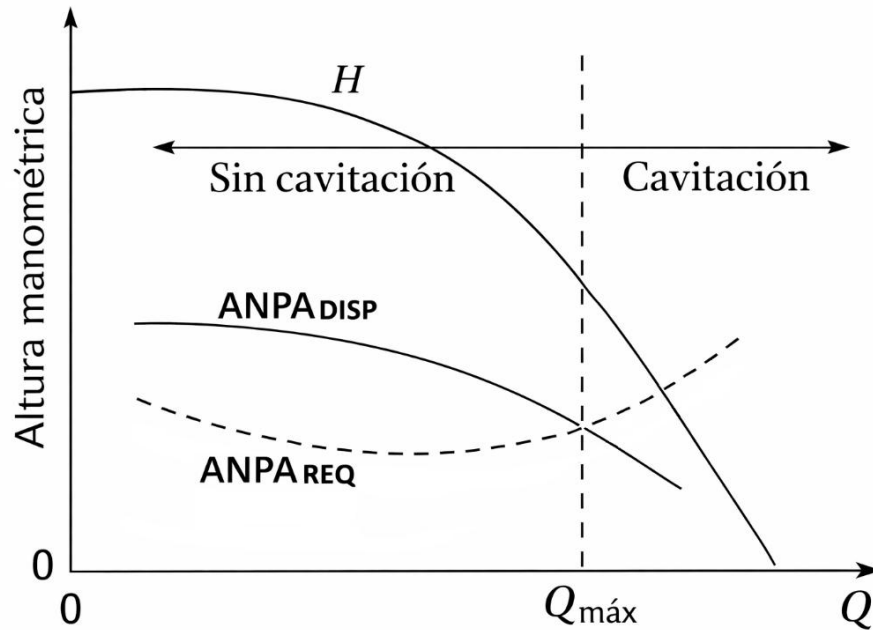


Figura 4. Comportamiento del ANPA disponible y del ANPA requerido en función del caudal.

Fuente: Del autor, a partir de [5]

En la práctica, los fabricantes indican en sus catálogos la curva de **ANPA requerido vs. caudal**, que debe compararse con el ANPA disponible calculado para la instalación. No obstante, cuando dicha información no se encuentra disponible, el ANPA requerido puede determinarse experimentalmente mediante ensayos realizados en un banco de pruebas.

La determinación experimental del ANPA requerido se basa en provocar condiciones progresivas de cavitación en la bomba mientras se mantiene constante el caudal de operación. Para ello, se reduce gradualmente la presión absoluta en la succión de la bomba —por ejemplo, mediante la aplicación de vacío en el tanque de alimentación— lo que produce una disminución del ANPA disponible. A medida que el ANPA disponible se reduce, se alcanza un punto en el cual comienzan a formarse cavidades de vapor en el interior de la bomba, fenómeno que se manifiesta mediante vibraciones, ruido característico y una disminución de la altura manométrica desarrollada por la máquina.

El criterio más utilizado para determinar el ANPA requerido consiste en identificar el valor del ANPA disponible para el cual la altura manométrica de la bomba disminuye en un 3% respecto del valor obtenido en condiciones libres de cavitación.

Matemáticamente, esta condición puede expresarse como:

$$H_{cav} = 0,97 H_0$$

donde:

H_0 = altura manométrica medida en condiciones sin cavitación

H_{cav} = altura manométrica medida bajo condiciones de cavitación incipiente

Durante el ensayo, se registra el valor del ANPA disponible correspondiente a esta condición crítica, ya que, en ese instante, es igual al ANPA requerido (ver Figura 3), es decir:

$$ANPA_{req} = ANPA_{disp}|_{H=0,97H_0}$$

Repitiendo este procedimiento para distintos valores de caudal es posible construir experimentalmente la curva de ANPA requerido en función del caudal, que caracteriza el comportamiento de la bomba frente al fenómeno de cavitación.

Este método experimental resulta particularmente valioso en instalaciones de laboratorio, ya que permite determinar directamente el comportamiento real de la bomba bajo condiciones controladas, independientemente de la información proporcionada por el fabricante.

PREGUNTAS TEÓRICAS:

1. ¿Qué es una máquina hidráulica? ¿Cómo se clasifican? Explique el principio de funcionamiento de una bomba centrífuga e identifique sus principales componentes.

2. ¿Qué representa la curva característica H–Q de una bomba centrífuga? Explique cómo se relaciona con la curva de la instalación y qué se entiende por punto de operación del sistema. Describa además cómo puede variar dicho punto cuando se modifican las condiciones de la instalación o el caudal circulante. Grafique esquemáticamente la curva característica de la bomba, la curva de la instalación e indique el punto de operación del sistema.

3. ¿Qué son las pérdidas de carga en una instalación hidráulica? Explique cómo se clasifican y describa de qué manera influyen en el funcionamiento de un sistema de bombeo.

4. ¿Qué es el fenómeno de cavitación? Explique cuáles son sus causas y describa sus principales efectos sobre el funcionamiento y la integridad de una bomba centrífuga.

5. ¿Qué se entiende por Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA)? Defina ANPA disponible y ANPA requerido, y explique por qué el valor real de ANPA requerido de una bomba debe determinarse experimentalmente. Indique además qué variables o condiciones del sistema pueden modificarse para provocar cavitación inducida en una instalación de bombeo.

Las respuestas deberán fundamentarse utilizando el marco teórico proporcionado en esta guía y la bibliografía recomendada.

EJERCICIOS PRÁCTICOS

Ejercicio 1 – Reconocimiento de la instrumentación y registro de datos

Antes de iniciar los ensayos, identifique los instrumentos de medición instalados en el banco de pruebas.

1. Identifique los instrumentos de medición presentes en el banco de ensayos y complete la siguiente tabla indicando el tipo de instrumento, la magnitud que mide y la variable utilizada en el análisis del sistema.

Instrumento	Magnitud medida	Variable utilizada
Caudalímetro	Caudal volumétrico del fluido	Q
Manómetro de descarga		
Vacuómetro en el tanque		
Vacuómetro en la succión		
Termómetro		

2. Con el banco funcionando en condiciones estables, registre los siguientes valores experimentales en una tabla como la siguiente:

Magnitud medida	Valor obtenido	Unidad
Q		[m ³ /h]
P _d		[Pa]
P _t		
P _{suc}		
t		

Ejercicio 2 – Determinación empírica de la curva característica de la bomba

En este ejercicio se determinará experimentalmente la curva característica H-Q de la bomba centrífuga BC 100 T instalada en el banco de ensayos.

Con la bomba en funcionamiento en régimen estable, registre, en una tabla como la siguiente, la presión de succión y descarga para al menos cinco puntos de operación distintos, variando el caudal mediante la válvula de regulación en la descarga.

Q [m ³ /h]	P _{suc} [Pa]	P _d [Pa]	H [m]

Tenga en cuenta que los valores de la altura manométrica (H) desarrollada por la bomba tendrán que calcularlos mediante las fórmulas expuestas en el marco teórico.

1. Grafique la curva característica de la bomba, representando la altura manométrica H en función del caudal Q.
2. Analice la tendencia de la curva obtenida y compárela cualitativamente con la curva característica proporcionada por el fabricante.

Ejercicio 3 – Determinación experimental de las pérdidas de carga en la línea de succión

En este ejercicio se determinarán experimentalmente las pérdidas de carga en la línea de succión del banco de ensayos, manteniendo la válvula de succión completamente abierta.

1. Para los valores de caudal indicados en la ficha técnica provista por el fabricante, registre las lecturas de:
 - Presión en el tanque P_t
 - Presión en la succión de la bomba P_{suc}
2. Utilizando las expresiones presentadas en el marco teórico, calcule las pérdidas de carga en la línea de succión correspondientes a cada uno de los caudales anteriores.
3. Presente todos los resultados en una tabla como la siguiente:

Q [m ³ /h]	P _t [Pa]	P _{suc} [Pa]	h _r [m]

- Grafique las pérdidas de carga en la línea de succión en función del caudal Q.
- Compare la curva obtenida experimentalmente con la siguiente curva que corresponde a la estimada en el diseño hidráulico del banco de ensayos.

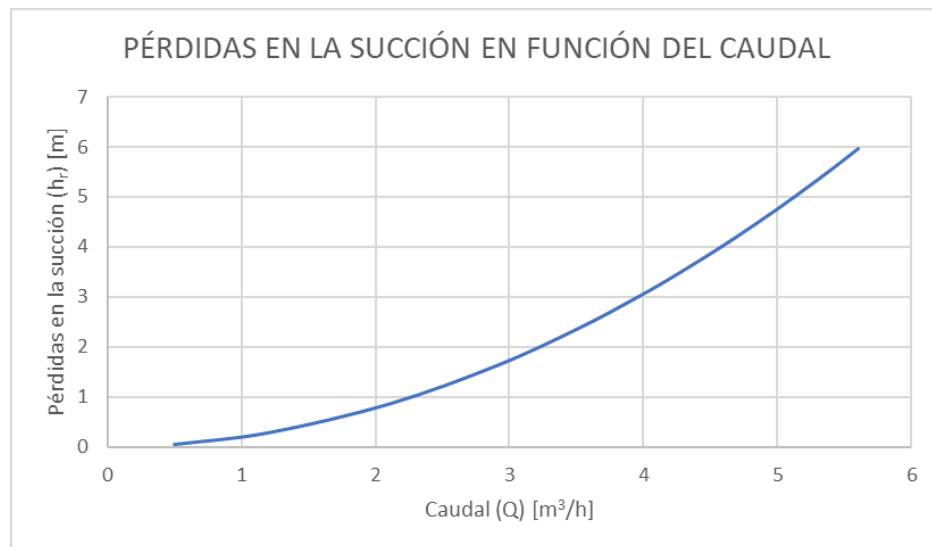


Figura 5. Curva de pérdidas de carga en la succión – diseño teórico del banco de ensayos

Fuente: Del autor

- Analice las similitudes y diferencias observadas entre los resultados experimentales y teóricos, e indique posibles causas de discrepancia.

Ejercicio 4 – Influencia de la válvula de globo sobre las pérdidas de carga en la línea de succión

En este ejercicio se analizará la influencia del grado de apertura de la válvula de globo instalada en la línea de succión sobre las pérdidas de carga del sistema.

- Para los valores de caudal especificados en la ficha técnica provista por el fabricante, repita el procedimiento del Ejercicio 3, registrando las lecturas de presión en el tanque (P_t) y presión en la succión de la bomba (P_{suc}), para los siguientes 4 grados distintos de apertura de la válvula de globo.
 - 100 % (Mismos valores que en el Ejercicio 3)
 - 90 %
 - 80 %
 - 70 %
 - 60 %
- Utilizando la misma expresión empleada en el Ejercicio 3, calcule las pérdidas de carga en la línea de succión para cada punto ensayado con los distintos % de apertura de la válvula de globo.
- Presente los resultados en tablas separadas, una para cada grado de apertura de la válvula de globo, similares a la tabla utilizada en el Ejercicio 3. A modo de ejemplo, a continuación, se presenta la tabla correspondiente a una apertura del 90 %.

% Apertura	Q [m ³ /h]	P _t [Pa]	P _{suc} [Pa]	h _r [m]
90 %				

- Grafique, para cada grado de apertura, las pérdidas de carga en la línea de succión en función del caudal.

5. Analice cómo varían las pérdidas de carga en la succión a medida que disminuye el grado de apertura de la válvula.
6. Compare los resultados obtenidos con los del modelo teórico de la válvula de globo en el diseño del banco de ensayos, cuyas curvas de pérdidas se presentan a continuación:

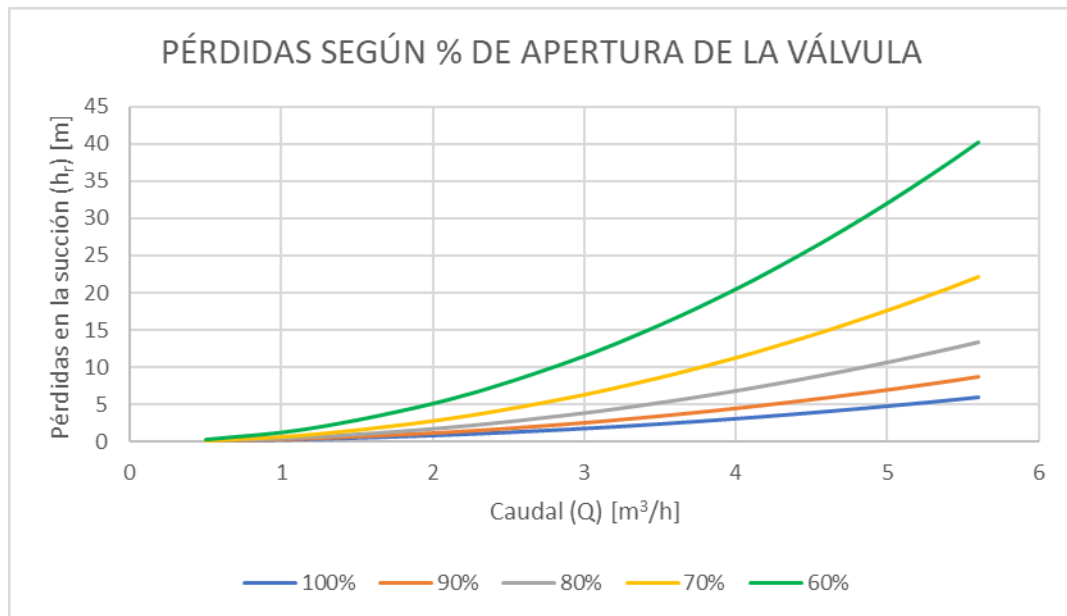


Figura 6. Pérdidas de carga según % de apertura de la válvula de globo – diseño teórico del banco de ensayos

Fuente: Del autor

Ejercicio 5 – Determinación experimental del ANPA disponible

En este ejercicio se determinará experimentalmente la Altura Neta Positiva de Aspiración disponible ($ANPA_{disp}$) del banco de ensayos.

El ensayo deberá realizarse manteniendo la válvula de globo completamente abierta y aplicando un vacío del 75 % en el tanque, de modo de reproducir las condiciones consideradas en el diseño hidráulico del banco de ensayos.

1. Para cada uno de los caudales indicados en la ficha técnica provista por el fabricante, registre las lecturas de:
 - Presión absoluta en la succión de la bomba (P_{suc})

- Temperatura del fluido (t)

[illegible]

5. Grafique el $ANPA_{disp}$ en función del caudal Q .
6. Compare la curva obtenida experimentalmente con la curva de $ANPA_{disp}$ estimada en el diseño hidráulico del banco de ensayos para las mismas condiciones de apertura de válvula y nivel de vacío, cuya gráfica es la siguiente:

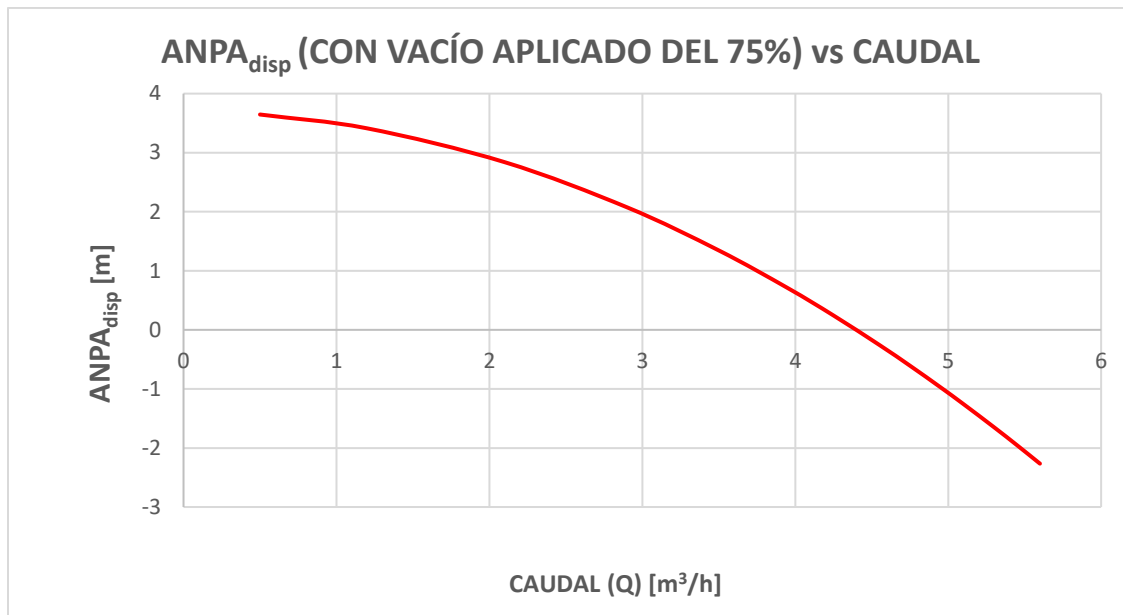


Figura 7. Curva de ANPA_{disp} con un vacío aplicado del 75%

Fuente: Del autor

- Analice las similitudes y diferencias observadas entre los resultados experimentales y teóricos, e indique posibles causas de discrepancia.

Ejercicio 6 – Determinación experimental del ANPA requerido de la bomba

En este ejercicio se determinará experimentalmente la curva real de ANPA requerido de la bomba centrífuga instalada en el banco de ensayos.

A diferencia de los valores utilizados durante el diseño hidráulico del banco, que fueron obtenidos mediante estimaciones teóricas preliminares, el ANPA requerido real debe determinarse experimentalmente a partir del inicio del fenómeno de cavitación.

En el presente trabajo se adoptará como criterio de inicio de cavitación una disminución del 3 % en la altura manométrica desarrollada por la bomba, respecto del valor correspondiente al mismo caudal en condiciones de régimen estable.

1. Trabaje con los siguientes cinco valores de caudal:

- 5,60 m³/h
- 5,10 m³/h
- 4,55 m³/h
- 3,50 m³/h

- 1,20 m³/h

2. Para cada uno de los caudales anteriores, haga funcionar el banco en régimen estable y determine la altura manométrica inicial H_0 correspondiente a ese punto de operación.

3. Para cada caudal, calcule el valor de altura manométrica crítica H_{crit} correspondiente al 97 % de H_0 , es decir: $H_{crit} = 0,97 H_0$

4. Manteniendo constante el caudal de operación, reduzca gradualmente la presión en el tanque mediante la bomba de vacío hasta que la altura manométrica desarrollada por la bomba alcance aproximadamente el valor H_{crit} .

5. En ese instante, registre:

- presión en la succión de la bomba (P_{suc})
- altura manométrica correspondiente (H_{crit})
- temperatura del fluido (t)

6. A partir de la temperatura medida, determine la presión de saturación del agua P_s utilizando tablas de propiedades del agua.

7. Utilizando la expresión presentada en el marco teórico, calcule el ANPA requerido experimental para cada uno de los cinco caudales analizados.

8. Presente los resultados en una tabla como la siguiente:

Q [m ³ /h]	P_d [Pa]	P_{suc} [Pa]	H_0 [m]	$P_{suc\ crit}$ [Pa]	H_{crit} [m]	t [°C]	ANPA _{req} [m]

9. Grafique el ANPA_{req} en función del caudal Q.

10. Compare la curva obtenida experimentalmente con la curva de ANPA requerido estimada preliminarmente durante el diseño hidráulico del banco de ensayos, la cual fue calculada a partir del coeficiente de Thoma, cuya gráfica es la siguiente:

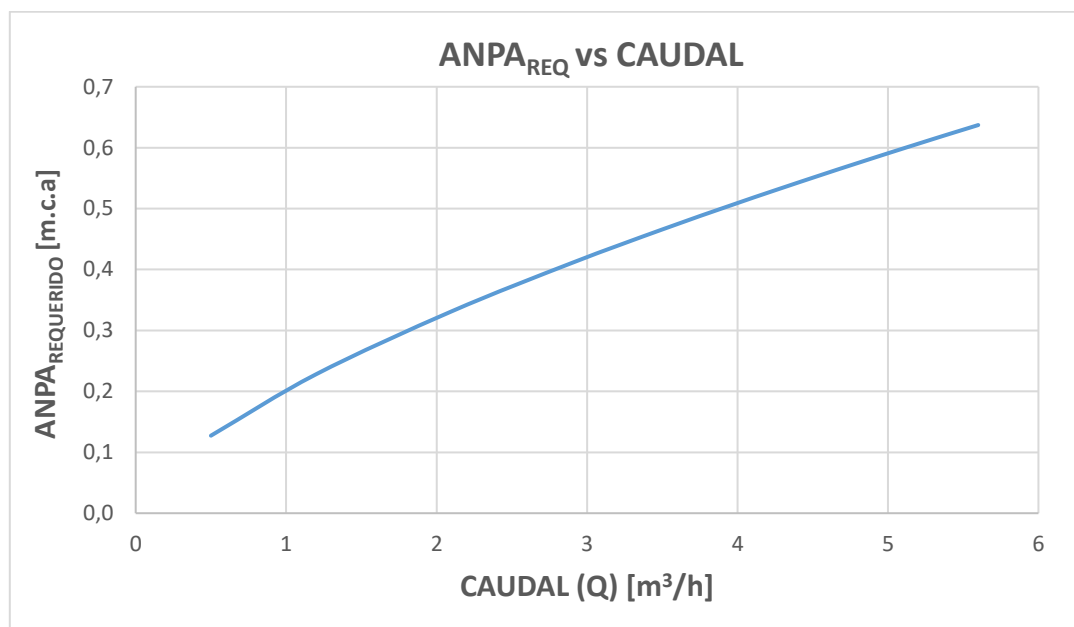


Figura 8. Curva del $ANPA_{req}$ estimado mediante aproximación por coeficiente de Thoma

Fuente: Del autor

11. Analice las similitudes y diferencias observadas entre los resultados experimentales y teóricos, e indique posibles causas de discrepancia.

EJERCICIO FINAL INTEGRADOR

En este ejercicio final se realizará un análisis integral del funcionamiento del banco de cavitación, integrando los conceptos desarrollados en los ejercicios anteriores. El objetivo es estudiar cómo las condiciones hidráulicas del sistema influyen en la aparición del fenómeno de cavitación y analizar la relación entre el caudal de operación, las pérdidas de carga en la línea de succión, el ANPA disponible y el nivel de vacío aplicado en el tanque.

Para ello se deberán realizar una serie de ensayos experimentales variando las condiciones de operación del sistema, de modo de modificar las pérdidas de carga en la línea de succión y observar cómo dichas variaciones afectan el valor de vacío necesario para inducir cavitación en la bomba.

A partir de las mediciones realizadas, se deberá analizar el comportamiento global del sistema de bombeo y comparar los resultados experimentales con las estimaciones teóricas obtenidas mediante la planilla de cálculo desarrollada para el diseño del banco.

Consignas

1. Seleccione al menos tres o cuatro grados de apertura distintos de la válvula de globo en la línea de succión.
2. Para cada grado de apertura de la válvula, se deberá registrar el caudal realmente circulante y determinar el nivel de vacío necesario para inducir cavitación en esa condición de operación.
3. Registre para cada ensayo, como mínimo, las siguientes variables:
 - Grado de apertura de la válvula.
 - Caudal Q .
 - Presión en el tanque P_t .
 - Presión en la succión P_{suc} .
 - Presión en la descarga P_d .
 - Altura manométrica H .
 - ANPA disponible.
 - Porcentaje de vacío aplicado al momento de iniciarse la cavitación.

4. Presente los resultados en tablas y grafique, si corresponde, la relación entre el grado de apertura de la válvula y el porcentaje de vacío requerido para inducir cavitación.
5. Analice la tendencia observada y justifique, por qué la modificación del grado de apertura de la válvula altera las condiciones necesarias para provocar cavitación.
6. Compare los resultados experimentales obtenidos con las estimaciones provistas por la planilla de cálculo dinámica desarrollada para el banco de ensayos, e indique coincidencias, diferencias y posibles causas de discrepancia.
7. Elabore un informe técnico integrador en el que se discutan los resultados experimentales y el comportamiento del sistema.
8. Finalmente, proponga posibles mejoras para el banco de ensayos. En particular, considere:
 - Mejoras en la precisión del control de cavitación.
 - Mejoras en la instrumentación y adquisición de datos.
 - Alternativas para inducir cavitación en forma controlada.
 - Ventajas y desventajas de otros métodos para inducir cavitación en forma controlada respecto al sistema actualmente adoptado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Madrid, España: Ediciones del Castillo, 1976.

[2] R. W. Fox y A. T. McDonald, *Introducción a la mecánica de los fluidos*, 4ª ed., México: McGraw-Hill, 1995.

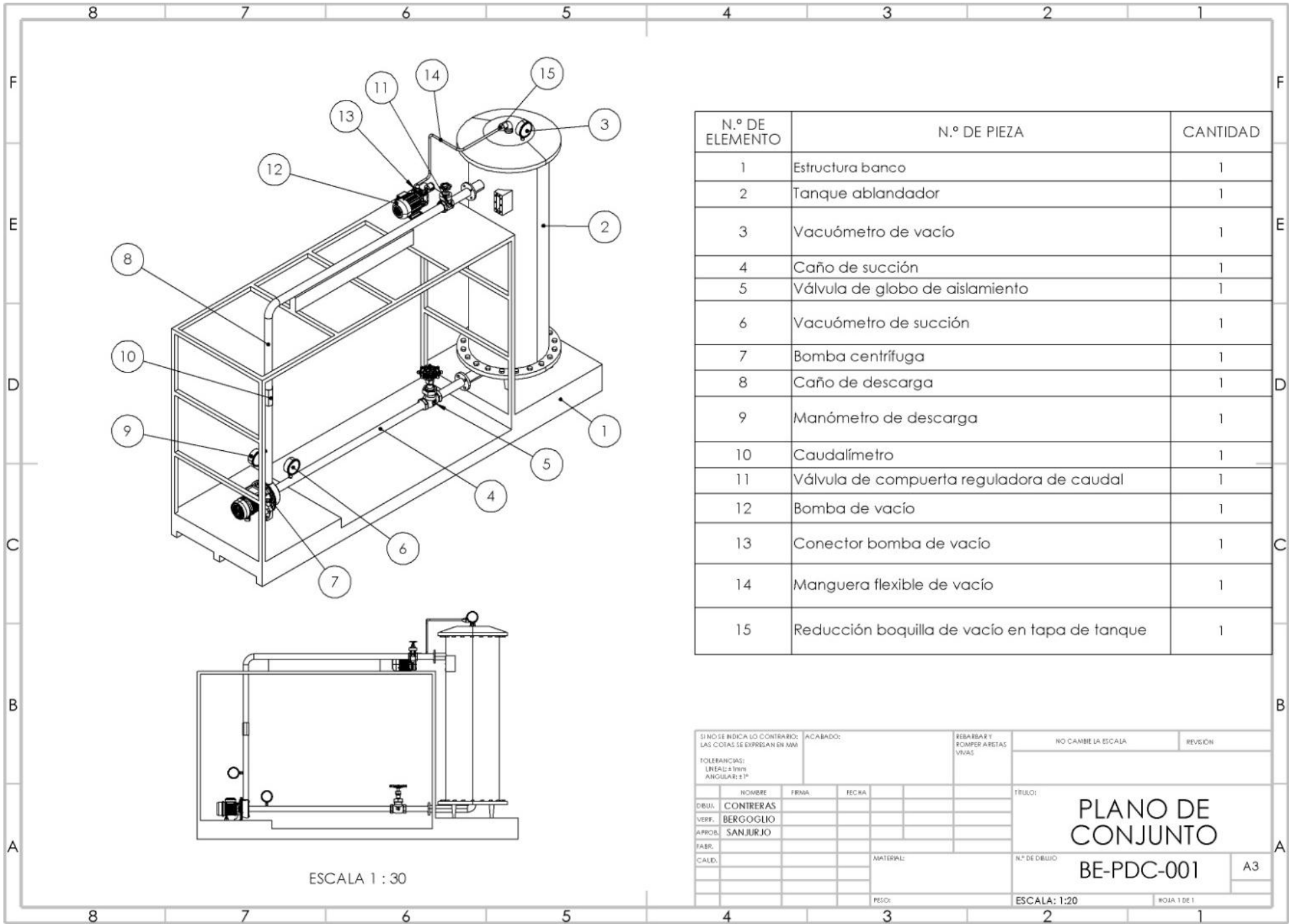
[3] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, 2ª ed., México: McGraw-Hill Interamericana, 2009.

[4] Crane Co., “Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe,” Technical Paper No. 410, versión métrica, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://studylib.net/doc/26117989/crane-flow-of-fluids> (consultado en marzo de 2026).

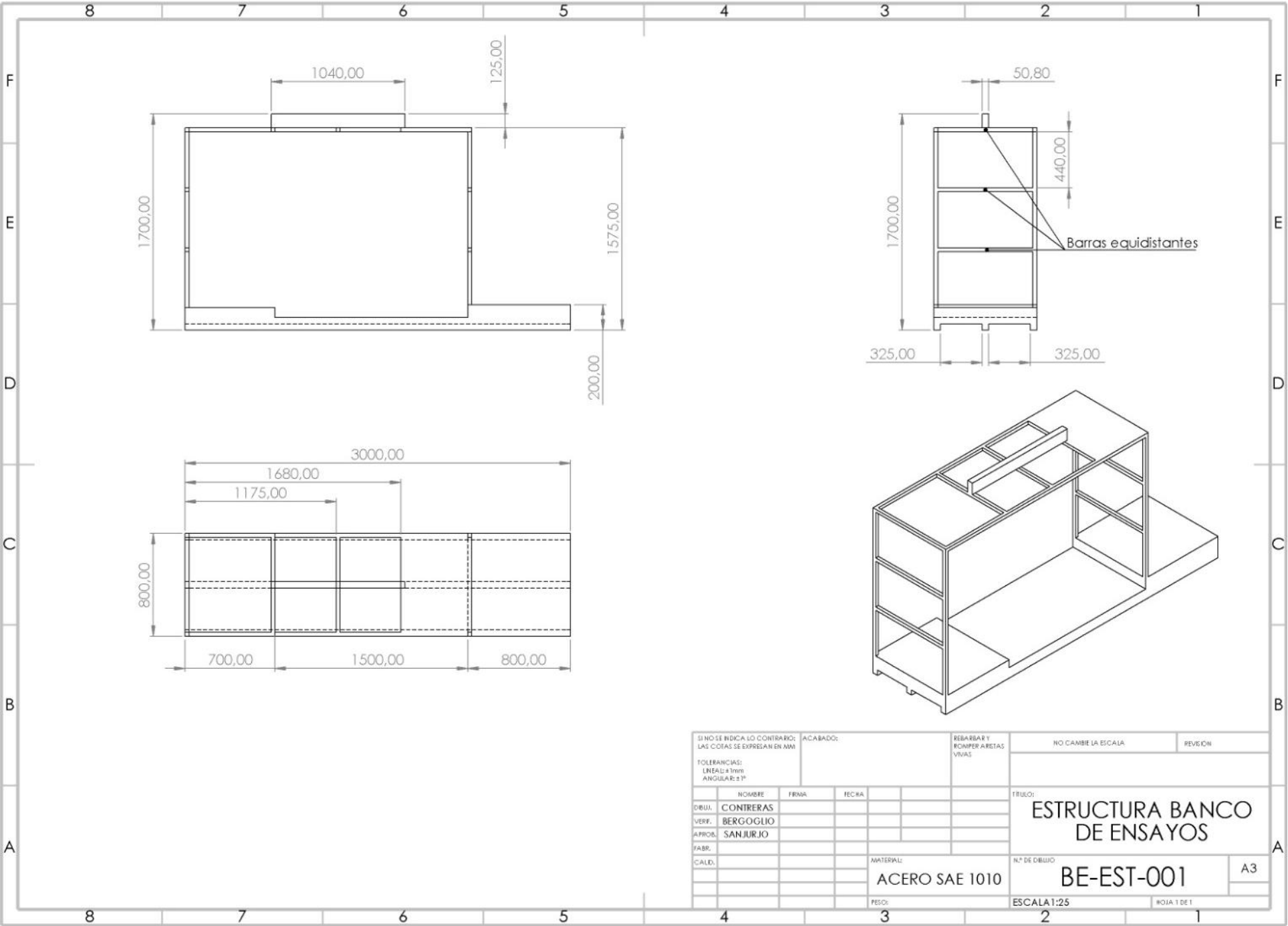
[5] “Fluid Mechanics – Basic of Fluid Mechanics,” presentación en línea, SlideShare. Disponible en: https://es.slideshare.net/slideshow/001-fluid_mechanics-pptx-basic-of-fluid-mechanics/272147979 (consultado en febrero de 2026).

Apéndice C – Planos

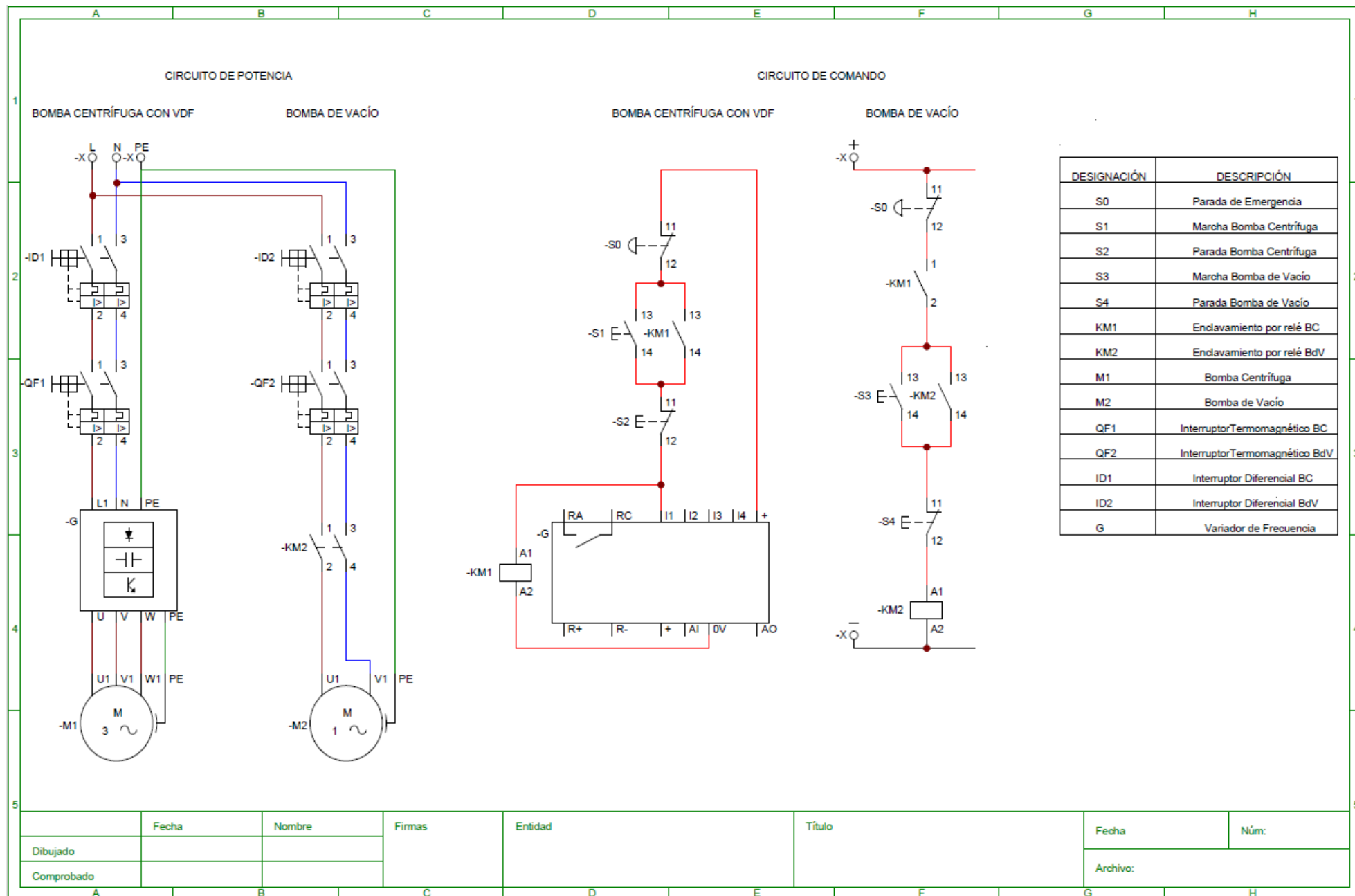
Plano de conjunto del banco de ensayos (PLANO BE-PDC-001)



Plano de estructura del banco de ensayos



Plano eléctrico del banco de ensayos



ANEXOS

Anexo A – Ficha técnica de la bomba centrífuga BC 100 T

A continuación, se incluye la ficha técnica correspondiente a la bomba centrífuga seleccionada para el banco de ensayos, provista por el fabricante.

BC

ELECTROBOMBAS CENTRÍFUGAS



DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

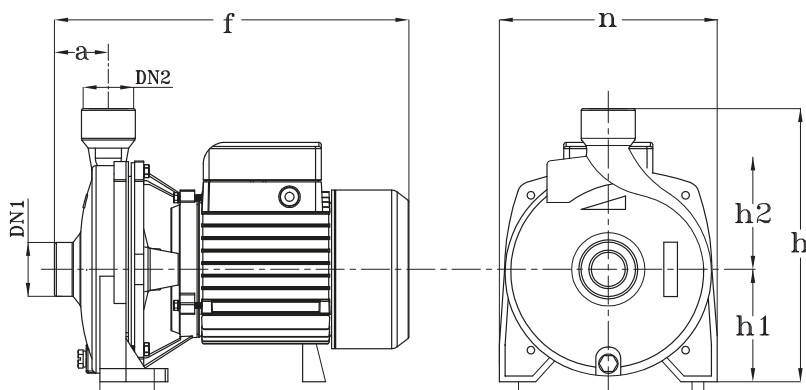
La línea de electrobombas centrífugas monoblock “BC”, está diseñada para el bombeo de agua limpia para elevación a tanques cisternas, en sistemas de presurización y en riegos.

CARACTERÍSTICAS

- Cuerpo de HIERRO FUNDIDO
- Impulsor de ACERO INOXIDABLE (BC)
- Eje de Acero Inoxidable: prolonga la vida útil del equipo.
- Protector térmico incorporado (en monofásicas)
- Cumplen con las normas de seguridad eléctrica internacionales IEC

CONDICIONES DE USO

- Temperatura del fluido hasta + 35°C
- Temperatura ambiente hasta +40°C
- Máximo nivel de aspiración 7 metros
- Agua limpia

**DIMENSIONES**

Modelo	HP	Tensión	Capacitor	In (Amp)	Peso (Kg)	DN1	DN2	a	f	h	h1	n	n1	w	s
BC 50 M r.4	0,5	1x220V - 50Hz	12µF - 450V	2,8	9	1"	1"	42	259	211	82	165	135	41	10
BC 75 M r.4	0,75	1x220V - 50Hz	20µF - 450V	5,3	12,4	1"	1"	42	286	211	82	165	135	41	10
BC 100 M r.4	1	1x220V - 50Hz	20µF - 450V	5,6	13,3	1"	1"	44	298	242	97	190	160	43	10
BC 100 T r.4	1	3x380V - 50Hz	----	2,5	13,3	1"	1"	44	298	242	97	190	160	43	10
BC 150 M r.4	1,5	1x220V - 50Hz	25µF - 450V	7	22,8	1"	1"	51	341	260	110	206	165	45	11
BC 150 T r.4	1,5	3x380V - 50Hz	----	2,6	22,8	1"	1"	51	341	260	110	206	165	45	11

CURVA DE RENDIMIENTO

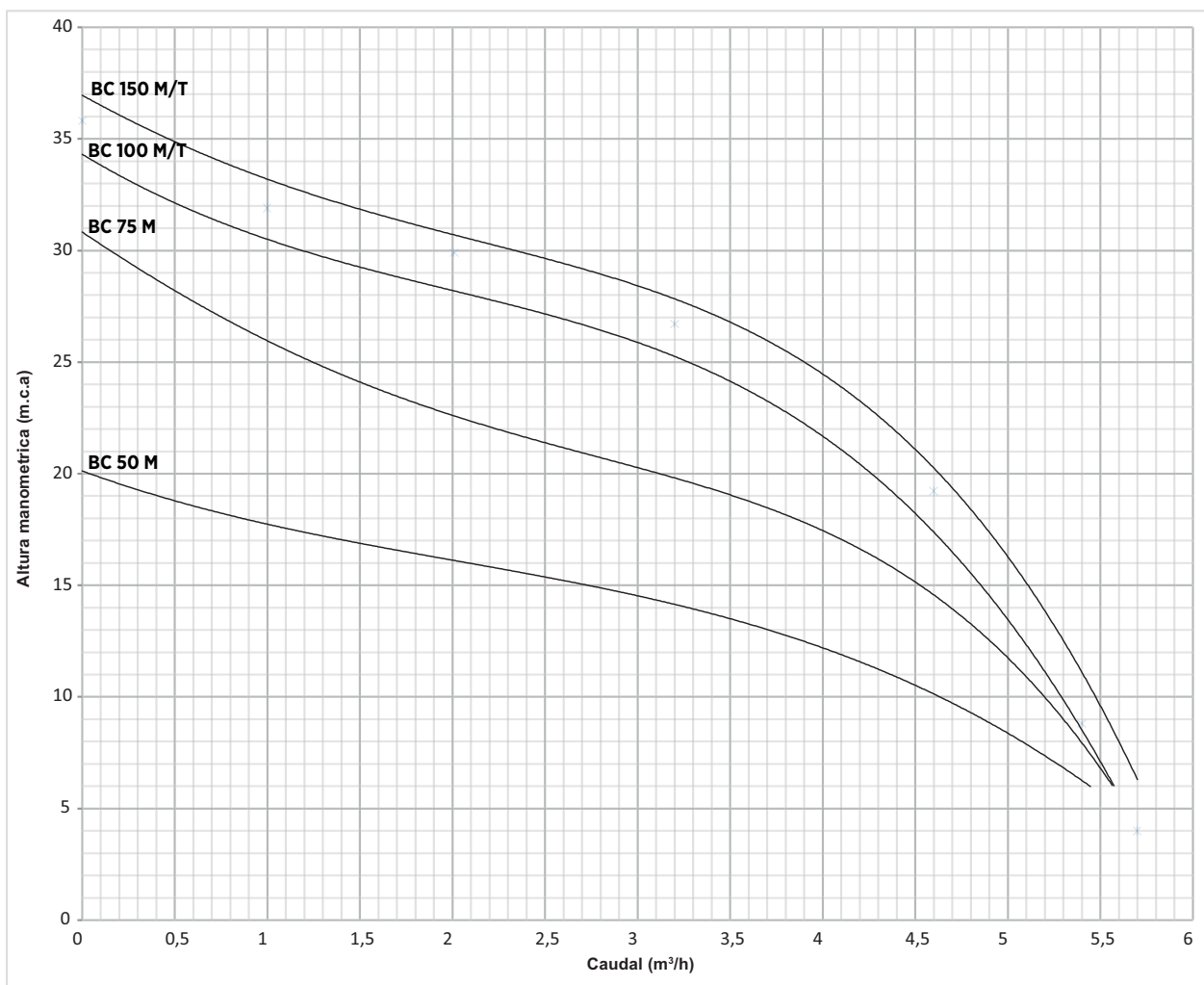


TABLA DE PRESTACIONES 50 Hz - 2800 rpm

MODELO	HP	ALTURA MANOMÉTRICA (METROS)															Asp x Desc
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	36	
BC 50 M r.4	0,5	5,4	5,1	4,6	4,1	3,3	2,1	0,9						Caudal m³/h			1" x 1"
BC 75 M r.4	0,75	5,6	5,4	5,2	4,95	4,7	4,3	3,8	3,1	2,2	1,5	1	0,5	0,15			1" x 1"
BC 100 M r.4	1	5,6	5,45	5,3	5,1	4,95	4,75	4,55	4,25	3,95	3,5	2,9	2,1	1,2	0,5		1" x 1"
BC 100 T r.4	1	5,6	5,45	5,3	5,1	4,95	4,75	4,55	4,25	3,95	3,5	2,9	2,1	1,2	0,5		1" x 1"
BC 150 M r.4	1,5	5,7	5,6	5,5	5,35	5,2	5	4,8	4,6	4,45	4,0	3,60	3,1	2,4	1	0,3	1" x 1"
BC 150 T r.4	1,5	5,7	5,6	5,5	5,35	5,2	5	4,8	4,6	4,45	4,0	3,60	3,1	2,4	1	0,3	1" x 1"



Veracruz 2900 (B1822BGP)
Valentín Alsina - Buenos Aires - Argentina
Tel: (011) 4135-7000 - Fax: (011) 4135-7001
info@motorarg.com.ar - www.motorarg.com.ar

Anexo B – Ficha técnica de la bomba de vacío DOSIVAC DV95 SR

A continuación, se presenta la ficha técnica corresponde a la serie DVR 95 del fabricante DOSIVAC, compatible con el modelo DV95 SR instalado en el banco de ensayos.

Bombas de Vacío Dosivac

**Motor
Mob**

ASESORANDO INDUSTRIAS

- Motores eléctricos - Motorreductores
- Bombas Centrifugas y Autocebantes
- Bombas para Presurización y Calefacción
- Bombas para Desagote y Sumergibles
- Sellos mecánicos - Repuestos
- Bobinados - Reparaciones
- Ventilación Industrial
- Montajes Industriales

Tel./Fax: (54-011) 4753-2348 / 4755-2757

**Av. 101 (Ruta 8) N° 1882 - (1650) San Martín
Pcia. de Bs. As. - Argentina**

www.electromecanicamm.com.ar / electromecanicamm@hotmail.com



DOSIVAC

Características

- Bombas compactas para vacío, rotativas a paletas en baño de aceite de dos etapas. Desarrolladas específicamente para servicios de Aire Acondicionado y Refrigeración.
- Equipada con Válvula de Bloqueo. Permite aislar la bomba del sistema en el cual se está produciendo vacío.
- Capacidad para varios refrigerantes
- Doble conexión de entrada
- Manija anatómica de transporte
- Gas Ballast. Permite la entrada de una pequeña cantidad de aire atmosférico, evitando la condensación y prolongando la vida útil del aceite
- Alto vacío final
- Motor Eléctrico con protección incorporada

Dosivac es la empresa líder en el mercado de las Bombas de Vacío, gracias a los altísimos estándares de calidad de sus productos y a la tecnología de última generación de los mismos.



Bombas de Vacío Dosivac

Modelos y Especificaciones



DVR 30

36 l/min " 1,3 cfm

Para sistemas de hasta 5 toneladas: Refrigeración doméstica.



DVR 95

114 l/min " 4,0 cfm

Para sistemas de hasta 25 toneladas: Automoviles / aire acondicionado residencial.



DVR 140

170 l/min " 6,0 cfm

Para sistemas de hasta 50 toneladas: Camionetas, autobuses / aire acondicionado central.



DVR 280

340 l/min " 12,0 cfm

Para sistemas de hasta 65 toneladas.

Bombas de Vacío Dosivac

Serie DVR - Especificaciones

MOD.	DESPLAZ.		VACIO MAX.	MOTOR			DIMENSIONES cm - (pulgadas)			PESO		CONEXIONES
	l/min			HP	R.P.M.		Ancho	Altura	Largo	Kg	Lbs	
	50 Hz	60 Hz			50 Hz	60 Hz						
DVR 30	30	36	50 (0,065)	1/8	2850	3450	12,5 (4,92)	18,0 (7,10)	26,5 (10,4)	5	11	1/4" FLARE 1/2" ACME
	1,1	1,3 cfm										
DVR 95	95	114	15 (0,020)	1/2	1425	1725	14,5 (5,71)	26,5 (10,43)	43,0 (16,93)	13,5	29,76	1/4" FLARE 1/2" ACME
	3,5	4 cfm										
DVR 140	140	170	15 (0,020)	1/2	1425	1725	14,5 (5,71)	26,5 (10,43)	43,0 (16,93)	13,7	30,2	1/4" FLARE 1/2" ACME
	5	6 cfm										
DVR 280	280	340	15 (0,020)	1/2	1425	1725	14,5 (5,71)	30,0 (11,81)	48,0 (18,89)	18	39,65	1/4" FLARE 1/2" ACME
	10	12 cfm										

* Medido con vacuómetro tipo McLeod / Nos reservamos el derecho de modificar las especificaciones técnicas sin previo aviso.

Despiece



- 1) Manija de transporte
- 2) Gas ballast
- 3) Tapón de carga de aceite
- 4) Visor de nivel de aceite
- 5) Tapón de drenaje de aceite
- 6) Cáter
- 7) Base con regatones antideslizantes
- 8) Brida de acople de motor
- 9) Motor eléctrico con protector térmico incorporado
- 10) Válvula de bloqueo con conexiones FLARE y 1/2" ACME
- 11) Tapas de protección con O'Ring