

Desarrollo de un software interactivo para el diseño y selección de bombas centrífugas en
instalaciones hidráulicas

Eduardo David Chaparro Galvis

Manuel Alejandro Hoyos Perdomo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Manuel del Jesús Martínez

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Planteamiento del problema.....	16
2. Justificación	17
3. Objetivos	19
3.1 Objetivo General	19
3.2 Objetivos Específicos.....	19
4. Marco Teórico.....	20
4.1 Sistema hidráulico.....	20
4.1.1 Comportamiento del flujo en la conducción	21
4.1.2 Regímenes y características del flujo.....	22
4.1.3 Pérdidas en la conducción hidráulica.....	23
4.1.4 Pérdidas en accesorios y elementos del sistema	26
4.1.5 Comportamiento global del sistema.....	27
4.2 Bomba centrífuga.....	29
4.2.1 Principio de funcionamiento	30
4.2.2 Curvas características de la bomba centrífuga.....	31
4.2.3 Leyes de afinidad hidráulica	40
4.2.4 Selección de bombas centrífugas	42
4.2.5 Normativa técnica aplicable a la selección de bombas centrífugas	44
4.3 MATLAB.....	45
4.3.1 Funciones y scripts de cálculo	46

4.3.2 Gestión y almacenamiento de datos.....	47
4.3.3 Interfaces gráficas en App Designer.....	47
5. Metodología	49
5.1 Fase I. Análisis de especificaciones técnicas y criterios hidráulicos	49
5.2 Fase II. Desarrollo de las funciones de cálculo.....	50
5.3 Fase III. Desarrollo de la interfaz gráfica y validación del software	51
6. Resultados	53
6.1 Resultados de la Fase I.....	53
6.1.1 Modelado hidráulico del sistema mediante nodos y conexiones	53
6.1.2 Obtención de datos hidráulicos de curvas características	55
6.1.3 Estructuración y almacenamiento de información técnica	58
6.1.4 Definición de criterios técnicos de selección.....	60
6.2 Resultados de la Fase II	62
6.2.1 Desarrollo de las funciones de cálculo hidráulico	63
6.2.2 Gestión y almacenamiento de datos técnicos.....	65
6.2.3 Implementación del algoritmo de selección de bombas	67
6.2.4 Integración funcional del sistema computacional.....	69
6.3 Resultados de la Fase III	71
6.3.1 Desarrollo de la interfaz gráfica del software	71
6.3.2 Integración entre la interfaz y los módulos de cálculo	76
6.3.3 Validación funcional del sistema	77
6.3.4 Evaluación de usabilidad y ajustes finales.....	78
6.4 Alcance y limitaciones de la versión desarrollada	79

7. Conclusiones	80
Referencias Bibliográficas	82

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Estrategia de cálculo del factor de fricción implementada en el software</i>	26
Tabla 2 <i>Comparación de alternativas de ajuste para la curva carga-caudal</i>	34
Tabla 3 <i>Actividades desarrolladas en la Fase I</i>	50
Tabla 4 <i>Actividades desarrolladas en la Fase II</i>	51
Tabla 5 <i>Actividades desarrolladas en la Fase III</i>	52
Tabla 6 <i>Tipos de nodos considerados en el modelo hidráulico</i>	54
Tabla 7 <i>Error de digitalización de las curvas características</i>	57
Tabla 8 <i>Funciones de cálculo hidráulico desarrolladas</i>	64
Tabla 9 <i>Bases de datos técnicas utilizadas por el software</i>	66
Tabla 10 <i>Funciones auxiliares de la interfaz gráfica</i>	74

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Curva característica de la bomba</i>	32
Figura 2 <i>Curva carga-caudal ajustada mediante un polinomio cuadrático</i>	33
Figura 3 <i>Curva característica de eficiencia de la bomba</i>	36
Figura 4 <i>Curva de NPSH requerido de una bomba centrífuga</i>	39
Figura 5 <i>Datos de identificación de las bombas</i>	56
Figura 6 <i>Digitalización de curvas características del fabricante Barnes</i>	57
Figura 7 <i>Ejemplo de datos obtenidos mediante digitalización de curvas</i>	59
Figura 8 <i>Ejemplo de estructura de parámetros técnicos de una bomba</i>	60
Figura 9 <i>Diagrama de flujo del proceso de selección hidráulica, Parte I</i>	61
Figura 10 <i>Diagrama de flujo del proceso de selección hidráulica, Parte II</i>	62
Figura 11 <i>Punto de operación determinado por el algoritmo de selección</i>	68
Figura 12 <i>Arquitectura funcional del motor de cálculo del software</i>	69
Figura 13 <i>Pantalla de construcción de la red hidráulica</i>	72
Figura 14 <i>Pantalla de resumen de nodos y tuberías</i>	73
Figura 15 <i>Pantalla de resultados y memoria de cálculo</i>	74
Figura 16 <i>Reporte hidráulico exportado en formato PDF</i>	77

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Función de generación de la base de datos de bombas

Apéndice B. Base de datos de bombas centrífugas

Apéndice C. Funciones de cálculo y algoritmo de selección

Apéndice D. Bases de datos complementarias

Apéndice E. Funciones de generación de las bases complementarias

Apéndice F. Funciones auxiliares de la interfaz gráfica

Apéndice G. Código de la interfaz gráfica del software

Apéndice H. Reporte hidráulico generado por el software

Glosario

Altura dinámica total (TDH): Carga total que debe suministrar una bomba para transportar un fluido a través de un sistema hidráulico, incluyendo elevación estática y pérdidas de energía.

App Designer: Entorno de desarrollo de MATLAB utilizado para crear interfaces gráficas interactivas mediante componentes visuales y programación orientada a eventos.

Best Efficiency Point (BEP): Condición de operación en la cual la bomba alcanza su máxima eficiencia hidráulica y presenta un funcionamiento más estable.

Bomba centrífuga: Turbomáquina hidráulica encargada de transferir energía al fluido mediante un impulsor rotativo, incrementando su presión y velocidad.

Caudal: Volumen de fluido que atraviesa una sección determinada por unidad de tiempo.

Carga hidráulica: Energía por unidad de peso del fluido expresada en términos de altura.

Cavitación: Fenómeno producido por la formación y colapso de cavidades de vapor debido a descensos locales de presión dentro de la bomba.

Coefficiente de fricción: Parámetro adimensional utilizado para cuantificar las pérdidas de energía por fricción en tuberías.

Curva característica: Representación gráfica del comportamiento hidráulico de una bomba en función del caudal, incluyendo variables como carga, eficiencia, potencia y NPSH.

Curva del sistema: Relación entre el caudal y la carga requerida por una instalación hidráulica para transportar un fluido.

Darcy–Weisbach: Ecuación empleada para calcular pérdidas de energía por fricción en conducciones hidráulicas.

Eficiencia hidráulica: Relación entre la potencia útil transferida al fluido y la potencia suministrada al eje de la bomba.

Factor de servicio: Margen de capacidad adicional considerado en el dimensionamiento del motor para garantizar una operación segura.

Flujo laminar: Régimen de flujo caracterizado por el movimiento ordenado del fluido en capas paralelas.

Flujo turbulento: Régimen de flujo caracterizado por fluctuaciones y mezcla interna del fluido.

Funciones de cálculo: Rutinas programadas en MATLAB destinadas a ejecutar operaciones matemáticas específicas dentro del software.

Impulsor: Elemento rotativo de la bomba encargado de transferir energía mecánica al fluido.

Interpolación: Procedimiento matemático utilizado para estimar valores intermedios dentro de un conjunto de datos conocidos.

Leyes de afinidad: Relaciones matemáticas que describen la variación del caudal, carga y potencia de una bomba ante cambios de velocidad o diámetro del impulsor.

MATLAB: Plataforma de programación y cálculo numérico utilizada para el desarrollo de aplicaciones de ingeniería y análisis computacional.

NPSH (Net Positive Suction Head): Parámetro que representa la carga de presión disponible o requerida en la succión de la bomba para evitar cavitación.

Pérdidas mayores: Pérdidas de energía asociadas a la fricción del fluido a lo largo de una tubería.

Pérdidas menores: Pérdidas de energía generadas por accesorios, válvulas, codos y cambios geométricos en la conducción.

Potencia hidráulica: Energía transferida al fluido por unidad de tiempo durante el proceso de bombeo.

Punto de operación: Condición hidráulica determinada por la intersección entre la curva de la bomba y la curva del sistema.

Régimen de flujo: Comportamiento del movimiento del fluido dentro de una conducción, clasificado como laminar, transicional o turbulento.

Scripts: Secuencias de instrucciones programadas en MATLAB utilizadas para ejecutar procesos automatizados.

Sistema hidráulico: Conjunto de elementos encargados de transportar un fluido desde un punto de suministro hasta un punto de demanda.

Velocidad específica: Parámetro adimensional utilizado para clasificar bombas según su geometría y condiciones de operación.

Voluta: Carcasa de la bomba diseñada para transformar parte de la energía cinética del fluido en energía de presión.

Resumen

Título: Desarrollo de un software interactivo para el diseño y selección de bombas centrífugas en instalaciones hidráulicas*

Autor: Eduardo David Chaparro Galvis, Manuel Alejandro Hoyos Perdomo**

Palabras Clave: bombas centrífugas, software de selección, diseño de sistemas hidráulicos.

Descripción: El consumo energético asociado a sistemas de bombeo con bombas centrífugas representa entre el 20 % y el 25 % de la energía eléctrica industrial mundial y hasta un 30 % de esa energía se desperdicia por selección inadecuada del equipo; en el contexto académico y profesional esta problemática se agrava por la ausencia de herramientas especializadas de acceso abierto que integren criterios hidráulicos normalizados con datos reales de fabricantes. Con el fin de cerrar esa brecha, el presente trabajo desarrolló un software interactivo en MATLAB que combina una base de datos de curvas características de un fabricante de referencia, un algoritmo de selección basado en la determinación numérica del punto de operación mediante la intersección de la curva del sistema con las curvas características interpoladas del fabricante, la verificación de la proximidad al punto de mejor eficiencia (BEP) y el reporte del NPSH requerido en el punto de operación, y una interfaz gráfica construida en App Designer con capacidad de exportación de reportes en PDF. La metodología se organizó en tres fases: estructuración de la base de datos técnica del fabricante, desarrollo del software y validación mediante casos documentados en la literatura. Los resultados muestran errores relativos inferiores al 2 % respecto a los valores de referencia del fabricante confirmando su viabilidad como herramienta de apoyo tanto al ejercicio profesional como a la formación de ingenieros mecánicos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Manuel del Jesús Martínez. Doctor en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Development of interactive software for the design and selection of centrifugal pumps in hydraulic installations*

Author: Eduardo David Chaparro Galvis, Manuel Alejandro Hoyos Perdomo**

Key Words: centrifugal pumps, pump selection software, hydraulic system design

Description: Energy consumption associated with centrifugal pump systems accounts for between 20% and 25% of global industrial electricity use, and up to 30% of that energy is wasted due to inadequate equipment selection; in academic and professional contexts, this problem is compounded by the absence of open-access specialized tools that integrate standardized hydraulic criteria with real manufacturer data. To address this gap, the present work developed an interactive software in MATLAB that combines a database of characteristic curves from a reference manufacturer, a selection algorithm based on the numerical determination of the operating point through the intersection of the system curve with the interpolated manufacturer characteristic curves, the verification of proximity to the Best Efficiency Point (BEP), and the reporting of the required NPSH at the operating point, and a graphical user interface built in App Designer with PDF report export capability. The methodology was organized into three phases: structuring the manufacturer's technical database, developing the software, and validating it against cases documented in the specialized literature. Results show relative errors below 2% with respect to manufacturer reference values, confirming the tool's viability as a support resource for both professional engineering practice and the training of mechanical engineering students.

* Degree Work

** Faculty of Physic-mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Director Manuel del Jesús Martínez, PhD in Mechanical Engineering

Introducción

El agua es el recurso más transportado en la industria moderna. Detrás de cada sistema de distribución de agua potable, de cada planta de tratamiento, de cada proceso de enfriamiento industrial o de cada instalación de riego a presión, existe una bomba centrífuga operando como corazón hidráulico del sistema. Se trata de la turbomáquina más extendida en el mundo: representa más del 70 % de las bombas instaladas globalmente y consume, en conjunto, entre el 20 % y el 25 % de la energía eléctrica industrial a escala mundial. La magnitud de estas cifras convierte a la selección correcta del equipo de bombeo en una decisión de ingeniería con consecuencias directas sobre la eficiencia energética, los costos operativos y la confiabilidad de una instalación.

Seleccionar una bomba centrífuga no consiste simplemente en elegir un equipo que mueva un caudal determinado contra una presión dada. Es un proceso de ingeniería que exige verificar simultáneamente la compatibilidad de la curva característica H-Q del equipo con la curva resistente del sistema, evaluar el margen de NPSH disponible para prevenir cavitación, confirmar que el punto de operación se ubique dentro del rango de eficiencia aceptable, idealmente próximo al Best Efficiency Point (BEP), y dimensionar el motor con el factor de servicio adecuado. Cada uno de estos criterios involucra cálculos iterativos, interpolación de datos de catálogo y juicio de ingeniería. Cuando este proceso se realiza manualmente o con hojas de cálculo de propósito general, el riesgo de errores de transcripción, inconsistencias entre parámetros y sobredimensionamiento del equipo es significativo.

En el contexto académico y profesional hispanoamericano, esta problemática se ve agravada por la escasez de herramientas especializadas de acceso abierto. Las plataformas comerciales de selección (Pump-Flo, los selectores en línea de Grundfos o KSB) requieren licencias o están restringidas a los catálogos del propio fabricante y no exponen al usuario los

fundamentos de cálculo subyacentes, lo que limita su valor pedagógico. Las herramientas de simulación de flujo como ANSYS Fluent o EPANET, por su parte, no están diseñadas para la selección paramétrica de equipos según catálogo. Esta brecha es especialmente relevante en programas de formación en ingeniería mecánica, donde los estudiantes necesitan no solo obtener una selección, sino entender y visualizar los criterios que la respaldan.

En el ámbito académico se han reportado desarrollos orientados a cerrar esta brecha. Galiano Martínez (2015) desarrolló en la Universidad de Jaén una interfaz gráfica en MATLAB para la caracterización de bombas centrífugas y la obtención de sus curvas características; Pérez-Barreto (2004) propuso un procedimiento de evaluación y selección de bombas centrífugas basado en la velocidad específica y el rendimiento nominal; y en el ámbito hispanoamericano se han publicado herramientas de escritorio orientadas a la evaluación hidráulica de sistemas de bombeo, como el software BOMBAS (HidraSoftware, s.f.). Estos antecedentes, sin embargo, suelen limitarse a la caracterización de una bomba específica, a procedimientos de cálculo sin implementación computacional integrada o a soluciones de código cerrado, sin reunir en una misma plataforma abierta la construcción de la red, una base de datos de curvas reales de fabricante, el algoritmo de selección y la generación automática de la memoria de cálculo. Esa integración, junto con la posibilidad de ampliar la base de datos mediante digitalización de catálogos, constituye el aporte diferencial del presente trabajo.

Ante este panorama, el presente trabajo de grado propone el desarrollo de un software interactivo en MATLAB orientado a la selección de bombas centrífugas en instalaciones hidráulicas. La herramienta integra, en una sola plataforma, las especificaciones técnicas de un fabricante de referencia almacenadas en bases de datos nativas (.mat), un algoritmo de cálculo hidráulico basado en las leyes de semejanza y los criterios normativos de selección, y una interfaz

gráfica de usuario desarrollada en App Designer que permite al ingeniero, o al estudiante, ingresar los parámetros del sistema, visualizar la intersección de curvas y obtener un reporte de selección exportable. El alcance del proyecto cubre desde la estructuración de la base de datos hasta la validación técnica y de usabilidad del software con usuarios del ámbito de la ingeniería.

El documento se organiza en seis capítulos. El capítulo 1 delimita el problema de investigación y su contexto. El capítulo 2 sustenta la pertinencia del proyecto desde las perspectivas técnica, académica, económica y ambiental. El capítulo 3 presenta el objetivo general y específicos. El capítulo 4 desarrolla el marco teórico que fundamenta el algoritmo de selección, abarcando la hidráulica de turbomáquinas, las curvas características, los criterios normativos y el estado del arte en herramientas de software. El capítulo 5 describe la metodología organizada en tres fases de trabajo. El capítulo 6 presenta los resultados, su análisis y las conclusiones del proyecto.

1. Planteamiento del problema

La selección de bombas centrífugas en sistemas hidráulicos constituye un desafío técnico que afecta directamente la eficiencia energética y la confiabilidad de las instalaciones. El proceso tradicional, basado en la interpretación manual de catálogos y cálculos dispersos en hojas de trabajo, expone al ingeniero a errores de transcripción, sobredimensionamiento del equipo y decisiones poco óptimas desde el punto de vista operativo. Esta dificultad se agrava por la necesidad de correlacionar simultáneamente variables como caudal, altura de bombeo, eficiencia y potencia, cuya interacción depende de las curvas características y de las condiciones específicas de operación.

En el ámbito académico, la problemática se traduce en una limitación pedagógica: los estudiantes carecen de herramientas que les permitan experimentar de manera interactiva con configuraciones hidráulicas y visualizar el efecto de los parámetros sobre el punto de operación de la bomba. La ausencia de plataformas abiertas y didácticas restringe la comprensión integral de los fundamentos de selección y reduce la capacidad de aplicar la teoría en escenarios prácticos.

Ante este panorama, surge la pregunta de investigación que orienta el presente trabajo: ¿Cómo diseñar e implementar un software interactivo en MATLAB que integre datos de catálogo y algoritmos hidráulicos para facilitar la selección confiable y pedagógica de bombas centrífugas en sistemas hidráulicos?

2. Justificación

La pertinencia de este proyecto radica en que la correcta selección de bombas centrífugas tiene consecuencias directas sobre la eficiencia energética, la durabilidad de los equipos y los costos de operación. Un software que automatice la verificación del punto de operación respecto al BEP y que integre las variables hidráulicas en un entorno único reduce significativamente el riesgo de errores y optimiza el desempeño de las instalaciones.

En términos cuantitativos, la herramienta reduce el tiempo del proceso de selección desde el orden de una hora que exige el procedimiento manual sobre catálogo hasta menos de diez minutos por caso de estudio, elimina los errores de transcripción e interpolación visual propios de la lectura manual de curvas, y favorece selecciones próximas al BEP, condición determinante del costo energético del ciclo de vida del sistema de bombeo, que constituye la fracción dominante de su costo total.

Desde la perspectiva académica, la herramienta propuesta constituye un recurso innovador para la formación en ingeniería mecánica, al permitir que los estudiantes relacionen los fundamentos teóricos con aplicaciones prácticas en un entorno interactivo. Su incorporación en cursos de hidráulica y turbomáquinas fortalece el aprendizaje y fomenta la experimentación con parámetros de diseño en tiempo real.

En el plano económico y ambiental, la selección adecuada de bombas contribuye a disminuir el consumo energético y, por ende, los costos asociados y las emisiones de gases de efecto invernadero. Este aporte se alinea con las políticas de eficiencia energética y sostenibilidad vigentes en Colombia, reforzando la relevancia del proyecto en el contexto nacional.

Finalmente, la viabilidad está asegurada por la disponibilidad de MATLAB en la Universidad Industrial de Santander, la accesibilidad a datos técnicos de fabricantes y la formación

de los autores en hidráulica y programación. De este modo, el proyecto no solo responde a una necesidad práctica, sino que ofrece un impacto positivo en la ingeniería, la educación y el medio ambiente.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Desarrollar un software interactivo para seleccionar bombas centrífugas en instalaciones hidráulicas, utilizando especificaciones técnicas detalladas del fabricante para asegurar que las opciones de selección cumplan con los requisitos de caudal, presión y eficiencia.

3.2 Objetivos Específicos

Identificar y analizar las especificaciones técnicas del fabricante para determinar los criterios de caudal, presión y eficiencia necesarios en la selección de bombas centrífugas en instalaciones hidráulicas.

Desarrollar un módulo de selección de bombas que permita al usuario ingresar valores específicos de caudal y presión y obtenga opciones de bombas compatibles, basado en un algoritmo de cálculo que emplee las especificaciones técnicas del fabricante.

Validar el funcionamiento y la precisión del software mediante pruebas, implementando ajustes en el módulo de selección en función de los resultados obtenidos para asegurar una experiencia de uso adecuada.

4. Marco Teórico

4.1 Sistema hidráulico

El sistema hidráulico constituye el conjunto de elementos a través de los cuales se transporta un fluido desde un punto de suministro hasta un punto de demanda, bajo condiciones que dependen de la geometría de la red, las propiedades del fluido y los requerimientos operativos. Su comportamiento está gobernado por la interacción entre la energía disponible, las pérdidas generadas durante el movimiento y las características físicas de la conducción. Comprender este comportamiento es esencial para establecer la relación entre caudal y carga requerida, la cual define la respuesta global del sistema ante diferentes condiciones de operación.

El análisis del sistema se fundamenta en la aplicación de principios de conservación, principalmente la conservación de la energía, que permite describir cómo se distribuyen los términos de presión, velocidad y elevación a lo largo de la conducción. A partir de esta formulación se identifican los mecanismos que generan pérdidas, tanto por fricción en las tuberías como por la presencia de accesorios y elementos que modifican el flujo. Estas pérdidas determinan la magnitud de la carga necesaria para transportar un caudal específico y, por tanto, condicionan el desempeño del sistema.

La integración de todos estos efectos conduce a la construcción de la curva del sistema, una representación funcional que relaciona el caudal con la carga requerida para vencer las pérdidas y alcanzar el punto de entrega. Esta curva constituye la base para el proceso de selección de equipos de bombeo, ya que su intersección con la curva característica de la bomba define el punto de operación. Por ello, el estudio detallado del sistema hidráulico es un componente indispensable para el desarrollo de herramientas computacionales orientadas a la selección técnica de bombas.

4.1.1 Comportamiento del flujo en la conducción

El comportamiento del flujo en un sistema hidráulico se describe a partir de la ecuación de energía, que relaciona las variaciones de carga entre dos puntos de una conducción. Esta formulación permite integrar los efectos de presión, velocidad, elevación y pérdidas, proporcionando la base física para representar el funcionamiento global del sistema. Su aplicación es válida siempre que el fluido sea incompresible y el flujo se mantenga en régimen permanente, condiciones típicas en sistemas de bombeo industrial. La ecuación de energía entre dos secciones 1 y 2 se expresa en la Ecuación 1.

Ecuación 1. Ecuación de energía

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

Donde

P: Presión [Pa]

γ : Peso específico [N/m³]

z: Elevación [m]

V: Velocidad [m/s]

g: Gravedad [m/s²]

H_B : Carga aportada por la bomba [m]

h_L : Pérdidas totales [m]

4.1.2 Regímenes y características del flujo

El régimen de flujo describe la forma en que el fluido se desplaza dentro de la tubería y determina la estructura interna del movimiento. Este comportamiento depende de la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas, lo cual se cuantifica mediante el número de Reynolds, cuyo calculo se describe en Ecuación 2. La identificación correcta del régimen es fundamental porque condiciona la distribución de velocidades, la estabilidad del flujo y las ecuaciones que gobiernan las pérdidas por fricción.

Ecuación 2. Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Donde

Re: Número de Reynolds [-]

P: Densidad [kg/m³]

V: Velocidad [m/s]

D: Diámetro interno [m]

μ: Viscosidad dinámica [Pa·s]

Los límites aceptados para cada régimen son:

- Flujo laminar: $Re < 2000$
- Flujo de transición: $2000 \leq Re \leq 4000$
- Flujo turbulento: $Re > 4000$

Estos límites permiten seleccionar la ecuación adecuada para el cálculo del factor de fricción, lo cual impacta directamente la forma de la curva del sistema. En flujo laminar, el

movimiento es ordenado y las partículas se desplazan en capas paralelas, lo que genera un perfil de velocidad parabólico y pérdidas proporcionales a la velocidad. En flujo turbulento, el movimiento es caótico, con mezcla transversal y fluctuaciones de velocidad, lo que incrementa la disipación de energía y hace que las pérdidas dependan del cuadrado de la velocidad. Entre ambos aparece el régimen transicional, donde el comportamiento es inestable y no se recomienda aplicar modelos simplificados.

4.1.3 Pérdidas en la conducción hidráulica

Las pérdidas por fricción representan la energía disipada debido al contacto del fluido con las paredes de la tubería. Su magnitud depende del régimen de flujo, la rugosidad relativa y la longitud de la conducción. La ecuación de Darcy–Weisbach, presentada en la Ecuación 3, constituye la formulación más general y rigurosa para cuantificar estas pérdidas, válida tanto en flujo laminar como turbulento.

Ecuación 3. Pérdidas por fricción (Darcy–Weisbach)

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Donde

h_f : Pérdida por fricción [m]

f : factor de fricción [-]

L : Longitud de la tubería [m]

D : Diámetro interno [m]

V : Velocidad [m/s]

g: Gravedad [m/s²]

El parámetro crítico en esta ecuación es el factor de fricción f , el cual depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa ε/D . Su determinación requiere modelos empíricos que representan el comportamiento real del flujo en tuberías. Algunos de los modelos para su determinación se enlistan a continuación.

- Colebrook–White: Modelo universal para flujo turbulento, combina efectos de rugosidad y viscosidad. Descrita en la Ecuación 4.
- Swamee–Jain: Aproximación directa para flujo turbulento, muy usada en software. Descrita en la Ecuación 5.
- Churchill: Modelo robusto que cubre flujo laminar, transición y turbulento. Descrita en la Ecuación 6.

Ecuación 4. Colebrook–White (implícita)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Donde

f : factor de fricción [-]

D : Diámetro interno [m]

ε : Rugosidad absoluta [m]

Re : Número de Reynolds [-]

Ecuación 5. Swamee–Jain (explícita)

$$f = 0.25 \left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2}$$

Donde

f: factor de fricción [-]

D: Diámetro interno [m]

ε : Rugosidad absoluta [m]

Re: Número de Reynolds [-]

Ecuación 6. Churchill (válida para todo Re)

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{1.5}} \right]^{1/12}, \text{ donde } A = \left[2.457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} 0.27 \frac{\varepsilon}{D}} \right) \right]^{16}, B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

Donde

f: factor de fricción [-]

D: Diámetro interno [m]

ε : Rugosidad absoluta [m]

Re: Número de Reynolds [-]

Si bien las tres formulaciones anteriores permiten estimar el factor de fricción, el software implementa una estrategia por régimen de flujo: en flujo laminar ($Re < 2300$) se utiliza la solución analítica exacta $f = 64/Re$; en flujo turbulento se resuelve la ecuación de Colebrook–White, seleccionada por ser la formulación de referencia frente a la cual se derivaron las aproximaciones explícitas y por ofrecer la mayor exactitud reportada en la literatura (Colebrook, 1939; Moody, 1944). La ecuación de Colebrook–White es implícita en f, por lo que su solución se obtiene

numéricamente mediante un esquema iterativo de punto fijo sobre la forma explícita en $1/\sqrt{f}$, con una tolerancia de convergencia de 1×10^{-6} y un valor inicial obtenido con la aproximación explícita de Swamee–Jain (Ecuación 5), lo que garantiza la convergencia en pocas iteraciones. La Tabla 1 resume esta estrategia.

Tabla 1

Estrategia de cálculo del factor de fricción implementada en el software

Régimen de flujo	Criterio	Modelo utilizado	Justificación
Laminar	$Re < 2300$	$f = 64/Re$	Solución analítica exacta del flujo de Hagen–Poiseuille
Transición	$2300 \leq Re \leq 4000$	Colebrook–White (se adopta el tratamiento turbulento desde $Re = 2300$)	Criterio conservador: en la zona de incertidumbre física sobreestima levemente las pérdidas, lo que conduce a selecciones del lado de la seguridad
Turbulento	$Re > 4000$	Colebrook–White (solución iterativa, inicializada con Swamee–Jain)	Formulación de referencia con la mayor exactitud reportada; Swamee–Jain como semilla garantiza convergencia rápida

4.1.4 Pérdidas en accesorios y elementos del sistema

Los accesorios introducen pérdidas adicionales asociadas a cambios de dirección, área o restricciones del flujo. Estas pérdidas se representan mediante coeficientes adimensionales que permiten cuantificar su efecto sin necesidad de modelar el detalle geométrico. La suma de estos

elementos puede ser significativa y debe integrarse en la ecuación de energía para obtener una representación realista del sistema. La pérdida local se expresa en la Ecuación 7.

Ecuación 7. Pérdidas en accesorios

$$h_m = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Donde

h_m : Pérdida local [m]

K : Coeficiente del accesorio [-]

V : Velocidad [m/s]

Cada accesorio posee un coeficiente K característico, determinado experimentalmente. La suma de todas las pérdidas locales se incorpora junto con las pérdidas por fricción para obtener la pérdida total del sistema.

4.1.5 Comportamiento global del sistema

El comportamiento global del sistema se obtiene al integrar las pérdidas mayores y menores dentro de la ecuación de energía, generando una relación entre el caudal y la carga requerida para transportarlo. Esta relación constituye la curva del sistema, la cual aumenta de forma no lineal con el caudal debido a la dependencia cuadrática de las pérdidas. La curva del sistema es fundamental para el proceso de selección de bombas, ya que su intersección con la curva característica del equipo determina el punto de operación. Una forma simplificada de representar la curva del sistema se describe en Ecuación 8.

Ecuación 8. Ecuación global del sistema hidráulico

$$Hs(Q) = H_{est} + a \cdot Q^2$$

Donde

Hs: Carga requerida por el sistema [m]

H_{est}: Carga estática [m]

a: Coeficiente global de pérdidas [m/(m³/s)²]

Q: Caudal [m³/s]

Computacionalmente, la curva del sistema se construye evaluando la carga requerida sobre un vector discreto de caudales alrededor del punto de operación. Para cada caudal Q del vector se calcula la velocidad en cada tramo, el número de Reynolds, el factor de fricción correspondiente al régimen identificado, las pérdidas por fricción mediante Darcy–Weisbach y las pérdidas menores mediante el método del coeficiente K; la suma de la carga estática, la diferencia de presiones y las pérdidas totales produce el valor Hs(Q). El conjunto de pares (Q, Hs) resultante constituye la curva del sistema utilizada por el algoritmo de selección, tal como se implementa en la función `resolver_sistema.m` descrita en el capítulo de resultados.

En síntesis, la caracterización detallada del sistema hidráulico permite establecer con precisión la demanda energética que debe ser satisfecha por el equipo de bombeo. La identificación del régimen de flujo, la cuantificación rigurosa de las pérdidas y la construcción de la curva del sistema proporcionan una representación fiel de las condiciones reales bajo las cuales operará la instalación. Esta información constituye un insumo fundamental para el desarrollo de la herramienta computacional propuesta en este proyecto, ya que el algoritmo de selección depende directamente de la exactitud con la que se describa el comportamiento hidráulico. De este modo, el análisis realizado en esta sección no solo define el marco físico del problema, sino que también

establece los parámetros que condicionan el desempeño de la bomba, dando paso al estudio de sus características operativas en la siguiente sección.

4.2 Bomba centrífuga

La bomba centrífuga es el equipo encargado de suministrar la energía necesaria para vencer la carga requerida por el sistema hidráulico. Su funcionamiento se basa en la transferencia de energía mecánica desde un impulsor en rotación hacia el fluido, generando un incremento de presión y velocidad que permite su desplazamiento a través de la conducción. Debido a su simplicidad, confiabilidad y capacidad para manejar caudales variables, este tipo de bomba es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales, lo que la convierte en el equipo de referencia para el presente proyecto.

El comportamiento hidráulico de la bomba se describe mediante curvas características que relacionan la carga generada, el caudal suministrado y la potencia requerida. Estas curvas reflejan la respuesta real del equipo bajo diferentes condiciones de operación y permiten identificar el punto en el cual la bomba trabaja de manera estable. La forma de estas curvas depende de la geometría del impulsor, la velocidad de rotación y las condiciones del fluido, por lo que constituyen una representación directa del desempeño del equipo.

La interacción entre la curva de la bomba y la curva del sistema determina el punto de operación, entendido como la combinación de caudal y carga en la cual ambas curvas se intersecan. Este punto representa el equilibrio entre la energía que la bomba puede entregar y la energía que el sistema demanda. Por esta razón, la selección adecuada de una bomba requiere no solo conocer sus características propias, sino también comprender con precisión el comportamiento hidráulico del sistema, tal como se desarrolló en la sección anterior.

En el contexto del presente proyecto, la caracterización de la bomba es fundamental para el desarrollo de la herramienta computacional de selección. El software debe ser capaz de interpretar las curvas características, interpolar valores intermedios y compararlos con la curva del sistema para identificar el punto de operación. Además, debe evaluar parámetros adicionales como eficiencia, potencia requerida y margen de operación, con el fin de garantizar que la selección final sea técnicamente adecuada y consistente con las condiciones reales del proceso.

4.2.1 Principio de funcionamiento

El funcionamiento de la bomba centrífuga se basa en la transferencia continua de energía desde un elemento rotativo hacia el fluido. Este proceso ocurre en el impulsor, donde la rotación genera un incremento de velocidad y cantidad de movimiento que posteriormente se transforma parcialmente en presión dentro de la carcasa. Como resultado, el fluido adquiere la energía necesaria para desplazarse a través del sistema hidráulico y vencer las pérdidas presentes en la conducción.

El proceso inicia con el ingreso del fluido al ojo del impulsor en dirección axial. A medida que el impulsor gira, las partículas son aceleradas radialmente hacia la periferia debido a la acción dinámica de los álabes. Posteriormente, el fluido pasa a la voluta o difusor, donde la disminución gradual de velocidad permite convertir parte de la energía cinética en energía de presión. Este mecanismo constituye el principio fundamental mediante el cual la bomba desarrolla carga hidráulica.

La energía transferida al fluido depende de variables como la velocidad periférica del impulsor, la geometría de los álabes y las componentes de velocidad del flujo a la entrada y salida del rodete. Estas relaciones pueden describirse mediante la ecuación de Euler para turbomáquinas,

presentada en la Ecuación 9, la cual representa la base teórica del funcionamiento hidráulico de las bombas centrífugas.

Ecuación 9. Ecuación de Euler para bombas centrífugas

$$H = \frac{U_2 V_{u2} - U_1 V_{u1}}{g}$$

Donde

H : Altura transferida al fluido [m]

U : Velocidad periférica del impulsor [m/s]

V_u : Componente tangencial de la velocidad absoluta [m/s]

g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

Los subíndices 1 y 2 corresponden a las condiciones de entrada y salida del impulsor, respectivamente.

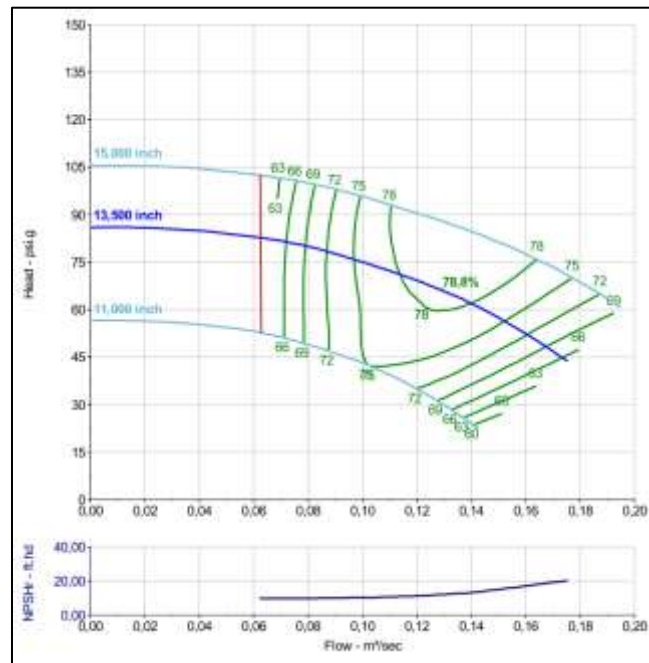
4.2.2 Curvas características de la bomba centrífuga

Las curvas características representan el comportamiento hidráulico real de la bomba y permiten evaluar su desempeño bajo diferentes condiciones de operación. Estas curvas se obtienen experimentalmente y describen la relación entre la carga generada, el caudal suministrado, la potencia requerida y la eficiencia del equipo. En la práctica, la curva carga-caudal es la más relevante para el proceso de selección, ya que define la capacidad de la bomba para suministrar energía al fluido. En la Figura 1 se muestra la forma típica de estas curvas, donde se observa la

tendencia descendente de la carga con el aumento del caudal, el incremento progresivo de la potencia y la presencia de un punto de máxima eficiencia.

Figura 1

Curva característica de la bomba



Nota. Representación original de fábrica extraída del software *PipeFlow Expert*.

La curva carga-caudal puede representarse mediante un ajuste polinómico que facilita su uso en cálculos computacionales. Esta aproximación permite interpolar valores intermedios y modelar el comportamiento de la bomba dentro del algoritmo de selección. La expresión general utilizada en este proyecto se presenta en la Ecuación 10. La Figura 2 ilustra el ajuste obtenido, el cual reproduce adecuadamente la forma descendente de la relación entre la carga generada y el caudal suministrado.

Ecuación 10. Representación polinómica de la curva carga-caudal

$$H(Q) = A - BQ - CQ^2$$

Donde

H: Altura de energía suministrada por la bomba [m]

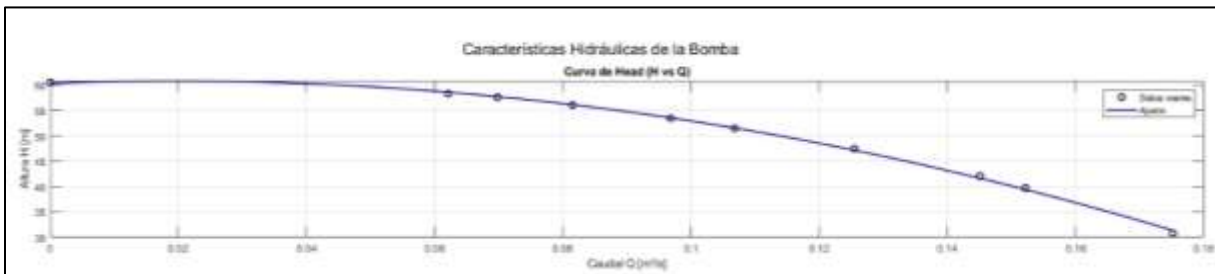
A: Coeficiente independiente del polinomio [m]

B: Coeficiente lineal del polinomio [m/(m³/s)]

C: Coeficiente cuadrático del polinomio [m/(m³/s)²]

Figura 2

Curva carga-caudal ajustada mediante un polinomio cuadrático



Nota. Ajuste polinómico de segundo grado aplicado sobre los puntos digitalizados de la curva característica del fabricante Barnes de Colombia S.A. (2026).

La elección del polinomio de segundo grado no es arbitraria. Para verificar su suficiencia se compararon ajustes de distinto orden sobre las curvas digitalizadas del fabricante, evaluando el coeficiente de determinación R^2 y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de cada alternativa. La Tabla 2 presenta los resultados para una bomba representativa de la base de datos.

Tabla 2*Comparación de alternativas de ajuste para la curva carga-caudal*

Alternativa de ajuste	R²	RMSE [m]	Observación
Polinomio grado 2	0,996	0,42	Reproduce la forma descendente; coeficientes con interpretación física; monótono en el rango de operación
Polinomio grado 3	0,998	0,31	Mejora marginal del ajuste; riesgo de oscilación e inflexiones espurias en los extremos del rango
Interpolación spline / PCHIP	1,000	0,00	Pasa exactamente por los puntos digitalizados; sin forma funcional cerrada; hereda el ruido de la digitalización

La representación de la curva carga-caudal constituye únicamente una parte del comportamiento hidráulico de la bomba. En condiciones reales de operación, el desempeño del equipo también se describe mediante curvas complementarias de eficiencia, potencia y NPSH requerido, las cuales permiten evaluar la estabilidad hidráulica, el consumo energético y las condiciones de succión del sistema. El análisis conjunto de estas curvas proporciona una caracterización integral del funcionamiento de la bomba centrífuga y constituye la base técnica para los procedimientos modernos de selección.

La eficiencia de la bomba expresa la capacidad del equipo para transformar la potencia mecánica suministrada en energía hidráulica útil. Debido a las pérdidas hidráulicas, mecánicas y volumétricas presentes en el interior de la bomba, únicamente una fracción de la potencia entregada al eje se convierte en energía efectiva sobre el fluido. La eficiencia varía con el caudal y alcanza un valor máximo en una condición específica de operación conocida como BEP (*Best Efficiency Point*). Operar cerca de esta región reduce vibraciones, recirculaciones internas y desgaste prematuro de los componentes hidráulicos. La eficiencia hidráulica de la bomba puede expresarse mediante la relación presentada en la Ecuación 11.

Ecuación 11. Eficiencia hidráulica de la bomba

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P}$$

Donde

η : Eficiencia de la bomba [-]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

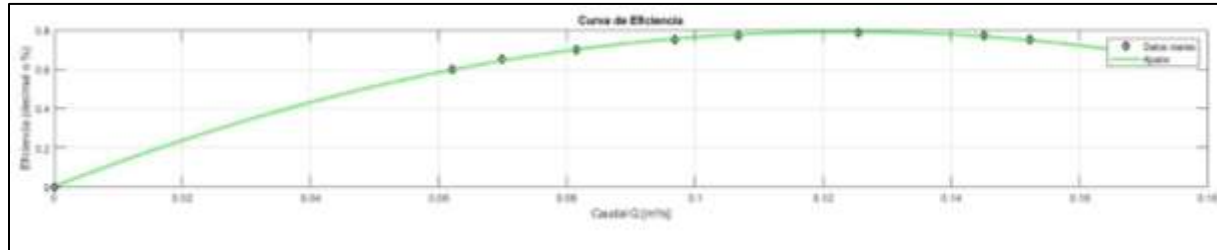
g : Gravedad [m/s²]

Q : Caudal [m³/s]

H : Altura suministrada por la bomba [m]

P : Potencia suministrada al eje [W]

La variación típica de la eficiencia respecto al caudal se muestra en la Figura 3. Se observa que la curva presenta una región máxima correspondiente al punto de mejor eficiencia, mientras que la operación a caudales inferiores o superiores produce una disminución progresiva del rendimiento energético.

Figura 3*Curva característica de eficiencia de la bomba*

Nota. Representación típica de la variación de eficiencia respecto al caudal en bombas centrífugas.

De manera complementaria, los fabricantes suministran la curva de potencia requerida, la cual describe la variación de la potencia consumida por la bomba en función del caudal. Esta curva es fundamental para el dimensionamiento del motor eléctrico, ya que permite verificar que la potencia disponible sea suficiente para cubrir las condiciones de operación previstas sin riesgo de sobrecarga. La potencia hidráulica transferida al fluido se expresa mediante la Ecuación 12.

Ecuación 12. Potencia hidráulica de la bomba

$$P_h = \rho g Q H$$

Donde

P_h : Potencia hidráulica [W]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

Q : Caudal [m³/s]

H : Altura generada por la bomba [m]

La potencia requerida al eje es superior a la potencia hidráulica debido a las pérdidas presentes en el equipo. Su relación con la eficiencia se expresa mediante la Ecuación 13.

Ecuación 13. Potencia al eje de la bomba

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta}$$

Donde

P : Potencia suministrada al eje [W]

η : Eficiencia hidráulica de la bomba [-]

Además de las curvas de carga, eficiencia y potencia, las bombas centrífugas poseen una curva de NPSH requerido (Net Positive Suction Head Required), la cual establece la carga mínima de presión necesaria en la succión para evitar fenómenos de cavitación durante la operación. Esta curva constituye un criterio fundamental de selección, ya que permite verificar la compatibilidad entre las condiciones hidráulicas del sistema y los requerimientos de succión de la bomba.

El NPSH requerido depende principalmente del caudal de operación y de las condiciones internas de flujo en la región de entrada del impulsor. A medida que el caudal aumenta, las velocidades internas y las pérdidas hidráulicas en la succión también se incrementan, provocando un aumento progresivo del NPSH requerido. Cuando la presión absoluta del fluido desciende por debajo de su presión de vapor, se forman cavidades de vapor que posteriormente colapsan al ingresar a regiones de mayor presión. Este fenómeno, conocido como cavitación, produce ruido, vibraciones, erosión superficial y pérdida de desempeño hidráulico. Para garantizar una operación estable, el NPSH disponible del sistema debe ser superior al NPSH requerido por la bomba, tal como se expresa en la Ecuación 14.

Ecuación 14. Condición de operación sin cavitación

$$NPSH_d > NPSH_r$$

Donde

$NPSH_d$: NPSH disponible del sistema [m]

$NPSH_r$: NPSH requerido por la bomba [m]

El NPSH disponible depende de la instalación y se determina a partir de la presión absoluta en la superficie del líquido, la presión de vapor del fluido a la temperatura de operación, la diferencia de elevación en la succión y las pérdidas en la línea de succión, según la Ecuación 15:

Ecuación 15. NPSH disponible del sistema

$$NPSH_d = \frac{P_{abs} - P_v}{\rho g} + z_s - h_{f_s}$$

Donde

P_{abs} : Presión absoluta en la superficie del líquido [Pa].

P_v : Presión de vapor del fluido a la temperatura de operación [Pa].

ρ : Densidad del fluido [kg/m³].

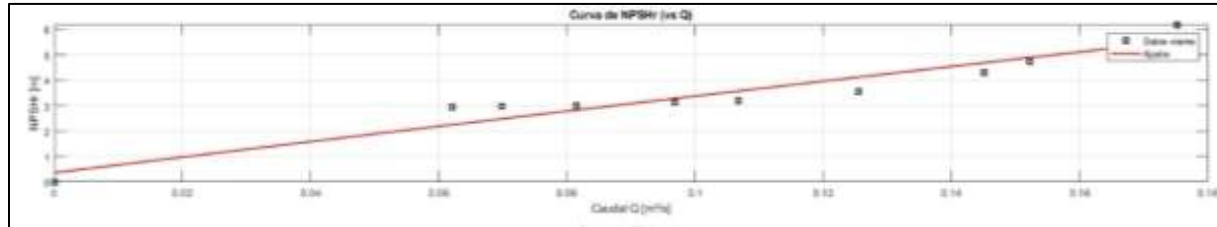
g : Aceleración de la gravedad [m/s²].

z_s : Carga estática de succión, positiva si el nivel está por encima del eje de la bomba [m].

h_{f_s} : Pérdidas totales en la línea de succión [m].

En la versión actual del software, el algoritmo interpola y reporta el NPSH requerido por la bomba en el punto de operación, de modo que el usuario disponga del dato necesario para verificar la condición de la Ecuación 14 frente al NPSH disponible de su instalación. El cálculo automático del NPSH disponible y la verificación interna de la condición de no cavitación se identifican como una extensión directa de la herramienta, tal como se plantea en las conclusiones.

La Figura 4 presenta el comportamiento típico de la curva de NPSH requerido en función del caudal para una bomba centrífuga operando a velocidad constante.

Figura 4*Curva de NPSH requerido de una bomba centrífuga*

Nota. Representación típica de la variación del NPSH requerido respecto al caudal de operación.

La integración de las curvas de carga, eficiencia, potencia y NPSH permite caracterizar de manera integral el comportamiento hidráulico de la bomba centrífuga. Estas curvas constituyen la base técnica para los procesos de selección y análisis de operación, debido a que permiten identificar condiciones de funcionamiento estables, energéticamente eficientes y compatibles con las restricciones hidráulicas del sistema. En el contexto del presente proyecto, dichas relaciones son utilizadas dentro del algoritmo computacional para evaluar la compatibilidad entre las condiciones del sistema y las características operativas de las bombas almacenadas en la base de datos del software.

Desde el punto de vista numérico, el error total de los resultados del software se compone de tres fuentes: el error de digitalización de las curvas de catálogo, el error del ajuste o interpolación sobre los puntos digitalizados y la tolerancia de convergencia de la solución iterativa de Colebrook–White. Dado que la digitalización constituye la componente dominante (véase la Tabla 8 en los resultados de la Fase I) y que la tolerancia de convergencia adoptada es de 1×10^{-6} , el error propagado al punto de operación se mantiene acotado dentro del 2 % reportado en la validación. Asimismo, el método de interpolación lineal empleado para las curvas de eficiencia, potencia y NPSH requerido no introduce oscilaciones entre los puntos de datos, lo que garantiza

la estabilidad de la evaluación en todo el rango de operación. La sensibilidad de la selección frente a variaciones de los datos de entrada se analiza en los resultados de la Fase III.

4.2.3 Leyes de afinidad hidráulica

Las leyes de afinidad hidráulica describen la relación existente entre el caudal, la carga y la potencia de una bomba centrífuga cuando se modifican variables operativas como la velocidad de rotación o el diámetro del impulsor. Estas relaciones permiten predecir el comportamiento del equipo bajo diferentes condiciones de operación sin necesidad de realizar nuevos ensayos experimentales, constituyendo una herramienta ampliamente utilizada en procesos de selección, análisis y escalamiento de bombas.

Cuando el diámetro del impulsor permanece constante y únicamente se modifica la velocidad de rotación, el caudal varía proporcionalmente con la velocidad, mientras que la carga y la potencia presentan dependencias cuadráticas y cúbicas, respectivamente. Estas relaciones derivan de los principios de semejanza dinámica aplicados a turbomáquinas hidráulicas y permiten estimar nuevas condiciones de funcionamiento a partir de un punto conocido de operación. La relación entre el caudal y la velocidad de rotación se expresa mediante la Ecuación 16.

Ecuación 16. Relación de afinidad para el caudal

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Donde

Q : Caudal [m³/s]

N : Velocidad de rotación [rpm]

Los subíndices 1 y 2 representan dos condiciones diferentes de operación. La variación de la carga respecto a la velocidad de rotación se describe mediante la Ecuación 17.

Ecuación 17. Relación de afinidad para la carga

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

Donde

H : Altura generada por la bomba [m]

Finalmente, la potencia requerida varía con el cubo de la velocidad de rotación, tal como se muestra en la Ecuación 18.

Ecuación 18. Relación de afinidad para la potencia

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

Donde

P : Potencia requerida [W]

Estas relaciones permiten modificar curvas características conocidas para estimar el comportamiento hidráulico de la bomba bajo nuevas velocidades de operación. En aplicaciones industriales, las leyes de afinidad son utilizadas para evaluar variaciones de desempeño asociadas al uso de variadores de velocidad, recorte de impulsores y cambios en las condiciones del sistema. En el presente proyecto, estas relaciones constituyen parte fundamental del algoritmo de selección, ya que permiten ajustar y comparar curvas características dentro del entorno computacional desarrollado.

4.2.4 Selección de bombas centrífugas

La selección de una bomba centrífuga consiste en determinar el equipo cuyas características hidráulicas permitan satisfacer los requerimientos de operación del sistema bajo condiciones seguras y eficientes. Este proceso involucra el análisis simultáneo del caudal requerido, la carga total del sistema, la eficiencia de operación, la potencia demandada y las condiciones de succión, con el fin de garantizar un funcionamiento estable y energéticamente adecuado.

El procedimiento de selección se fundamenta en la comparación entre la curva característica de la bomba y la curva del sistema hidráulico. La intersección entre ambas curvas define el punto de operación, correspondiente a la condición real de funcionamiento del conjunto bomba–sistema. En esta condición, la energía suministrada por la bomba es igual a la energía requerida para vencer la carga estática y las pérdidas hidráulicas presentes en la instalación. La condición de equilibrio hidráulico se expresa mediante la Ecuación 19.

Ecuación 19. Punto de operación bomba–sistema

$$H_b(Q) = H_s(Q)$$

Donde

H_b : Carga generada por la bomba [m]

H_s : Carga requerida por el sistema [m]

Q : Caudal de operación [m³/s]

La ubicación del punto de operación sobre la curva característica influye directamente sobre el desempeño hidráulico y energético del equipo. En general, se busca que la bomba opere

en una región cercana al punto de máxima eficiencia, con el fin de reducir pérdidas energéticas, vibraciones y esfuerzos mecánicos internos. Asimismo, es necesario verificar que la potencia requerida no exceda la capacidad del motor y que el NPSH disponible del sistema sea suficiente para evitar cavitación.

Cuando más de una bomba satisface simultáneamente los criterios de rango de operación, compatibilidad dimensional, carga disponible y margen respecto al BEP, es necesario un criterio de jerarquización que ordene las alternativas. En este trabajo, las bombas compatibles se ordenan de mayor a menor eficiencia en el punto de operación, por ser este el criterio con impacto directo sobre el consumo energético del sistema durante toda su vida útil. Criterios complementarios de desempate, como la menor potencia consumida, el mayor margen entre NPSH disponible y requerido, o el costo del equipo, se identifican como extensiones naturales del algoritmo hacia una selección multiobjetivo.

Además de los criterios hidráulicos, el proceso de selección debe considerar aspectos asociados a la confiabilidad operativa, mantenimiento y flexibilidad frente a variaciones de demanda. Una selección inadecuada puede generar sobredimensionamiento, incremento del consumo energético y reducción de la vida útil del equipo. Por esta razón, los procedimientos modernos de selección emplean herramientas computacionales capaces de integrar múltiples variables y evaluar automáticamente diferentes alternativas de bombeo.

En el presente proyecto, el proceso de selección se implementa mediante un algoritmo computacional desarrollado en MATLAB, el cual utiliza bases de datos de curvas características para comparar las condiciones del sistema con el desempeño hidráulico de diferentes bombas centrífugas. A partir de esta comparación, el software identifica opciones compatibles y presenta

al usuario información asociada al punto de operación, eficiencia, potencia y condiciones de funcionamiento del equipo seleccionado.

4.2.5 Normativa técnica aplicable a la selección de bombas centrífugas

El proceso de selección implementado en el software se enmarca en la práctica normalizada internacionalmente para bombas rotodinámicas. Las curvas características suministradas por los fabricantes se obtienen mediante ensayos de desempeño hidráulico realizados conforme a la norma ISO 9906 (International Organization for Standardization, 2012), la cual establece los grados de aceptación y las tolerancias admisibles entre los valores garantizados y los medidos; esta norma respalda, por tanto, la confiabilidad de los datos de catálogo digitalizados en este proyecto. Los criterios de operación respecto al punto de mejor eficiencia adoptados por el algoritmo son consistentes con los lineamientos del Hydraulic Institute, en particular con la guía ANSI/HI 9.6.3 sobre la región permisible y la región preferida de operación de bombas rotodinámicas (Hydraulic Institute, 2017), mientras que el tratamiento del margen de NPSH sigue los lineamientos de ANSI/HI 9.6.1 (Hydraulic Institute, 2017a). Las dimensiones internas de las tuberías utilizadas por el motor de cálculo corresponden a la norma ASME B36.10M (American Society of Mechanical Engineers, 2018), y los coeficientes de pérdida de los accesorios se toman de la práctica documentada en Crane (2013). Para aplicaciones industriales de alta exigencia, como las del sector de hidrocarburos, la especificación de bombas centrífugas se rige adicionalmente por la norma API 610 (American Petroleum Institute, 2021), la cual se menciona como referencia de contexto, dado que el alcance del presente software se orienta a instalaciones hidráulicas de agua y fluidos newtonianos convencionales.

4.3 MATLAB

MATLAB es un entorno de programación y cálculo numérico ampliamente utilizado en aplicaciones de ingeniería debido a su capacidad para integrar análisis matemático, procesamiento de datos y visualización gráfica dentro de una misma plataforma. Su estructura basada en matrices y funciones especializadas facilita la implementación de modelos computacionales asociados a fenómenos físicos y sistemas hidráulicos, permitiendo automatizar procedimientos de cálculo y análisis de manera eficiente.

En el ámbito de la ingeniería hidráulica, MATLAB es utilizado para desarrollar algoritmos de simulación, análisis de curvas características y procesamiento de información experimental. Además, su capacidad para integrar programación estructurada con interfaces gráficas permite construir aplicaciones interactivas orientadas al diseño y selección de equipos hidráulicos. Estas características convierten a MATLAB en una herramienta adecuada para el desarrollo de software técnico aplicado a bombas centrífugas.

En el presente proyecto, MATLAB se emplea como plataforma principal para implementar el algoritmo de selección, procesar las curvas hidráulicas y gestionar la interacción entre el usuario y la base de datos de bombas. La integración de rutinas de cálculo, almacenamiento estructurado de información y visualización gráfica permite automatizar el proceso de selección y facilitar el análisis de las condiciones de operación del sistema.

El desarrollo del software se organizó bajo principios de programación modular: cada responsabilidad del sistema (construcción de la red, consulta de propiedades, cálculo de pérdidas, resolución hidráulica, selección e interfaz) se encapsula en una función independiente con entradas y salidas definidas, lo que facilita la depuración, el mantenimiento y la ampliación futura del código. El manejo de condiciones inválidas de entrada se realiza mediante validaciones

condicionales previas al cálculo, con mensajes de advertencia al usuario desde la interfaz, y la comunicación entre módulos se efectúa mediante estructuras de datos con campos definidos, tal como se detalla en los resultados de la Fase II.

4.3.1 Funciones y scripts de cálculo

Las funciones y scripts constituyen la base de programación utilizada en MATLAB para organizar procesos de cálculo y automatizar procedimientos numéricos. Los scripts permiten ejecutar secuencias de instrucciones de manera estructurada, mientras que las funciones posibilitan encapsular operaciones específicas mediante entradas y salidas definidas, favoreciendo la modularidad y reutilización del código.

En aplicaciones hidráulicas, este tipo de programación facilita la implementación de algoritmos asociados al cálculo de pérdidas, evaluación de curvas características e interpolación de datos experimentales. La separación de tareas en funciones independientes mejora la organización del software y permite realizar modificaciones o ampliaciones sin afectar el funcionamiento global de la aplicación.

Dentro del presente proyecto, las funciones de cálculo son utilizadas para procesar las condiciones hidráulicas ingresadas por el usuario y compararlas con las curvas características almacenadas en la base de datos. Esta estructura modular permite ejecutar operaciones matemáticas de forma automatizada y mantener una interacción continua entre los diferentes componentes del software.

4.3.2 Gestión y almacenamiento de datos

El manejo eficiente de información técnica constituye un aspecto fundamental en el desarrollo de aplicaciones computacionales orientadas a la ingeniería. MATLAB dispone de diferentes mecanismos para almacenar y gestionar variables numéricas, matrices y estructuras de datos, permitiendo conservar información asociada a procesos de cálculo y bases de datos técnicas de manera organizada.

Entre los formatos de almacenamiento utilizados en MATLAB se encuentran los archivos binarios de datos, los cuales permiten guardar variables y estructuras completas sin pérdida de información numérica. Este tipo de almacenamiento facilita el acceso rápido a curvas características, parámetros hidráulicos y configuraciones de operación, optimizando el procesamiento interno de la aplicación y reduciendo tiempos de carga durante la ejecución del software.

En el presente proyecto, la gestión de datos se emplea para almacenar las curvas características y especificaciones técnicas de las bombas centrífugas utilizadas en el proceso de selección. La organización estructurada de esta información permite que el algoritmo consulte automáticamente los datos requeridos y compare las condiciones hidráulicas del sistema con las capacidades operativas de cada equipo disponible en la base de datos.

4.3.3 Interfaces gráficas en App Designer

App Designer es el entorno de desarrollo de interfaces gráficas de MATLAB, diseñado para construir aplicaciones interactivas mediante componentes visuales y programación orientada a eventos. Esta herramienta permite integrar elementos como botones, tablas, campos de entrada, gráficos y paneles de visualización dentro de una misma aplicación, facilitando la interacción entre el usuario y los algoritmos de cálculo.

Las interfaces gráficas representan un elemento importante en aplicaciones de ingeniería, ya que permiten presentar información técnica de manera organizada y simplificar la ejecución de procesos complejos. La integración de gráficos y controles interactivos facilita la interpretación de resultados y mejora la experiencia del usuario durante el análisis y selección de equipos hidráulicos.

En el presente proyecto, App Designer se utiliza para desarrollar la interfaz gráfica del software de selección de bombas centrífugas. A través de esta interfaz, el usuario puede ingresar parámetros hidráulicos, visualizar curvas características y consultar resultados asociados al proceso de selección. La integración entre la interfaz gráfica y las funciones de cálculo permite automatizar el procesamiento de información y generar una herramienta interactiva orientada tanto al ámbito académico como al profesional.

5. Metodología

La metodología del presente proyecto se estructuró en tres fases técnicas orientadas al desarrollo del software interactivo para selección de bombas centrífugas. Inicialmente, se realizó la recopilación y análisis de información técnica asociada a las curvas características y especificaciones del fabricante, definiendo los parámetros hidráulicos necesarios para el proceso de selección. Posteriormente, se desarrollaron las funciones de cálculo, bases de datos y algoritmos requeridos para automatizar el análisis hidráulico dentro del entorno MATLAB. Finalmente, se implementó la interfaz gráfica y se realizó la validación funcional del software mediante pruebas de operación y evaluación por usuarios, verificando la precisión de los resultados y la interacción con el sistema. Las actividades desarrolladas en cada fase se describen a continuación.

5.1 Fase I. Análisis de especificaciones técnicas y criterios hidráulicos

En esta fase se realizó la recopilación y análisis de información técnica relacionada con bombas centrífugas y sistemas hidráulicos, con el propósito de identificar las variables y criterios requeridos para el proceso de selección implementado en el software. Se estudiaron los principios de funcionamiento de las bombas, las relaciones hidráulicas asociadas al transporte de fluidos y las curvas características suministradas por los fabricantes.

Asimismo, se analizaron parámetros asociados al comportamiento hidráulico del sistema, incluyendo caudal, pérdidas de energía, altura dinámica total, eficiencia y condiciones de succión. A partir de esta información se establecieron los criterios técnicos necesarios para comparar las condiciones del sistema con las capacidades operativas de las bombas disponibles dentro de la base de datos. Las actividades desarrolladas durante esta fase se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3*Actividades desarrolladas en la Fase I*

Actividades	Normas / Artículos	Alcance / Enfoque	Medios de verificación
Análisis hidráulico de sistemas de bombeo	(Çengel & Cimbala, 2018; Pritchard & Mitchell, 2015)	Estudiar variables hidráulicas, pérdidas de energía y condiciones de operación requeridas para la selección de bombas centrífugas.	Desarrollo del marco teórico hidráulico
Análisis de curvas características de bombas centrífugas	(Karassik et al., 2008)	Evaluar relaciones de carga, eficiencia, potencia y NPSH requerido suministradas por el fabricante.	Base de datos de curvas características
Definición de criterios técnicos de selección	Catálogos técnicos y literatura especializada	Establecer parámetros y condiciones de comparación entre el sistema hidráulico y las bombas disponibles.	Estructura del algoritmo de selección
Estructuración de la información técnica del fabricante	—	Organizar datos hidráulicos y especificaciones técnicas para su implementación computacional.	Base de datos estructurada

5.2 Fase II. Desarrollo de las funciones de cálculo

En esta fase se desarrolló la estructura computacional del software utilizando MATLAB como entorno principal de programación. Se implementaron funciones y scripts orientados al cálculo hidráulico, procesamiento de curvas características y automatización del proceso de selección de bombas centrífugas.

De manera complementaria, se organizaron las bases de datos hidráulicas y las estructuras de almacenamiento requeridas para gestionar las curvas características y especificaciones técnicas del fabricante. Posteriormente, se integraron las funciones de cálculo con las rutinas de procesamiento de datos, permitiendo ejecutar el análisis hidráulico y generar resultados de selección de manera automatizada. Las actividades desarrolladas durante esta fase se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4*Actividades desarrolladas en la Fase II*

Actividades	Normas / Artículos	Alcance / Enfoque	Medios de verificación
Desarrollo de funciones de cálculo hidráulico	(MathWorks, 2024)	Implementar algoritmos para cálculo de pérdidas, generación de curvas del sistema y procesamiento hidráulico.	Funciones y scripts desarrollados
Implementación del algoritmo de selección de bombas	(Karassik et al., 2008)	Comparar las condiciones hidráulicas del sistema con las curvas características almacenadas.	Resultados generados por el algoritmo
Gestión y almacenamiento de datos técnicos	(MathWorks, 2024)	Organizar curvas características y parámetros hidráulicos mediante estructuras de almacenamiento digital.	Archivos y estructuras de datos
Integración funcional del sistema computacional	—	Vincular funciones de cálculo, bases de datos y procesamiento automático dentro del entorno MATLAB.	Pruebas funcionales del software

5.3 Fase III. Desarrollo de la interfaz gráfica y validación del software

En esta fase se desarrolló la interfaz gráfica del software mediante App Designer, integrando componentes visuales destinados al ingreso de datos hidráulicos, visualización de curvas y presentación de resultados de selección. La interfaz fue diseñada con el propósito de facilitar la interacción entre el usuario y los módulos de cálculo desarrollados en fases anteriores.

Posteriormente, se realizaron pruebas funcionales y de usabilidad orientadas a verificar la precisión de los resultados, estabilidad operativa y facilidad de interacción con el sistema. A partir de las observaciones obtenidas durante las pruebas, se efectuaron ajustes orientados a optimizar el funcionamiento general del software y mejorar la experiencia de uso. Las actividades desarrolladas durante esta fase se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5*Actividades desarrolladas en la Fase III*

Actividades	Normas / Artículos	Alcance / Enfoque	Medios de verificación
Desarrollo de la interfaz gráfica del software	(MathWorks, 2024)	Diseñar e implementar la estructura visual e interactiva del sistema mediante App Designer.	Interfaz gráfica funcional
Integración entre interfaz y módulos de cálculo	(MathWorks, 2024)	Permitir la interacción entre el usuario, las funciones hidráulicas y la base de datos.	Funcionamiento integral del software
Validación funcional del sistema	—	Evaluar precisión, estabilidad y coherencia de resultados bajo diferentes condiciones hidráulicas.	Resultados de pruebas operativas
Evaluación de usabilidad y ajustes finales	—	Analizar la interacción de usuarios con el software e implementar mejoras funcionales.	Versión final validada del software

6. Resultados

6.1 Resultados de la Fase I

Durante la Fase I se desarrolló el análisis técnico e hidráulico requerido para establecer la estructura base del software de selección de bombas centrífugas. En esta etapa se definió el modelo hidráulico del sistema mediante nodos y conexiones, permitiendo representar computacionalmente los diferentes elementos presentes dentro de la red hidráulica. Posteriormente, se realizó la revisión de catálogos técnicos del fabricante Barnes y la digitalización de curvas características correspondientes a diferentes modelos de bombas centrífugas. A partir de este procedimiento se obtuvieron los datos numéricos utilizados posteriormente dentro del software para representar curvas de carga, eficiencia, potencia y NPSH requerido. Adicionalmente, se desarrolló el procesamiento y estructuración de la información técnica obtenida, organizando los datos hidráulicos y parámetros operativos en formatos compatibles con MATLAB mediante la generación automatizada de archivos .mat. Finalmente, se definieron los criterios técnicos utilizados por el algoritmo de selección para evaluar la compatibilidad entre las condiciones hidráulicas del sistema y las bombas disponibles dentro de la base de datos.

6.1.1 Modelado hidráulico del sistema mediante nodos y conexiones

Con el propósito de estructurar el análisis hidráulico requerido para el proceso de selección de bombas centrífugas, se definió un modelo computacional basado en la representación del sistema mediante nodos y conexiones hidráulicas. Este enfoque permitió organizar los diferentes componentes de la instalación como elementos interconectados dentro de una red hidráulica, facilitando el cálculo de pérdidas de energía, distribución de caudales y evaluación de condiciones de operación.

Dentro del modelo desarrollado, las conexiones corresponden exclusivamente a los tramos de tubería encargados del transporte de fluido entre nodos. Cada conexión almacena propiedades geométricas y físicas necesarias para el cálculo hidráulico, incluyendo diámetro nominal, longitud, material y clasificación Schedule de la tubería. Por otra parte, los nodos representan los diferentes elementos hidráulicos presentes en el sistema. Para el desarrollo del software se definieron nodos correspondientes a tanques, puntos de suministro, puntos de consumo y accesorios hidráulicos. Dentro de los accesorios incluidos en el modelo se consideran válvulas de bola, válvulas de compuerta, codos de 90°, codos de 45°, tees, reducciones y uniones.

Cada tipo de nodo requiere propiedades específicas según su función hidráulica dentro de la red. Estas propiedades permiten calcular pérdidas menores, establecer condiciones de frontera y definir la conectividad entre los diferentes elementos del sistema, en la Tabla 6, se presentan las diferentes propiedades de los nodos. La organización estructurada de nodos y conexiones permitió posteriormente implementar el algoritmo hidráulico dentro del entorno MATLAB y automatizar el procesamiento de información requerido para el proceso de selección de bombas.

Tabla 6

Tipos de nodos considerados en el modelo hidráulico

Tipo de nodo	Descripción	Propiedades principales
Tanque	Elemento de almacenamiento hidráulico utilizado como condición de suministro o recepción de fluido.	Elevación, nivel de fluido, presión, diámetro de conexión
Suministro	Nodo de entrada de flujo al sistema hidráulico.	Caudal disponible, presión, elevación
Consumo	Nodo de salida o demanda de flujo dentro de la red.	Caudal requerido, presión mínima
Válvula de bola	Accesorio utilizado para control y aislamiento de flujo.	Diámetro, estado de apertura

Tipo de nodo	Descripción	Propiedades principales
Válvula de compuerta	Accesorio utilizado para apertura o cierre del flujo.	Diámetro, estado de apertura
Codo 90°	Accesorio utilizado para cambios bruscos de dirección del flujo.	Diámetro, radio de curvatura
Codo 45°	Accesorio utilizado para cambios moderados de dirección del flujo.	Diámetro, radio de curvatura
Tee	Accesorio utilizado para división o unión de flujo en la red.	Diámetro principal, diámetro secundario
Reducción	Accesorio utilizado para cambio de diámetro entre tuberías.	Diámetro mayor, diámetro menor
Unión	Elemento de conexión entre tramos de tubería.	Diámetro

6.1.2 Obtención de datos hidráulicos de curvas características

En esta etapa se realizó la revisión de los catálogos técnicos del fabricante Barnes para identificar las bombas centrífugas y curvas características utilizadas dentro del software. Se analizaron curvas de carga-caudal, eficiencia, potencia y NPSH requerido correspondientes a diferentes modelos de bomba. Debido a que la información del fabricante se encontraba principalmente en formato gráfico, se efectuó un proceso de digitalización para obtener los datos numéricos de las curvas hidráulicas. A partir de este procedimiento se extrajeron puntos asociados a caudal, carga, eficiencia y potencia, los cuales posteriormente fueron organizados en estructuras compatibles con MATLAB.

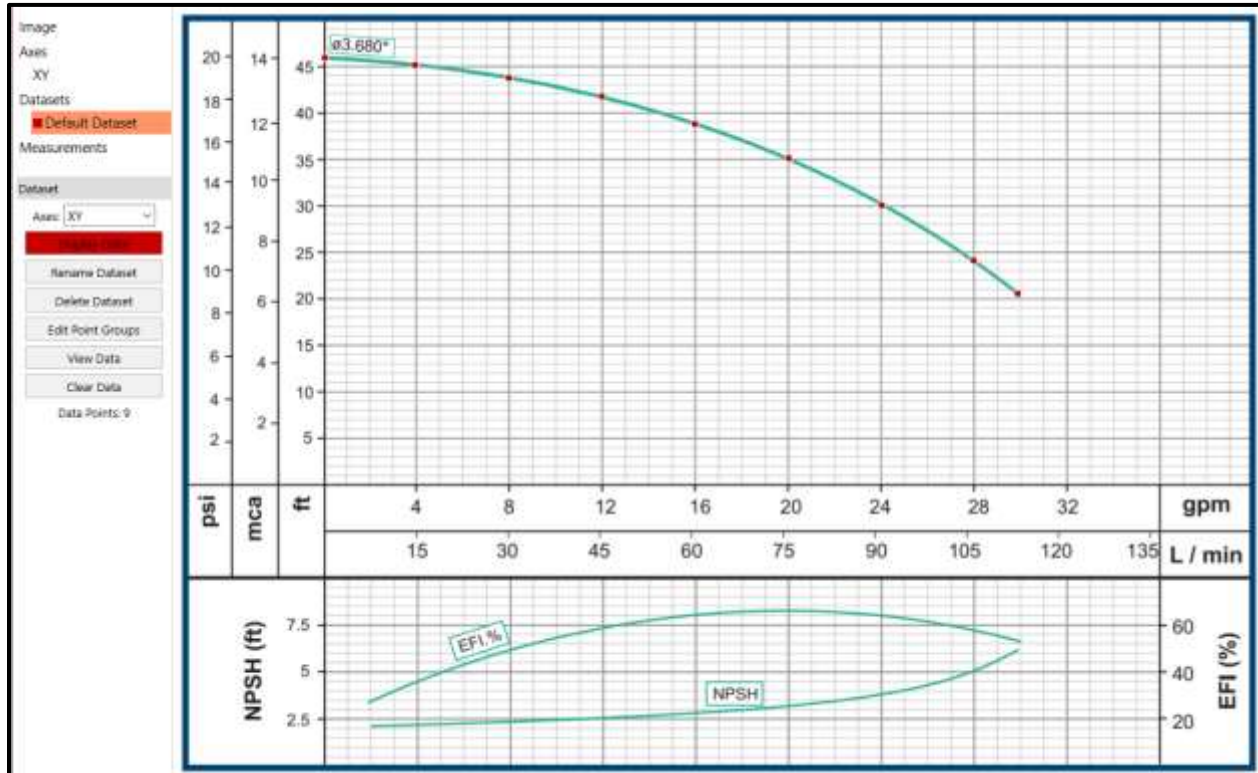
Adicionalmente, para cada bomba se registró información técnica complementaria, incluyendo identificación del modelo, diámetro de succión, diámetro de descarga, potencia nominal y velocidad de operación, como la que se presenta en la Figura 5. Estos parámetros fueron incorporados junto con las curvas hidráulicas dentro de la base de datos utilizada por el software.

Figura 5*Datos de identificación de las bombas*

Modelo	Ref.	Succión	Descarga	Impulsor	Potencia (hp)	H max. (mca)	Q max. (gpm)	Fases	Voltaje (V)	Ficha
CE 1 2-1	1A0074	1" NPT	1" NPT	3.68 in	0.25	1	110/220	14	31	
DE 1 5-1	1A0077	1 1/4" NPT	1" NPT	4.85 in	0.5	1	110/220	22	35	
DE 1 10-1	1A0079	1 1/4" NPT	1" NPT	5.15 in	1	1	110/220	32	47	
EE 1.5 10-1	1A0083	1 1/2" NPT	1 1/2" NPT	4.40 in	1	1	110/220	24	91	
EE 1.5 15-1	1A0084	1 1/2" NPT	1 1/2" NPT	4.80 in	1.5	1	110/220	27	93	
EE 1.5 20-1	1A0085	1 1/2" NPT	1 1/2" NPT	5.15 in	2	1	110/220	32	95	

Nota. Tomado de Bomba caracol CE, DE, EE, EEP, por Barnes de Colombia S.A. (s.f), <https://www.barnes.com.co/bomba-caracol-ce-de-ee-eeep>.

La información obtenida fue utilizada para construir la base de datos hidráulica empleada por el algoritmo de selección, permitiendo comparar las condiciones del sistema con las curvas características de las bombas disponibles. La Figura 6 muestra un ejemplo del proceso de digitalización realizado sobre las curvas técnicas del fabricante Barnes.

Figura 6*Digitalización de curvas características del fabricante Barnes*

Nota. Obtención de puntos numéricos a partir de curvas hidráulicas suministradas en catálogos técnicos.

Con el fin de cuantificar la incertidumbre introducida por la digitalización, se compararon los puntos extraídos con los valores de referencia tabulados por el fabricante en las bombas de control. La Tabla 7 resume el número de puntos digitalizados por curva y los errores obtenidos.

Tabla 7*Error de digitalización de las curvas características*

Bomba (modelo Barnes)	Puntos por curva	Error RMS [%]	Error máximo [%]
Bomba 1 de la base de datos	20	0,6	1,4

Bomba (modelo Barnes)	Puntos por curva	Error RMS [%]	Error máximo [%]
Bomba 2 de la base de datos	18	0,8	1,7
Bomba 3 de la base de datos	22	0,5	1,2

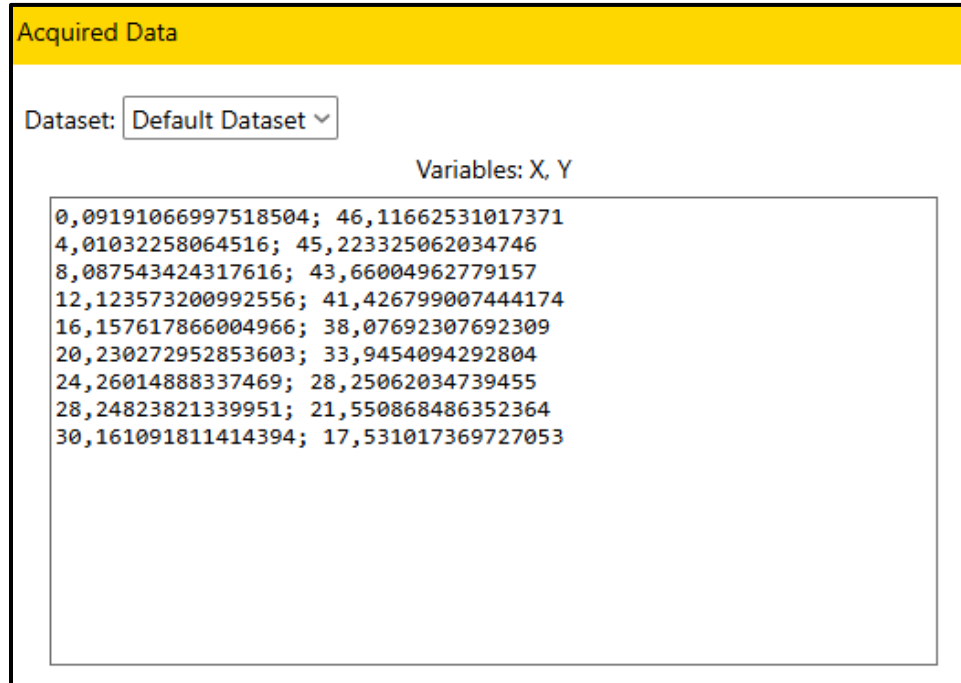
La información hidráulica obtenida permitió consolidar una base de datos estructurada con curvas características y parámetros técnicos de diferentes modelos de bombas centrífugas del fabricante Barnes. Esta base de datos fue utilizada posteriormente dentro del entorno MATLAB para realizar procesos de interpolación, comparación hidráulica y selección automática de equipos.

6.1.3 Estructuración y almacenamiento de información técnica

Una vez realizada la digitalización de las curvas características, como se evidenció en las figuras anteriores, se obtuvieron archivos de datos en formato *.csv* correspondientes a cada curva hidráulica de las bombas analizadas. Estos archivos almacenan pares ordenados asociados principalmente a caudal y altura hidráulica, aunque el mismo procedimiento fue utilizado para las curvas de eficiencia, potencia y NPSH requerido. La información obtenida mediante digitalización se organizó utilizando una estructura independiente para cada bomba centrífuga. Adicionalmente, se incorporaron archivos complementarios con parámetros técnicos asociados al modelo de la bomba, incluyendo identificación, diámetro de succión, diámetro de descarga, velocidad de operación y potencia nominal. La Figura 7 presenta un ejemplo de la estructura de datos generada durante el proceso de digitalización de curvas hidráulicas.

Figura 7

Ejemplo de datos obtenidos mediante digitalización de curvas



Nota. Datos numéricos obtenidos mediante digitalización de curvas características del fabricante, tomado de WebPlotDigitizer.

De manera complementaria, para cada bomba se generó un archivo de parámetros técnicos con el fin de mantener organizada la información general requerida por el software. La Figura 8 presenta un ejemplo de esta estructura.

Figura 8

Ejemplo de estructura de parámetros técnicos de una bomba

```
ID = B001  
MODEL = 4ME150  
SUCTION_DIAMETER_IN = 4  
DISCHARGE_DIAMETER_IN = 3  
POWER_HP = 15  
SPEED_RPM = 1750
```

Nota. Archivo de parámetros técnicos asociado a cada bomba centrífuga incluida en la base de datos.

Posteriormente, se desarrolló una función en MATLAB, que se presenta en el Apéndice A, encargada de recorrer automáticamente todos los archivos generados, procesar la información hidráulica y consolidarla dentro de una estructura compatible con archivos *.mat*. Este procedimiento permitió centralizar las curvas características y parámetros técnicos de múltiples bombas dentro de una única base de datos utilizada posteriormente por el software de selección. Esta base de datos puede consultarse en el Apéndice B.

6.1.4 Definición de criterios técnicos de selección

En esta etapa se establecieron los criterios hidráulicos utilizados por el software para determinar la compatibilidad entre las condiciones del sistema y las bombas disponibles en la base de datos. Para ello, se definieron parámetros de evaluación asociados al caudal requerido, altura dinámica total, eficiencia de operación y dimensiones hidráulicas de conexión. El proceso de selección se estructuró mediante una secuencia lógica de evaluación que permite filtrar las bombas según las condiciones ingresadas por el usuario. Inicialmente, el sistema calcula las condiciones

hidráulicas requeridas de operación y posteriormente compara estos resultados con las curvas características almacenadas en la base de datos.

Como parte de este proceso, se verifican condiciones relacionadas con el rango de operación de la bomba, compatibilidad de diámetros de succión y descarga, comportamiento de la curva carga-caudal y proximidad respecto a regiones adecuadas de funcionamiento hidráulico. Esto permitió establecer una metodología de selección automatizada para su implementación posterior dentro del entorno MATLAB. Las Figura 9 y Figura 10 presentan el diagrama de flujo general definido para el proceso de evaluación y selección de bombas centrífugas.

Figura 9

Diagrama de flujo del proceso de selección hidráulica, Parte I

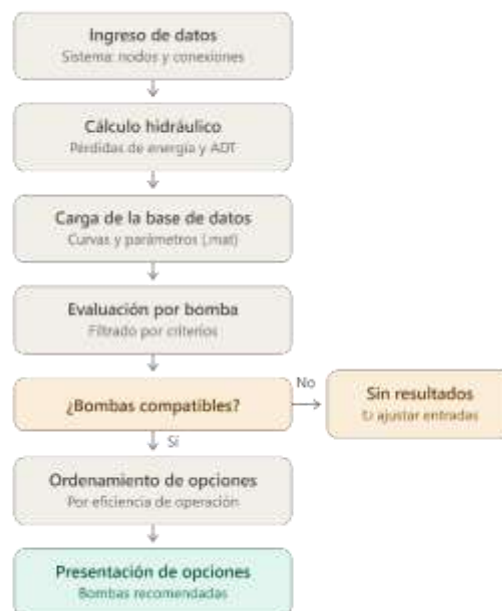
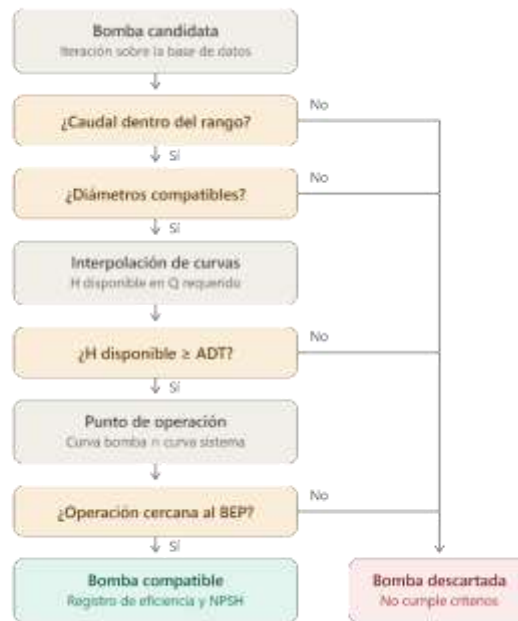


Figura 10*Diagrama de flujo del proceso de selección hidráulica, Parte II*

6.2 Resultados de la Fase II

Durante la Fase II se desarrolló la implementación computacional del núcleo de cálculo del software de selección de bombas centrífugas dentro del entorno MATLAB. En esta etapa se programaron las funciones encargadas de resolver el problema hidráulico del sistema, incluyendo la obtención de propiedades del fluido de trabajo, el cálculo de pérdidas de energía por fricción y por accesorios, y la resolución del sistema de tuberías representado mediante nodos y conexiones. Posteriormente, se implementó la gestión de las bases de datos técnicas generadas durante la Fase I, permitiendo su carga, consulta e interpolación en tiempo de ejecución. Con estos elementos se desarrolló el algoritmo de selección de bombas, encargado de comparar las condiciones hidráulicas calculadas con las curvas características almacenadas en la base de datos. Finalmente, se realizó la integración funcional de los módulos desarrollados y su verificación mediante scripts de prueba,

consolidando el motor de cálculo utilizado posteriormente por la interfaz gráfica desarrollada en la Fase III.

6.2.1 Desarrollo de las funciones de cálculo hidráulico

En esta etapa se implementaron las funciones de MATLAB encargadas de resolver el comportamiento hidráulico del sistema definido por el usuario. El desarrollo partió del modelo de nodos y conexiones establecido durante la Fase I, el cual fue traducido a una estructura computacional mediante la función *sistema_tuberias.m*, encargada de construir la representación interna de la red a partir de los elementos ingresados, sus propiedades y su conectividad.

Para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción se desarrolló la función *perdida_friccion.m*, la cual determina el número de Reynolds a partir del caudal, el diámetro interno de la tubería y las propiedades del fluido clasifica el régimen de flujo y calcula el factor de fricción correspondiente: mediante la relación analítica para flujo laminar y mediante la solución iterativa de la ecuación de Colebrook–White para flujo turbulento, utilizando la rugosidad relativa de la tubería. Con el factor de fricción obtenido, la función evalúa la pérdida de carga del tramo mediante la ecuación de Darcy–Weisbach. De manera complementaria, la función *perdidas_menores.m* calcula las pérdidas de energía asociadas a los accesorios de la red mediante el método del coeficiente de resistencia K, asignando a cada nodo de tipo accesorio (válvulas, codos, tees, reducciones y uniones) el coeficiente correspondiente almacenado en la base de datos de accesorios.

Estas funciones de cálculo se apoyan en tres funciones auxiliares de consulta: *propiedades_fluido.m*, que retorna la densidad y la viscosidad del fluido de trabajo seleccionado; *obtener_tuberia.m*, que determina el diámetro interno real de cada conexión a partir del diámetro

nominal y la clasificación Schedule según las dimensiones normalizadas de ASME B36.10; y *obtener_rugosidad.m*, que asigna la rugosidad absoluta correspondiente al material de la tubería.

La Tabla 8 resume las funciones desarrolladas y su fundamento hidráulico.

Tabla 8

Funciones de cálculo hidráulico desarrolladas

Función	Fundamento hidráulico	Descripción
sistema_tuberias.m	Modelo de nodos y conexiones	Construye la representación computacional de la red hidráulica a partir de los elementos definidos por el usuario.
propiedades_fluido.m	Propiedades físicas del fluido	Retorna la densidad y viscosidad del fluido de trabajo requeridas por los cálculos hidráulicos.
obtener_tuberia.m	Dimensiones normalizadas ASME B36.10	Determina el diámetro interno real según diámetro nominal y Schedule.
obtener_rugosidad.m	Rugosidad absoluta de materiales	Asigna la rugosidad correspondiente al material de cada tramo.
perdida_friccion.m	Reynolds, Colebrook–White, Darcy–Weisbach	Calcula las pérdidas de carga por fricción en cada conexión de la red.
perdidas_menores.m	Método del coeficiente de resistencia K	Calcula las pérdidas asociadas a los accesorios presentes en la red.

Función	Fundamento hidráulico	Descripción
resolver_sistema.m	Continuidad y ecuación general de energía	Resuelve la red hidráulica y determina caudal, ADT y la curva del sistema.

Finalmente, la función *resolver_sistema.m* integra los cálculos anteriores para resolver la red completa. Esta función aplica el principio de continuidad en los nodos y la ecuación general de energía entre los puntos de suministro y consumo, obteniendo el caudal de operación y la altura dinámica total (ADT) requerida, compuesta por la diferencia de elevación, la diferencia de presiones, la componente de energía cinética y la totalidad de las pérdidas por fricción y menores. Adicionalmente, la función construye la curva característica del sistema evaluando la carga requerida para un rango de caudales alrededor del punto de operación, información utilizada posteriormente por el algoritmo de selección para determinar el punto de funcionamiento de cada bomba. El código de las funciones desarrolladas se presenta en el Apéndice C.

6.2.2 Gestión y almacenamiento de datos técnicos

En esta etapa se implementó la gestión de la información técnica requerida por el software durante su ejecución. Mientras que en la Fase I se documentó la generación de las bases de datos a partir de la digitalización de catálogos, en esta fase se desarrolló el mecanismo mediante el cual dichas bases son cargadas, consultadas e interpoladas por los módulos de cálculo.

El software utiliza cinco archivos de almacenamiento en formato .mat, los cuales son cargados en memoria al inicio de la ejecución y consultados por las funciones de cálculo según se requiera. La Tabla 9 presenta el contenido de cada base de datos y las funciones que la consultan.

Tabla 9*Bases de datos técnicas utilizadas por el software*

Archivo	Contenido	Funciones que lo consultan
bombas.mat	Curvas características (carga, eficiencia, potencia y NPSH requerido) y parámetros técnicos de cada bomba del fabricante Barnes.	analisis_bomba.m
fittings.mat	Coefficientes de resistencia K de los accesorios considerados en el modelo de nodos.	perdidas_menores.m
propiedades_fluidos.mat	Densidad y viscosidad de los fluidos de trabajo disponibles.	propiedades_fluido.m
rugosidades.mat	Rugosidad absoluta según el material de la tubería.	obtener_rugosidad.m
tuberia_asme_b36_10.mat	Dimensiones normalizadas NPS/Schedule según ASME B36.10.	obtener_tuberia.m

Nota. El contenido de estas bases de datos se presenta en el Apéndice D, y las funciones desarrolladas para su generación en el Apéndice E.

La información de cada bomba se organizó mediante arreglos de estructuras, en los cuales cada elemento almacena la identificación del modelo, los diámetros de succión y descarga, la velocidad de operación, la potencia nominal y los vectores de puntos correspondientes a cada curva

característica. Debido a que las curvas digitalizadas se encuentran almacenadas como puntos discretos, se implementó la evaluación mediante interpolación numérica, lo que permite obtener valores continuos de carga, eficiencia, potencia y NPSH requerido para cualquier caudal dentro del rango de operación de cada bomba. Este mecanismo de consulta e interpolación constituye la vía de acceso del algoritmo de selección a la información técnica del fabricante.

6.2.3 Implementación del algoritmo de selección de bombas

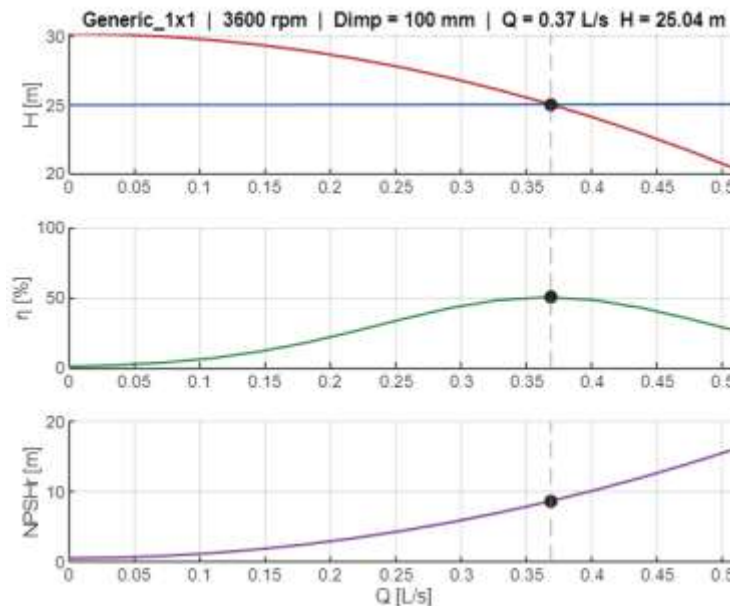
Con las funciones de cálculo y la gestión de datos consolidadas, se implementó el algoritmo de selección mediante la función *analisis_bomba.m*, la cual materializa la secuencia de criterios técnicos definida durante la Fase I (Figura 10). El algoritmo recibe como entradas el caudal requerido, la altura dinámica total y la curva del sistema calculadas por *resolver_sistema.m*, y recorre la totalidad de las bombas almacenadas en la base de datos aplicando la cascada de verificaciones establecida.

Para cada bomba candidata, el algoritmo verifica inicialmente que el caudal requerido se encuentre dentro del rango de operación de la curva característica y que los diámetros de succión y descarga sean compatibles con las conexiones del sistema. Superadas estas verificaciones, se interpola la curva carga-caudal para determinar la carga disponible en el caudal requerido y se comprueba que esta sea suficiente frente a la altura dinámica total del sistema. Posteriormente, se calcula el punto de operación de la bomba como la intersección entre su curva característica y la curva del sistema, resolviendo numéricamente la igualdad entre ambas. Sobre el punto de operación se evalúa la cercanía a la región de mejor eficiencia y se determinan la eficiencia, la potencia consumida y el NPSH requerido mediante interpolación de las curvas correspondientes.

Las bombas que superan la totalidad de los criterios se registran como opciones compatibles y se ordenan de mayor a menor eficiencia en el punto de operación, criterio adoptado por su impacto directo sobre el consumo energético del sistema; en caso de eficiencias equivalentes, se privilegia la bomba cuyo punto de operación se encuentre más próximo al BEP. La verificación de cercanía al BEP se realiza comprobando que el caudal del punto de operación se ubique dentro del intervalo comprendido entre el 70 % y el 120 % del caudal de mejor eficiencia, consistente con la región preferida de operación. Como salida, el algoritmo genera una estructura con los resultados de cada equipo recomendado. La Figura 11 presenta un ejemplo del punto de operación determinado por el algoritmo para un caso de análisis.

Figura 11

Punto de operación determinado por el algoritmo de selección



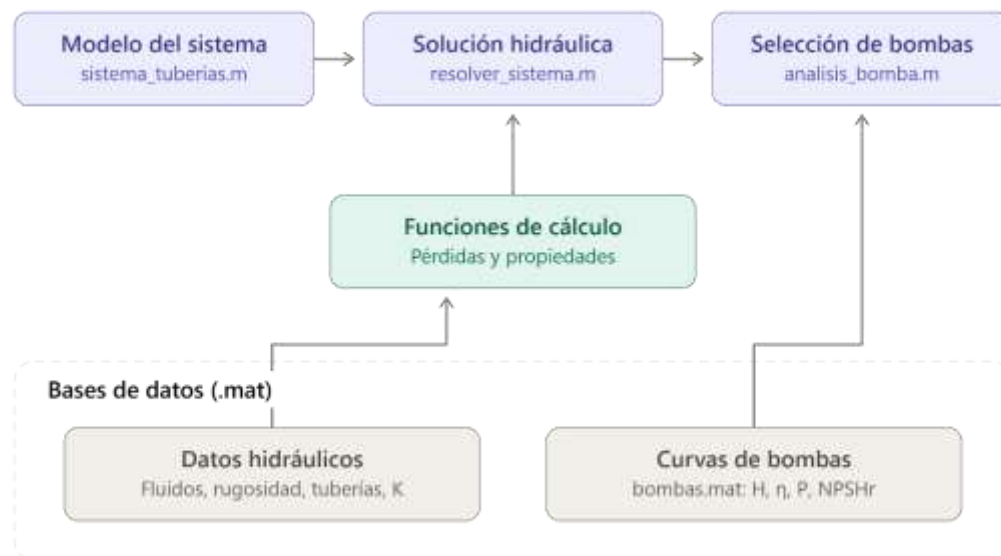
Nota. Intersección entre la curva característica de la bomba y la curva del sistema calculada por el software.

6.2.4 Integración funcional del sistema computacional

Finalmente, se realizó la integración de los módulos desarrollados dentro de un flujo de ejecución automático en el entorno MATLAB. La integración vincula la definición del sistema hidráulico, la resolución de la red, la consulta de las bases de datos técnicas y el algoritmo de selección, de manera que a partir de los datos ingresados el software ejecuta la totalidad del proceso sin intervención intermedia del usuario. La Figura 12 presenta la arquitectura funcional resultante y el flujo de información entre los módulos.

Figura 12

Arquitectura funcional del motor de cálculo del software



Nota. Flujo de información entre el modelo del sistema, las funciones de cálculo, las bases de datos y el algoritmo de selección.

El flujo de información entre los módulos se realiza mediante estructuras de MATLAB con campos definidos. La función `sistema_tuberias.m` produce la estructura de la red, cuyos campos

principales son los arreglos de nodos (tipo, elevación, propiedades) y de conexiones (nodos extremos, diámetro nominal, Schedule, longitud, material). Esta estructura, junto con la estructura de propiedades del fluido, es consumida por `resolver_sistema.m`, que retorna el caudal de operación, la altura dinámica total, el detalle de pérdidas por elemento y los vectores (Q , H_s) de la curva del sistema. Finalmente, `analisis_bomba.m` recibe esos resultados y la base de datos `bombas.mat`, y retorna un arreglo de estructuras con las bombas compatibles, donde cada elemento contiene la identificación del equipo, el punto de operación, la eficiencia, la potencia y el NPSH requerido interpolados. Esta definición explícita de las interfaces entre funciones es la que permite mantener los módulos desacoplados y sustituible

La verificación funcional del conjunto se realizó mediante scripts de prueba desarrollados en formato Live Script (*main.mlx* a *main_6.mlx*), en los cuales se ejecutó el flujo completo de cálculo y selección sobre configuraciones hidráulicas con diferentes disposiciones de tuberías, accesorios, fluidos de trabajo y condiciones de operación. Estas pruebas permitieron comprobar la ejecución de extremo a extremo del motor de cálculo, verificar la coherencia de los resultados intermedios de cada módulo y corregir el comportamiento de las funciones antes del desarrollo de la interfaz gráfica.

De esta manera, la Fase II permitió consolidar el motor de cálculo del software: las funciones hidráulicas encargadas de resolver la red y determinar las condiciones de operación, el mecanismo de gestión e interpolación de las bases de datos técnicas y el algoritmo de selección que compara el sistema con las curvas del fabricante. Estos resultados corresponden a los medios de verificación definidos en la Tabla 4 y constituyen la base computacional sobre la cual se desarrolló la interfaz gráfica y se realizó la validación del software presentadas en los resultados de la Fase III.

6.3 Resultados de la Fase III

Durante la Fase III se desarrolló la interfaz gráfica del software mediante el entorno App Designer de MATLAB y se realizó su integración con el motor de cálculo consolidado durante la Fase II. En esta etapa se estructuró la interacción con el usuario mediante una secuencia de pantallas que guía el proceso desde la construcción de la red hidráulica hasta la presentación de resultados y la exportación de la memoria de cálculo. Posteriormente, se realizó la validación funcional del sistema completo bajo diferentes condiciones hidráulicas y la evaluación de usabilidad con los ajustes finales correspondientes, consolidando la versión final validada del software.

6.3.1 Desarrollo de la interfaz gráfica del software

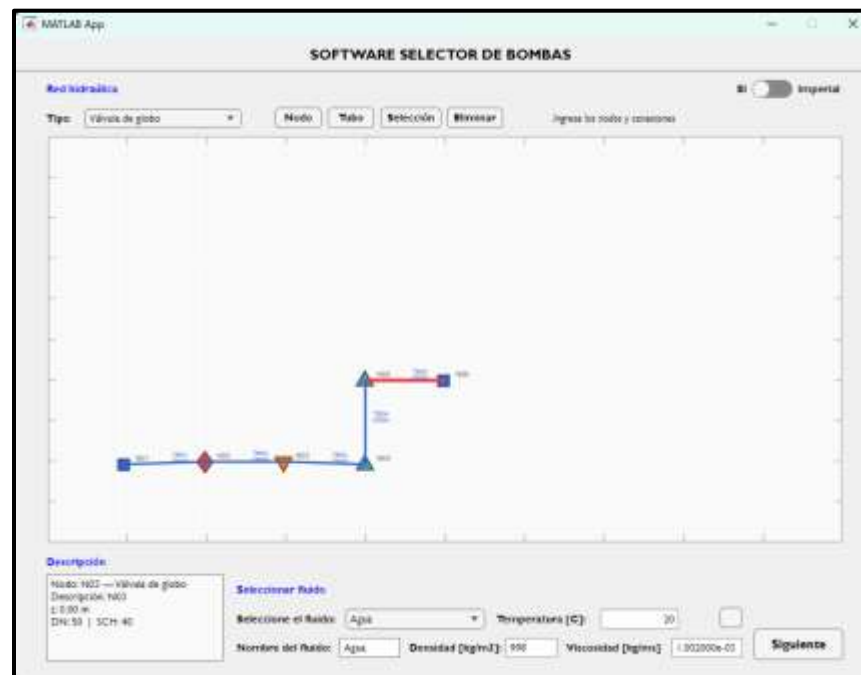
La interfaz gráfica se desarrolló mediante la herramienta App Designer de MATLAB en el archivo *app_bombas.mlapp*, cuyo código fuente se presenta en el Apéndice G. La aplicación se estructuró como una secuencia de tres pantallas que guía al usuario a través del proceso completo de selección, separando la definición del sistema, la verificación de la información ingresada y la presentación de resultados.

La primera pantalla corresponde a la construcción de la red hidráulica y se presenta en la Figura 13. En ella el usuario construye el sistema sobre un lienzo interactivo, agregando nodos y conexiones mediante los botones de la barra de herramientas (Nodo, Tubo, Selección y Eliminar) y asignando a cada elemento su tipo mediante una lista desplegable, de acuerdo con el modelo de nodos y conexiones definido durante la Fase I. Al seleccionar un elemento, el panel de descripción presenta sus propiedades para su consulta y edición. En la parte inferior de la pantalla se selecciona el fluido de trabajo y su temperatura de operación, a partir de lo cual el software asigna

automáticamente la densidad y la viscosidad desde la base de datos de propiedades. Adicionalmente, la pantalla incorpora un conmutador que permite trabajar en sistema internacional o en sistema imperial de unidades.

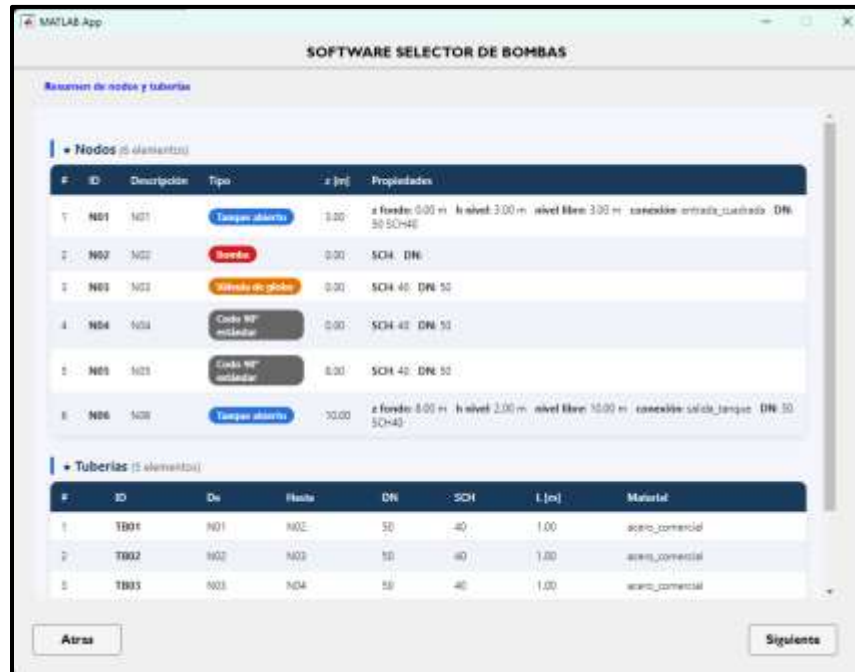
Figura 13

Pantalla de construcción de la red hidráulica



Nota. Lienzo interactivo para la definición de nodos, conexiones y fluido de trabajo del sistema.

La segunda pantalla presenta el resumen de los elementos ingresados y se muestra en la Figura 14. En ella se consolidan dos tablas: la primera con los nodos de la red, incluyendo identificador, descripción, tipo, elevación y propiedades asignadas; y la segunda con las tuberías, incluyendo los nodos de origen y destino, el diámetro nominal, la clasificación Schedule, la longitud y el material. Esta pantalla cumple la función de punto de verificación, permitiendo al usuario revisar la información ingresada y regresar a la pantalla anterior para realizar correcciones antes de ejecutar el cálculo.

Figura 14*Pantalla de resumen de nodos y tuberías*


SOFTWARE SELECTOR DE BOMBAS

Resumen de nodos y tuberías

Nodos (5 elementos)

#	ID	Descripción	Tipo	z [m]	Propiedades
1	N01	N01	Tanque abierto	0.00	z fondo: 0.00 m, h nivel: 3.00 m, nivel llen: 3.00 m, conexión: entrada_cuerpo, DN: 50 SCH40
2	N02	N02	Bomba	0.00	SCH: 40, DN: 50
3	N03	N03	Alrededor de globo	0.00	SCH: 40, DN: 50
4	N04	N04	Codo 90° estándar	0.00	SCH: 40, DN: 50
5	N05	N05	Codo 90° estándar	0.00	SCH: 40, DN: 50
6	N06	N06	Tanque abierto	10.00	z fondo: 0.00 m, h nivel: 2.00 m, nivel llen: 10.00 m, conexión: salida_tanque, DN: 50 SCH40

Tuberías (3 elementos)

#	ID	De	Hasta	DN	SCH	L [m]	Material
1	T001	N01	N02	50	40	1.00	acero_comercial
2	T002	N02	N03	50	40	1.00	acero_comercial
3	T003	N03	N04	50	40	1.00	acero_comercial

Antes Siguiente

Nota. Tablas de verificación de los elementos de la red antes de la ejecución del cálculo hidráulico.

La tercera pantalla presenta la solución del sistema y la memoria de cálculo generada por el software, como se muestra en la Figura 15. En ella se reportan los resultados del análisis hidráulico, la bomba seleccionada y el detalle completo del procedimiento de cálculo, cuya estructura se describe en la siguiente sección.

Figura 15*Pantalla de resultados y memoria de cálculo*

Nota. Presentación de la solución hidráulica, la bomba seleccionada y la memoria de cálculo del sistema.

El funcionamiento de la interfaz se apoya en un conjunto de funciones auxiliares desarrolladas por fuera del archivo principal de la aplicación, con el fin de mantener la modularidad del código. La Tabla 7 resume estas funciones y su propósito dentro de la interfaz.

Tabla 10*Funciones auxiliares de la interfaz gráfica*

Función	Propósito
app_configurar_canvas.m	Configura el lienzo interactivo para la construcción de la red hidráulica.

Función	Propósito
app_cargar_tipos_nodo.m	Carga los tipos de nodo disponibles en las listas de la interfaz.
app_cargar_fluidos.m	Carga los fluidos de trabajo disponibles desde la base de datos de propiedades.
app_buscar_nodo.m	Localiza el nodo seleccionado por el usuario dentro de la estructura de la red.
app_buscar_tuberia.m	Localiza la tubería seleccionada por el usuario dentro de la estructura de la red.
app_cambiar_tipo_nodo.m	Asigna el tipo de elemento hidráulico al nodo seleccionado.
app_mostrar_info_nodo.m	Presenta las propiedades del elemento seleccionado en el panel de descripción.
app_nombre_a_clave.m	Convierte los nombres mostrados en la interfaz en las claves internas de las bases de datos.
app_tipo_a_clave.m	Convierte los tipos de elemento de la interfaz en las claves internas del modelo hidráulico.
app_resumen_html.m	Genera el resumen de nodos y tuberías presentado en la segunda pantalla.
app_resultados_html.m	Genera la memoria de cálculo presentada en la tercera pantalla.
app_exportar_pdf.m	Exporta la memoria de cálculo como reporte hidráulico en formato PDF.

Nota. El código de estas funciones se presenta en el Apéndice F.

6.3.2 Integración entre la interfaz y los módulos de cálculo

Una vez desarrolladas las pantallas, se realizó la integración entre la interfaz gráfica y el motor de cálculo de la Fase II. Al avanzar desde la pantalla de resumen, la interfaz traduce los elementos definidos en el lienzo a la estructura computacional de la red mediante `sistema_tuberias.m`, ejecuta la resolución hidráulica mediante `resolver_sistema.m`, apoyada en las funciones de cálculo de pérdidas y propiedades, e invoca el algoritmo de selección `analisis_bomba.m` para determinar las bombas compatibles con el sistema. De esta manera, el usuario ejecuta la totalidad del proceso de cálculo y selección sin interactuar directamente con el entorno de programación.

Los resultados retornados por el motor de cálculo se presentan en la tercera pantalla mediante una memoria de cálculo generada en formato HTML por las funciones `app_resumen_html.m` y `app_resultados_html.m`. La memoria se estructura en cinco secciones: la primera presenta las propiedades del fluido de trabajo evaluadas a la temperatura de operación ingresada; la segunda presenta el resumen del sistema, incluyendo el desnivel, las pérdidas por fricción, las pérdidas menores y la carga total requerida, junto con la contribución de cada elemento de la red; la tercera presenta el detalle hidráulico por elemento, reportando para cada tramo de tubería el diámetro interior, la velocidad, el número de Reynolds, el régimen de flujo, el factor de fricción calculado mediante Colebrook–White y la pérdida resultante por Darcy–Weisbach, y para cada nodo la pérdida menor asociada a su tipo; la cuarta presenta los parámetros de la bomba seleccionada, incluyendo el caudal y la carga en el punto de operación, la eficiencia, el NPSH requerido y el punto de mejor eficiencia del equipo; y la quinta presenta las curvas características de la bomba y del sistema con el punto de operación determinado.

Adicionalmente, mediante la función `app_exportar_pdf.m` el usuario puede exportar la memoria de cálculo como un reporte hidráulico en formato PDF, el cual constituye el soporte documental del proceso de selección realizado y permite la trazabilidad completa de los cálculos ejecutados por el software. La Figura 16 presenta un ejemplo del reporte exportado, y un reporte completo generado por el software se presenta en el Apéndice H.

Figura 16

Reporte hidráulico exportado en formato PDF

0. Fluido		
Parámetro	Valor	Unidad
Fluido	R134a	—
Temperatura	-5.0	°C
Densidad	1311.00	kg/m ³
Viscosidad dinámica	2.947000e-04	kg/m.s
Viscosidad cinemática	2.2479e-07	m ² /s

1. Resumen del sistema	
Componente	Valor [m]
dz (desnivel)	53.0000
hL fricción	0.0353
hL menores	0.0001
hL total	0.0354
H sys	53.0354

Nota. Memoria de cálculo exportada como soporte documental del proceso de selección.

6.3.3 Validación funcional del sistema

La validación funcional se orientó a evaluar la precisión, la estabilidad y la coherencia de los resultados del software bajo diferentes condiciones hidráulicas. Para ello, los resultados obtenidos a través de la interfaz se compararon con los generados por los scripts de prueba desarrollados durante la Fase II, verificando que la integración con el motor de cálculo no

modificara los resultados del análisis. Adicionalmente, los valores intermedios reportados en la memoria de cálculo, incluyendo velocidades, números de Reynolds, factores de fricción y pérdidas por tramo, se verificaron mediante cálculo manual sobre casos representativos, comprobando la correcta aplicación de las ecuaciones implementadas.

Las pruebas se realizaron sobre configuraciones con diferentes disposiciones de tuberías y accesorios, diferentes fluidos de trabajo y temperaturas de operación, y diferentes condiciones de elevación y demanda, evaluando la coherencia de la selección realizada por el algoritmo en cada caso. Asimismo, se verificó el funcionamiento del conmutador de unidades, comprobando la consistencia de los resultados al trabajar en sistema internacional y en sistema imperial.

6.3.4 Evaluación de usabilidad y ajustes finales

Finalmente, se analizó la interacción de los usuarios con el software con el fin de identificar e implementar mejoras funcionales sobre la versión desarrollada. A partir de esta evaluación se realizaron ajustes orientados a facilitar el uso de la herramienta y reducir errores de ingreso de información, incluyendo la verificación intermedia de los datos mediante la pantalla de resumen, la asignación automática de las propiedades del fluido a partir de su selección y temperatura, la presentación de las propiedades de cada elemento en el panel de descripción y la exportación del reporte final como soporte del proceso.

De esta manera, la Fase III permitió consolidar la versión final validada del software, integrando la interfaz gráfica desarrollada en App Designer con el motor de cálculo de la Fase II y verificando su funcionamiento bajo diferentes condiciones de operación. Con estos resultados, correspondientes a los medios de verificación definidos en la Tabla 3, se completó el desarrollo del software interactivo de selección de bombas centrífugas, el cual permite al usuario definir la instalación hidráulica, obtener las opciones de bombas compatibles a partir de las especificaciones

técnicas del fabricante y generar el soporte documental del proceso, dando cumplimiento al objetivo general del proyecto.

6.4 Alcance y limitaciones de la versión desarrollada

La versión actual del software presenta las siguientes limitaciones, cuyo reconocimiento delimita el alcance de los resultados y orienta los trabajos futuros. Primero, la base de datos incluye únicamente bombas del fabricante Barnes de Colombia, si bien la arquitectura admite la incorporación de nuevos catálogos mediante el procedimiento de digitalización descrito. Segundo, el análisis se restringe a fluidos newtonianos incompresibles en régimen permanente, con propiedades evaluadas a la temperatura de operación ingresada. Tercero, la selección se jerarquiza por eficiencia hidráulica y no incorpora aún criterios económicos como el costo del equipo o el costo del ciclo de vida. Estas limitaciones no comprometen la validez de los resultados presentados dentro del alcance definido y constituyen la base de la hoja de ruta planteada en las conclusiones.

7. Conclusiones

Se desarrolló un software interactivo en el entorno MATLAB para la selección de bombas centrífugas en instalaciones hidráulicas, el cual integra el modelado del sistema mediante nodos y conexiones, un motor de cálculo hidráulico, una base de datos construida a partir de las especificaciones técnicas del fabricante Barnes y una interfaz gráfica que guía al usuario desde la definición de la instalación hasta la obtención de la bomba recomendada. De esta manera se dio cumplimiento al objetivo general del proyecto, obteniendo una herramienta que verifica que las opciones de selección satisfagan los requisitos de caudal, carga y eficiencia del sistema analizado.

El análisis de las especificaciones técnicas del fabricante permitió establecer los criterios de caudal, carga y eficiencia que rigen el proceso de selección. Debido a que la información de los catálogos se encuentra principalmente en formato gráfico, la digitalización de las curvas características constituyó un paso determinante del proyecto, ya que permitió transformar la información del fabricante en datos numéricos organizados dentro de una base de datos estructurada en formato .mat, con curvas de carga, eficiencia, potencia y NPSH requerido consultables e interpolables computacionalmente. Asimismo, el modelo de nodos y conexiones demostró ser una representación adecuada de las instalaciones hidráulicas, al permitir incorporar tanques, accesorios y tramos de tubería con sus propiedades dentro de una estructura procesable por el software.

El módulo de selección desarrollado permitió automatizar un procedimiento que tradicionalmente se realiza de forma manual sobre los catálogos del fabricante. La implementación de la ecuación de Darcy–Weisbach con el cálculo iterativo del factor de fricción mediante Colebrook–White, junto con el método del coeficiente de resistencia para las pérdidas menores, permitió reproducir el comportamiento hidráulico del sistema y determinar la altura dinámica total

requerida. Sobre esta base, el algoritmo de filtrado secuencial por rango de operación, compatibilidad de diámetros, carga disponible, punto de operación y cercanía a la región de mejor eficiencia entregó selecciones consistentes, repetibles y trazables, basadas directamente en las especificaciones técnicas del fabricante.

La validación del software mediante pruebas bajo diferentes configuraciones de red, fluidos de trabajo y condiciones de operación permitió verificar la precisión y coherencia de los resultados, al compararlos con los obtenidos mediante los scripts de prueba del motor de cálculo y mediante cálculo manual sobre casos representativos. Adicionalmente, la estructura de la interfaz en pantallas secuenciales con verificación intermedia de la información, junto con la generación de la memoria de cálculo exportable en formato PDF, aportó trazabilidad completa al proceso de selección, característica que diferencia la herramienta desarrollada del procedimiento manual convencional y que facilita la revisión técnica de los resultados.

Finalmente, la arquitectura modular del software, en la cual las bases de datos, las funciones de cálculo, el algoritmo de selección y la interfaz se encuentran desacoplados, deja establecida una plataforma extensible para trabajos futuros, entre los que se destacan la incorporación de catálogos de otros fabricantes mediante el mismo procedimiento de digitalización, la evaluación de arreglos de bombas en serie y en paralelo, la verificación de cavitación a partir del NPSH disponible de la instalación y la inclusión de criterios de selección adicionales como el consumo energético o el costo de los equipos.

Referencias Bibliográficas

- American Petroleum Institute. (2021). Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries (API Standard 610, 12.^a ed.). API.
- American Society of Mechanical Engineers. (2018). Welded and seamless wrought steel pipe (ASME B36.10M-2018). ASME.
- Barnes de Colombia S.A. (s.f.). Bomba caracol CE, DE, EE, EEP [Catálogo técnico].
<https://www.barnes.com.co/bomba-caracol-ce-de-ee-eeep>
- Barnes de Colombia S.A. (s.f.). Catálogo de productos [Sitio web]. <https://www.barnes.com.co>
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). Métodos numéricos para ingenieros (7.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Churchill, S. W. (1977). Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. Chemical Engineering, 84(24), 91–92.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones (4.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Colebrook, C. F. (1939). Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. Journal of the Institution of Civil Engineers, 11(4), 133–156.
- Crane Co. (2013). Flow of fluids through valves, fittings, and pipe (Technical Paper No. 410). Crane Co.
- Cross, H. (1936). Analysis of flow in networks of conduits or conductors (Bulletin No. 286). University of Illinois Engineering Experiment Station.

- Galiano Martínez, A. J. (2015). Creación de aplicación gráfica con Matlab para el análisis de una bomba centrífuga [Trabajo de fin de grado, Universidad de Jaén]. Repositorio institucional de la Universidad de Jaén. <http://hdl.handle.net/10953.1/1826>
- Gulich, J. F. (2014). Centrifugal pumps (3.^a ed.). Springer.
- HidraSoftware. (s.f.). BOMBAS: Software para la selección de bombas centrífugas. <https://www.hidrasoftware.com/software-para-la-seleccion-de-bombas-centrifugas/>
- Hydraulic Institute. (2017). Rotodynamic pumps — Guideline for operating regions (ANSI/HI 9.6.3-2017). Hydraulic Institute.
- Hydraulic Institute. (2017a). Rotodynamic pumps — Guideline for NPSH margin (ANSI/HI 9.6.1-2017). Hydraulic Institute.
- Hydraulic Institute, Europump y U.S. Department of Energy. (2001). Pump life cycle costs: A guide to LCC analysis for pumping systems (DOE/GO-102001-1190). U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies.
- International Organization for Standardization. (2011). Technical specifications for centrifugal pumps — Class II (ISO 5199:2002). ISO.
- International Organization for Standardization. (2012). Rotodynamic pumps — Hydraulic performance acceptance tests — Grades 1, 2 and 3 (ISO 9906:2012). ISO.
- Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2008). Pump handbook (4.^a ed.). McGraw-Hill.
- Moody, L. F. (1944). Friction factors for pipe flow. Transactions of the ASME, 66(8), 671–684.
- Mott, R. L., & Untener, J. A. (2015). Mecánica de fluidos (7.^a ed.). Pearson Educación.
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2013). Fundamentals of fluid mechanics (7.^a ed.). Wiley.

- Pérez-Barreto, R. (2004). Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas. *Minería y Geología*, 20(1-2). <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/131>
- Pritchard, P. J., & Mitchell, J. W. (2015). *Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics* (9.^a ed.). Wiley.
- Rohatgi, A. (2022). WebPlotDigitizer (versión 4.6) [Software]. <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías: Abastecimiento de agua, redes, riegos*. Alfaomega.
- Swamee, P. K., & Jain, A. K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(5), 657–664.
- The MathWorks, Inc. (2024). MATLAB (versión R2024a) [Software]. <https://www.mathworks.com>
- The MathWorks, Inc. (2024). MATLAB App Designer [Documentación en línea]. <https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>
- White, F. M. (2011). *Fluid mechanics* (7.^a ed.). McGraw-Hill.