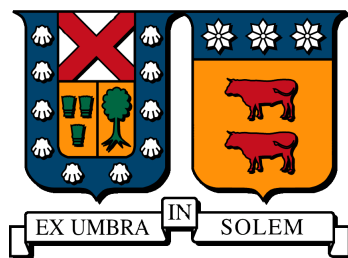


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**SANTIAGO-CHILE**



**“IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE  
LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE  
BOMBAS CENTRÍFUGAS CON ENFOQUE  
EN APLICACIONES ACADÉMICAS”**

**ANDRÉ FRERAUT VALENCIA.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA : DR. ING. MIRIAM ROTH**  
**PROFESOR CORREFERENTE : DR. ING. JOAQUÍN MURA**

**Diciembre 2025**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):** ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS CON ENFOQUE EN APLICACIONES ACADÉMICAS

**Nombre del candidato(a):** André Gabrielle Freraut Valencia

**Carrera / Grado:** ingeniería civil mecánica

**Campus:** San Joaquín

**Departamento:** Mecánica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Miriam Roth Kliem \_\_\_\_\_, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 30/12/2025

**Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 24/12/2025

**Firma:**

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# Abstract

The present work aims to develop an experimental analysis of the characteristic curves of centrifugal pumps operating in single, series, and parallel configurations, based on the test bench implemented at the Hydraulic Laboratory of the Universidad Técnica Federico Santa María. The study seeks to validate the metrological performance of the bench and to compare the experimental results with theoretical predictions and manufacturer curves, following the guidelines of the ISO 9906:2012 standard.

Measurements were carried out using industrial-grade instrumentation. a Siemens electromagnetic flowmeter, WIKA and Danfoss pressure transmitters, an RTD Pt100 temperature sensor, and Siemens Sinamics frequency inverters with data acquisition performed in 60 s averaging windows. The results demonstrated excellent repeatability of the system (deviations below 3 %) and satisfactory temporal stability, confirming the reliability of the bench for academic applications. However, significant fluctuations and high uncertainties in suction pressures were observed, exceeding the tolerance limits of ISO 9906 grade 3, mainly due to turbulence, microbubbles, and sensor sensitivity under low-pressure conditions. Additionally, it was verified that the temperature recorded during the single-pump tests of Pump 2 did not correspond to its actual circuit, since the sensor was installed at the suction line of Pump 1, introducing a systematic bias in the thermal corrections.

The experimental  $H-Q$ ,  $P_{shaft}-Q$ , and  $\eta-Q$  curves were generally found below the manufacturer curves, reflecting the combined effects of pump wear, system losses, and the idealization of factory testing conditions. Nevertheless, the observed trends were consistent with theoretical behavior, experimentally validating the configuration laws of centrifugal pumps: head summation in series and flow summation in parallel.

Finally, the results confirmed the academic value of the test bench as a reliable educational and research tool, capable of reproducing the fundamental hydraulic principles of centrifugal pumps and enhancing the experimental understanding of turbomachinery systems.

# Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo desarrollar un análisis experimental de las curvas características de bombas centrífugas, operando en configuraciones individuales, en serie y en paralelo, a partir del banco de ensayos implementado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Técnica Federico Santa María. El estudio busca validar el desempeño metrológico del banco y contrastar los resultados experimentales con los valores teóricos y las curvas del fabricante, bajo los lineamientos de la norma ISO 9906:2012.

Las mediciones se realizaron empleando instrumentación industrial de precisión. Caudalímetro electromagnético Siemens, transmisores de presión WIKA y Danfoss, sensor RTD Pt100 y variadores de frecuencia Siemens Sinamics, registrando datos en ventanas de promediado de 60 s. Los resultados demostraron una excelente repetibilidad del sistema (variaciones menores al 3 %), y una estabilidad temporal adecuada, confirmando la confiabilidad del banco para fines académicos. Sin embargo, se detectaron fluctuaciones e incertidumbres elevadas en las presiones de succión, que exceden los límites del grado 3 de la norma, debido a turbulencias, microburbujas y sensibilidad del sensor en baja presión. Asimismo, se verificó que la temperatura registrada en los ensayos individuales de la Bomba 2 no corresponde a su circuito real, al encontrarse el sensor instalado en la succión de la Bomba 1, lo que introduce un sesgo sistemático en las correcciones térmicas.

Las curvas experimentales  $H-Q$ ,  $P_{eje}-Q$  y  $\eta-Q$  se situaron, en general, por debajo de las curvas del fabricante, evidenciando el efecto conjunto del desgaste de las bombas, las pérdidas del sistema y la idealización de los ensayos de fábrica. Aun así, las tendencias fueron coherentes con la teoría, validando las leyes de configuración de bombas centrífugas: suma de alturas en serie y suma de caudales en paralelo.

Finalmente, se consolidó la utilidad académica del banco como herramienta formativa, capaz de reproducir de forma confiable los principios hidráulicos fundamentales y de servir como plataforma experimental para la enseñanza y la investigación en turbomáquinas.

# Índice general

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduccion                                                            | 1  |
| 2. Objetivos                                                               | 2  |
| 3. Marco Téorico                                                           | 3  |
| 3.1. Bombas centrífugas . . . . .                                          | 3  |
| 3.2. Ecuaciones fundamentales . . . . .                                    | 4  |
| 3.3. Curvas características de las bombas centrífugas . . . . .            | 6  |
| 3.4. Configuraciones de conexión de bombas . . . . .                       | 12 |
| 3.5. Análisis de datos . . . . .                                           | 17 |
| 4. Metodología                                                             | 30 |
| 4.1. Descripción del banco de pruebas . . . . .                            | 30 |
| 4.1.1. Configuración general del circuito . . . . .                        | 30 |
| 4.1.2. Componentes principales del sistema . . . . .                       | 31 |
| 4.2. Instrumentación y sistema de adquisición de datos . . . . .           | 34 |
| 4.2.1. Medición de variables primarias . . . . .                           | 34 |
| 4.2.2. Sistema de control y adquisición de datos . . . . .                 | 38 |
| 4.2.3. Tabla resumen de instrumentación . . . . .                          | 40 |
| 4.3. Procedimiento experimental . . . . .                                  | 40 |
| 4.3.1. Preparación y configuraciones de ensayo . . . . .                   | 40 |
| 4.3.2. Plan de validación metrológica (base de resultados 5.1) . . . . .   | 41 |
| 4.3.3. Ensayo de curvas características (base de resultados 5.2) . . . . . | 42 |
| 4.3.4. Ensayo de curva del sistema (base de resultados 5.2.3) . . . . .    | 43 |
| 4.4. Metodología de análisis de datos . . . . .                            | 43 |
| 4.4.1. Procesamiento de datos crudos . . . . .                             | 44 |
| 4.4.2. Cálculo de Parámetros de Rendimiento Experimental . . . . .         | 44 |
| 4.4.3. Corrección experimental por leyes de afinidad . . . . .             | 44 |
| 4.4.4. Análisis de incertidumbre experimental . . . . .                    | 44 |
| 4.4.5. Metodología de comparación con curvas del fabricante . . . . .      | 45 |
| 4.5. Implementación académica y documentación . . . . .                    | 45 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5. Resultados                                                                           | 48 |
| 5.0.1. Análisis de estabilidad y definición de la ventana de adquisición                | 48 |
| 5.0.2. Análisis de fluctuaciones (clasificación según ISO 9906:2012)                    | 50 |
| 5.0.3. Prueba de repetibilidad del ensayo                                               | 52 |
| 5.1. Curvas Características                                                             | 54 |
| 5.1.1. Rendimiento en configuraciones combinadas                                        | 58 |
| 5.1.2. Curva del Sistema                                                                | 61 |
| 6. Discusión                                                                            | 64 |
| 6.1. Calidad metrológica del banco                                                      | 64 |
| 6.1.1. Independencia temporal de las mediciones                                         | 65 |
| 6.1.2. Fluctuaciones instantáneas                                                       | 65 |
| 6.1.3. Análisis desagregado de fluctuaciones por variable y configuración (ISO 9906)    | 66 |
| 6.1.4. Repetibilidad e incertidumbre                                                    | 68 |
| 6.1.5. Cumplimiento de los grados de incertidumbre según ISO 9906                       | 69 |
| 6.2. Diferencia entre el catálogo y las mediciones: análisis del rendimiento individual | 70 |
| 6.2.1. Definición del BEP y comparación con fabricante                                  | 71 |
| 6.3. Validación experimental                                                            | 72 |
| 6.3.1. Validación cruzada de la curva del sistema                                       | 72 |
| 6.3.2. Demostración de las configuraciones serie y paralelo                             | 72 |
| 7. Conclusión                                                                           | 74 |
| 7.1. Evaluación metrológica del banco de ensayos                                        | 74 |
| 7.1.1. Análisis de incertidumbres y cumplimiento normativo                              | 75 |
| 7.2. Análisis de rendimiento hidráulico                                                 | 76 |
| 7.3. Validación de los principios teóricos                                              | 77 |
| 7.4. Alcances académicos y proyección futura                                            | 78 |
| 8. Recomendaciones                                                                      | 79 |
| 8.1. Recomendaciones metrológicas                                                       | 79 |
| 8.1.1. Optimización de las mediciones de presión                                        | 79 |
| 8.1.2. Optimización de las mediciones de presión                                        | 80 |
| 8.1.3. Verificación y calibración periódica                                             | 81 |
| 8.1.4. Mejoras en la línea de succión                                                   | 82 |

|        |                                                                |     |
|--------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.5. | Verificación del régimen de cavitación y NPSH . . . . .        | 83  |
| 8.1.6. | Optimización del sistema de descarga . . . . .                 | 83  |
| 8.2.   | Recomendaciones normativas y de control experimental . . . . . | 84  |
| 8.2.1. | Alineación con ISO 9906:2012 . . . . .                         | 84  |
| 8.2.2. | Automatización y control de adquisición . . . . .              | 84  |
| 8.3.   | Recomendaciones académicas y de investigación . . . . .        | 84  |
| 8.3.1. | Fortalecimiento del uso docente . . . . .                      | 84  |
| 8.3.2. | Líneas futuras de desarrollo . . . . .                         | 85  |
| 8.4.   | Síntesis final . . . . .                                       | 85  |
| A.     | Anexos . . . . .                                               | 88  |
| A.1.   | Análisis Estabilidad . . . . .                                 | 88  |
| A.1.1. | Estabilidad Bomba 1 . . . . .                                  | 88  |
| A.1.2. | Estabilidad Bomba 2 . . . . .                                  | 90  |
| A.1.3. | Estabilidad bombas en paralelo . . . . .                       | 90  |
| A.1.4. | Estabilidad Bombas en serie . . . . .                          | 91  |
| A.2.   | Análisis Detallado de Fluctuaciones ISO 9906 . . . . .         | 91  |
| A.2.1. | Fluctuaciones: Bomba 1 . . . . .                               | 91  |
| A.2.2. | Fluctuaciones: Bomba 2 . . . . .                               | 93  |
| A.2.3. | Fluctuaciones: Configuración Serie . . . . .                   | 96  |
| A.2.4. | Fluctuaciones: Configuración Paralelo . . . . .                | 99  |
| A.3.   | Análisis de repetibilidad . . . . .                            | 103 |
| A.3.1. | Repetibilidad bomba 1 . . . . .                                | 103 |
| A.3.2. | Repetibilidad bomba 2 . . . . .                                | 103 |
| A.4.   | Incertidumbre . . . . .                                        | 105 |
| A.4.1. | Incertidumbre Bomba 1 . . . . .                                | 105 |
| A.4.2. | Incertidumbre Bomba 2 . . . . .                                | 107 |
| A.5.   | Curva del sistema . . . . .                                    | 110 |
| A.5.1. | Curva del sistema empírica . . . . .                           | 110 |
| A.5.2. | Curva del Sistema Teórica . . . . .                            | 111 |
| A.6.   | Instrumentos . . . . .                                         | 113 |
| A.6.1. | Curva de bomba . . . . .                                       | 113 |
| A.6.2. | Motor eléctrico . . . . .                                      | 114 |
| A.6.3. | Sensor Wika S10 . . . . .                                      | 116 |
| A.6.4. | Sensor MBS 1750 . . . . .                                      | 117 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| A.6.5. Tacómetro DT-2236 . . . . .  | 117 |
| A.6.6. Caudalímetro . . . . .       | 118 |
| A.6.7. PLC . . . . .                | 118 |
| A.6.8. VDF . . . . .                | 119 |
| A.6.9. Módulos analógicos . . . . . | 120 |
| A.7. Código Python . . . . .        | 121 |

# Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Bomba centrífuga [22]. . . . .                                                                                                                                                    | 3  |
| 3.2. Curva del sistema . . . . .                                                                                                                                                       | 6  |
| 3.3. Curvas características de una bomba centrífuga NM/N65-125 [18]. . . . .                                                                                                           | 7  |
| 3.4. Leyes de semejanza . . . . .                                                                                                                                                      | 11 |
| 3.5. Sistema de bombas en serie [8]. . . . .                                                                                                                                           | 13 |
| 3.6. Curvas características de bombas en configuración serie [13]. . . . .                                                                                                             | 13 |
| 3.7. Bomba centrífuga multietapa vertical [11]. . . . .                                                                                                                                | 14 |
| 3.8. Estación de Bombeo PS0 – Tranque Talabre – Chuquicamata [5]. . . . .                                                                                                              | 15 |
| 3.9. Sistema de bombas en paralelo [8]. . . . .                                                                                                                                        | 15 |
| 3.10. Curvas características de bombas en configuración paralelo [13]. . . . .                                                                                                         | 16 |
| 4.1. Banco de pruebas de bombas centrífugas del Laboratorio de Termofluidos, UTFSM. . . . .                                                                                            | 31 |
| 4.2. Bomba centrífuga Vogt H620, junto con motor eléctrico Weg W-22. . . . .                                                                                                           | 32 |
| 4.3. Válvula de estrangulación Samson 3277. . . . .                                                                                                                                    | 33 |
| 4.4. válvula de bola Giacomini R850. . . . .                                                                                                                                           | 33 |
| 4.5. Sensor de caudal electromagnético Siemens SITRANS MAG 5100W con transmisor MAG 5000 [12]. . . . .                                                                                 | 34 |
| 4.6. Transmisor de presión Danfoss MBS 1700 [0–10 bar] [4]. . . . .                                                                                                                    | 35 |
| 4.7. Transmisor de presión Wika S-10 [–1 a 15 bar] [21]. . . . .                                                                                                                       | 36 |
| 4.8. Sensor de temperatura PT100, rango [0–80 °C] [17]. . . . .                                                                                                                        | 36 |
| 4.9. Variador de frecuencia Siemens Sinamics G120C de 5,5 kW [16]. . . . .                                                                                                             | 37 |
| 4.10. Tacómetro digital Lutron DT-2236 utilizado para la medición de velocidad de rotación. . . . .                                                                                    | 38 |
| 4.11. Tablero de control del PLC, 2 fuentes de poder, 3 módulos analógicos y switch ethernet. . . . .                                                                                  | 39 |
| 4.12. Pantalla HMI juntos con los controladores de ambos variadores de frecuencia. . . . .                                                                                             | 39 |
| 5.1. Estabilidad de las potencias eléctricas (Pot_MB1, Pot_MB2) en función del tiempo (mediciones) para la configuración en serie, representando el peor caso de convergencia. . . . . | 49 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2. Comparación de curvas H-Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 1.                                                                             | 53  |
| 5.3. Comparación de curvas P-Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 1.                                                                             | 53  |
| 5.4. Comparación de curvas $\eta$ -Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 1.                                                                       | 53  |
| 5.5. Curva H-Q experimental de la bomba 1 y la bomba 2, normalizadas a 2900 rpm, comparadas con la curva teórica del fabricante. . . . .             | 55  |
| 5.6. Curva P-Q experimental de la bomba 1 y la bomba 2, normalizadas a 2900 rpm, comparadas con la curva teórica del fabricante. . . . .             | 56  |
| 5.7. Curva de eficiencia $\eta$ -Q experimental de la bomba 1 y la bomba 2, normalizadas a 2900 rpm, comparadas con la curva teórica del fabricante. | 57  |
| 5.8. Curva H-Q experimental (bombas en serie, normalizada a 2900 rpm). .                                                                             | 58  |
| 5.9. Curva P-Q experimental (bombas en serie, normalizada a 2900 RPM). .                                                                             | 58  |
| 5.10. Curva $\eta$ -Q experimental (Bombas en Serie, normalizada a 2900 RPM). .                                                                      | 59  |
| 5.11. Curva H-Q experimental. . . . .                                                                                                                | 60  |
| 5.12. Curva P-Q experimental. . . . .                                                                                                                | 60  |
| 5.13. Curva $\eta$ -Q experimental. . . . .                                                                                                          | 61  |
| 5.14. Comparación de la Curva empírica del sistema (ensayo B1) vs. la Curva Teórica. . . . .                                                         | 62  |
| 5.15. Comparación de la Curva empírica del sistema (ensayo B2) vs. la Curva Teórica. . . . .                                                         | 63  |
|                                                                                                                                                      |     |
| A.1. Análisis de Convergencia del Promedio Acumulado (Apertura 29 %). . .                                                                            | 88  |
| A.2. Análisis de Convergencia del Promedio Acumulado (Apertura 100 %). .                                                                             | 89  |
| A.3. Comparación de curvas H-Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 2.                                                                             | 104 |
| A.4. Comparación de curvas P-Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 2.                                                                             | 104 |
| A.5. Comparación de curvas $\eta$ -Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 2.                                                                       | 105 |
| A.6. Banco de pruebas de bombas centrífugas del Laboratorio de Termofluidos, UTFSM, Diseñado en software Inventor. . . . .                           | 112 |
| A.7. Curva de altura junto a eficiencia en función del caudal entregada por el fabricante. . . . .                                                   | 113 |
| A.8. Curva de potencia y NPSH en función del caudal entregada por el fabricante. . . . .                                                             | 113 |
| A.9. Tolerancias motor eléctrico WEG. . . . .                                                                                                        | 114 |
| A.10. Características eléctricas motor WEG 112M. . . . .                                                                                             | 114 |
| A.11. Eficiencia motor eléctrico en función de la potencia a condiciones nominales. . . . .                                                          | 115 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| A.12.Ficha técnica sensor de presión Wika S10. . . . .                     | 116 |
| A.13.Ficha técnica sensor MBS 1750. . . . .                                | 117 |
| A.14.Ficha técnica tacómetro DT-2236 . . . . .                             | 117 |
| A.15.Ficha técnica sensor y transmisor de caudal Sitrans F.M MAG 5000. . . | 118 |
| A.16.Ficha técnica PLC Siemens CPU 1215 DC/DC/relé. . . . .                | 118 |
| A.17.Ficha técnica Variador de frecuencia G120C. . . . .                   | 119 |
| A.18.Ficha técnica módulos analógicos SM1231. . . . .                      | 120 |

# Índice de tablas

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Parámetros de curvas características de bombas centrífugas [18]. . . . .                                                                                                                      | 7  |
| 3.2. Resumen de grados de aceptación y sentido de tolerancias según ISO 9906:2012. . . . .                                                                                                         | 21 |
| 3.3. Grados de aceptación para la prueba de bombas y sus tolerancias correspondientes (ISO 9906:2012). . . . .                                                                                     | 22 |
| 3.4. Amplitud máxima de fluctuación admisible según ISO 9906:2012 [9]. .                                                                                                                           | 24 |
| 3.5. Valores permitidos para la incertidumbre sistemática [9]. . . . .                                                                                                                             | 25 |
| 3.6. Valores para distribución t-Student (95 % de confianza) [9]. . . . .                                                                                                                          | 25 |
| 3.7. Valores máximos permitidos de incertidumbre general para distintas magnitudes, según ISO 9906:2012. . . . .                                                                                   | 26 |
| 3.8. Valores de incertidumbre general aceptada para eficiencia, según método calculado. ISO 9906 . . . . .                                                                                         | 27 |
| 4.1. Variables de medición, instrumentación asociada y precisión sistemática ( $e_S$ ). . . . .                                                                                                    | 40 |
| 5.1. Ejemplo de análisis de fluctuación punto a punto para la bomba 1. Se muestra la fluctuación medida ( $\pm$ %) y el grado de aceptación ISO 9906 más alto alcanzado por cada variable. . . . . | 50 |
| 5.2. Peor caso de fluctuación ( $\pm$ %) observado en puntos de operación estables (excluyendo shut-off) para las variables clave del banco de ensayos. 51                                         |    |
| 5.3. Máxima desviación porcentual relativa encontrada entre los ensayos de repetibilidad (peor caso entre B1 y B2, datos normalizados a 2900 RPM). 54                                              |    |
| A.1. Análisis de Estabilización de Parámetros de Medición (Bomba 1). . . .                                                                                                                         | 89 |
| A.2. Análisis de Estabilización de Parámetros de Medición (Bomba 2). . . .                                                                                                                         | 90 |
| A.3. Análisis de Estabilización (Configuración en Paralelo). . . . .                                                                                                                               | 90 |
| A.4. Análisis de Estabilización (Configuración en Serie). . . . .                                                                                                                                  | 91 |
| A.5. Análisis detallado de fluctuación ISO 9906 para la Bomba 1: Fluctuación medida ( $\pm$ %) y cumplimiento por Grado. . . . .                                                                   | 91 |
| A.6. Análisis detallado de fluctuación ISO 9906 para la Bomba 1: Fluctuación medida ( $\pm$ %) y cumplimiento por Grado. . . . .                                                                   | 93 |

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A.7. Análisis detallado de fluctuación ISO 9906 para las Bombas en serie:<br>Fluctuación medida ( $\pm$ %) y cumplimiento por Grado. . . . .        | 96  |
| A.8. Análisis detallado de fluctuación ISO 9906 para las Bombas en parale-<br>lo: Fluctuación medida ( $\pm$ %) y cumplimiento por Grado. . . . .   | 99  |
| A.9. Evaluación de repetitibilidad entre ensayos experimentales (Bomba 1). .                                                                        | 103 |
| A.10. Evaluación de repetitibilidad entre ensayos experimentales (Bomba 2). .                                                                       | 103 |
| A.11. Desglose de los componentes de la incertidumbres (en %) para cada<br>parámetro medido, según la apertura de la válvula para la bomba 1. . . . | 105 |
| A.12. Resultados de Altura Manométrica (H) y Eficiencia ( $\eta$ ) con sus incerti-<br>dumbres propagadas para la bomba 1. . . . .                  | 107 |
| A.13. Desglose de los componentes de la incertidumbres (en %) para cada<br>parámetro medido, según la apertura de la válvula para la bomba 2. . . . | 107 |
| A.14. Resultados de Altura Manométrica (H) y Eficiencia ( $\eta$ ) con sus incerti-<br>dumbres propagadas para la bomba 2. . . . .                  | 109 |
| A.15. Datos Empíricos de la Curva del Sistema (Ensayo Bomba 1). . . . .                                                                             | 110 |
| A.16. Datos Empíricos de la Curva del Sistema (Ensayo Bomba 2). . . . .                                                                             | 110 |
| A.17. Parámetros para el Cálculo de la Curva Teórica del Sistema. . . . .                                                                           | 111 |

# Capítulo 1

## Introduccion

Las bombas centrífugas cumplen un rol esencial en diversas aplicaciones industriales, como el suministro de agua, la minería y los sistemas de climatización. Su capacidad para transportar fluidos de manera eficiente las convierte en componentes clave en el diseño y operación de sistemas hidráulicos. Desde el punto de vista energético, se estima que los sistemas de bombeo, compuestos mayoritariamente por bombas centrífugas, representan un 20 % del consumo eléctrico mundial. Esta cifra pone de manifiesto la importancia de optimizar su operación, ya que mejoras en la selección y en la interacción bomba-sistema pueden traducirse en reducciones significativas de costos y de impacto ambiental.

Para adaptarse a distintos requerimientos operacionales, las bombas centrífugas pueden funcionar de manera individual o en configuraciones en serie o en paralelo, permitiendo modificar la relación entre caudal y carga. Diversos estudios señalan que el mayor potencial de mejora en eficiencia energética se encuentra en la correcta selección de las bombas y en su adecuado acoplamiento con el sistema hidráulico, más que en la eficiencia aislada de las máquinas. En este sentido, comprender su comportamiento bajo distintas configuraciones resulta fundamental para maximizar la eficiencia y asegurar una operación confiable.

En el ámbito académico, se considera de gran relevancia complementar la formación teórica con experiencias prácticas. Si bien el laboratorio de termo-hidráulica dispone de un banco de pruebas, su uso docente aún no se encuentra completamente sistematizado. En este contexto, la presente memoria busca desarrollar un programa experimental que permita estudiar el desempeño hidráulico de bombas centrífugas en configuración simple, en serie y en paralelo.

El objetivo principal es analizar experimentalmente las curvas características de carga, potencia y eficiencia, compararlas con las curvas teóricas del fabricante y proponer una metodología replicable para futuras ediciones del curso, contribuyendo a consolidar el banco de pruebas como una herramienta formativa para la comprensión del punto de operación y de la influencia del sistema en la eficiencia global.

# Capítulo 2

## Objetivos

### Objetivo General

Desarrollar material académico basado en resultados experimentales obtenidos en el banco de pruebas de bombas centrífugas del laboratorio de termo-hidráulica de la UTFSM, orientado a la enseñanza práctica del comportamiento de bombas en configuraciones individuales, en serie y en paralelo. El propósito es complementar la formación teórica de los estudiantes con experiencias experimentales que fortalezcan la comprensión de los principios hidráulicos y energéticos, mediante el uso de instrumentación y adquisición de datos automatizada.

### Objetivos Específicos

- Obtener experimentalmente las curvas de carga, potencia y eficiencia de las bombas centrífugas en configuraciones serie y paralelo.
- Comparar las curvas obtenidas experimentalmente con las curvas teóricas proporcionadas por el fabricante, identificando posibles diferencias.
- Identificar el punto de operación óptimo de las bombas
- Desarrollar una metodología de medición y análisis basada en los resultados experimentales, para ser aplicada en futuros ensayos del curso de turbomáquinas.
- Elaborar un documento académico que estructure una metodología de uso del banco de pruebas ya implementado, orientada a actividades prácticas del curso de turbomáquinas.

# Capítulo 3

## Marco Téorico

### 3.1. Bombas centrífugas

Las bomba centrífuga son turbomáquinas hidráulicas generadoras que convierten energía mecánica en energía hidráulica, transfiriendo energía a un fluido en movimiento a través de un rodete rotatorio. Estas bombas, clasificada como máquinas dinámicas, generan un incremento de presión y velocidad en el fluido al transformarlo de energía cinética en energía de presión en la voluta o el difusor [2] [10] [22].



Figura 3.1: Bomba centrífuga [22].

Según la literatura técnica, el principio fundamental de operación de las bombas centrífugas se basa en el concepto de energía por unidad de peso del fluido, conocido como altura, carga o "head". El desempeño de estas bombas se evalúa mediante curvas características que representan parámetros hidráulicos como la altura manométrica y la eficiencia en función del caudal a diferentes puntos de operación. [10] [14].

El funcionamiento de una bomba centrífuga comienza con la entrada del fluido en dirección axial, en el punto de succión. Al girar el rodete, se genera fuerza centrífuga-

ga, la cual impulsa al fluido hacia la periferia, incrementando su velocidad y presión. Luego, el fluido pasa a través de la voluta o difusor, transformando la energía cinética en energía de presión, generando una diferencia de presión positiva de presión entre la entrada y salida de la bomba [22] [15].

El análisis del comportamiento de las bombas centrífugas se fundamenta, por una parte, en el principio de conservación de la energía, el cual permite relacionar la potencia hidráulica entregada al fluido con parámetros macroscópicos del sistema, tales como el caudal, la altura manométrica y la potencia de eje. Por otra parte, la ecuación de Euler para turbomáquinas, derivada de la conservación del momento angular, describe el intercambio de energía entre el rodete y el fluido a partir de la cinemática de las velocidades, siendo clave para comprender el mecanismo de transferencia energética en la bomba [10] [3].

## 3.2. Ecuaciones fundamentales

### Conservación de la energía

El principio de conservación de la energía establece que, en un sistema abierto, la energía se conserva considerando los intercambios de trabajo y energía con el entorno. En el contexto de la mecánica de fluidos, este principio se aplica al análisis del movimiento de los fluidos en sistemas hidráulicos, incluyendo el estudio de bombas centrífugas, las cuales operan bajo un régimen de flujo continuo [7].

Cuando un fluido se desplaza a través de una tubería o un sistema de bombeo, su energía total se distribuye en diferentes formas: energía de presión, energía cinética y energía potencial gravitatoria. En un sistema ideal, sin pérdidas por fricción ni efectos disipativos, la suma de estas contribuciones energéticas entre dos secciones del flujo se mantiene constante [20]. Matemáticamente, se expresa como:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gh = \text{constante} \quad [\text{J/kg}] \quad (3.1)$$

Donde:

- $P$ : Presión estática del fluido [Pa],
- $\rho$ : Densidad del fluido [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $v$ : Velocidad del fluido [m/s],

- $g$ : Aceleración debido a la gravedad  $[\text{m/s}^2]$ ,
- $h$ : Altura geométrica del sistema  $[\text{m}]$ .

### Aplicación en bombas centrífugas

En el análisis de bombas centrífugas, la energía mecánica entregada por el rodete al fluido se manifiesta como un aumento de su presión, velocidad y/o altura. Esta transferencia energética puede representarse mediante una altura total equivalente  $H$ , que resume la energía específica que la bomba aporta al fluido. A partir de la ecuación de conservación de la energía, esta altura se expresa como:

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta z \quad [\text{m}] \quad (3.2)$$

Esta formulación permite determinar la energía requerida por un sistema hidráulico para transportar una determinada cantidad de fluido, siendo un elemento central en el diseño y análisis de sistemas de bombeo [19, 23].

La relación entre la altura total  $H$  y el caudal  $Q$  define la curva característica de la bomba  $H(Q)$ , la cual describe el comportamiento energético del equipo para distintos regímenes de operación.

### Curva del sistema y punto de operación

En un sistema hidráulico real, la conservación de la energía permite incorporar las pérdidas de carga asociadas al flujo a través de tuberías, válvulas y accesorios. De este modo, la altura requerida por el sistema puede expresarse como la suma de la altura estática y las pérdidas por fricción, las cuales dependen del caudal:

$$H_{\text{sistema}} = H_{\text{estática}} + H_f(Q) \quad (3.3)$$

La representación de esta relación define la curva del sistema, que crece con el caudal debido al aumento de las pérdidas hidráulicas. El punto de operación del conjunto bomba–sistema se determina como la intersección entre la curva característica de la bomba y la curva del sistema, correspondiendo a la condición real de funcionamiento del sistema hidráulico. Este punto resulta fundamental para evaluar el desempeño, la eficiencia y la correcta selección de la bomba, como se puede visualizar en la figura 3.2.

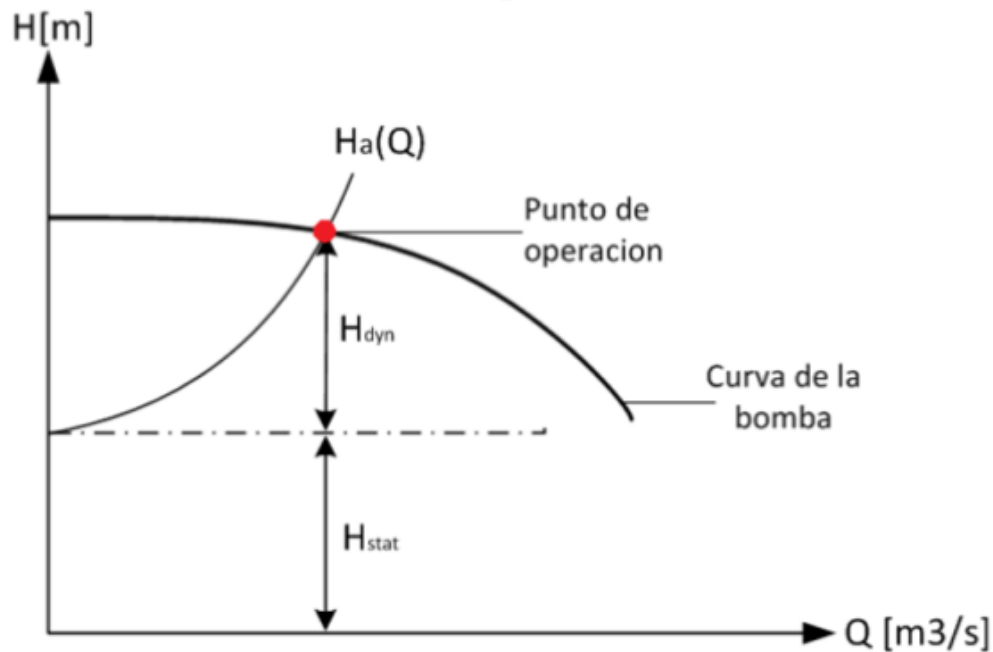


Figura 3.2: Curva del sistema

### 3.3. Curvas características de las bombas centrífugas

Las curvas características de una bomba centrífuga son representaciones gráficas que describen el desempeño hidráulico y energético de la máquina bajo diferentes condiciones de operación. Estas curvas se obtienen a partir de ensayos en banco de pruebas, manteniendo constante la velocidad de rotación de la bomba.

Las curvas principales que caracterizan el funcionamiento de una bomba centrífuga son:

- Curva de altura manométrica vs. caudal ( $H-Q$ ): muestra cómo varía la energía específica entregada por la bomba en función del caudal.
- Curva de potencia vs. caudal ( $P-Q$ ): representa la potencia absorbida en el eje de la máquina para distintos caudales. En bombas monoblock, esta potencia suele incorporar el rendimiento del motor eléctrico.
- Curva de eficiencia vs. caudal ( $\eta-Q$ ): indica el rendimiento de la bomba en función del caudal, destacando el punto de máxima eficiencia o Best Efficiency Point (BEP).
- Curva de NPSH requerido ( $NPSH_r-Q$ ): indica la carga neta positiva de succión mínima requerida por la bomba para evitar fenómenos de cavitación.

El NPSH (Net Positive Suction Head) corresponde a la diferencia entre la carga total disponible en la succión de la bomba y la presión de vapor del fluido, expresada en metros de columna de líquido. Su correcta evaluación es fundamental para garantizar una operación segura y libre de cavitación.

El análisis conjunto de estas curvas con la curva del sistema de bombeo permite identificar el punto de operación del sistema, evaluar la estabilidad hidráulica y seleccionar adecuadamente la bomba para una aplicación específica.

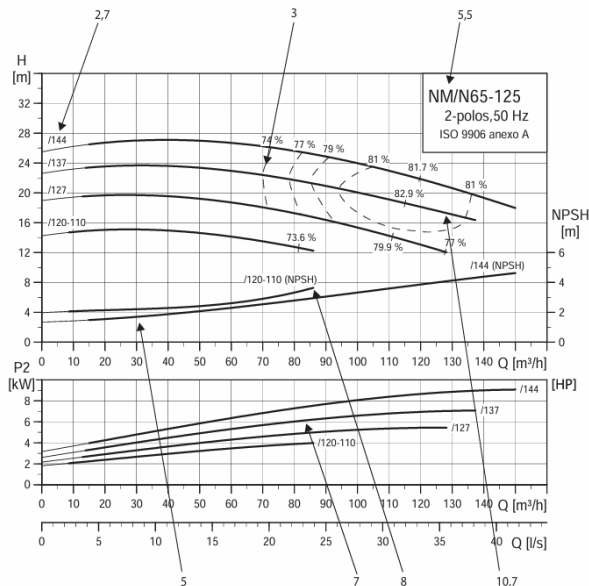


Figura 3.3: Curvas características de una bomba centrífuga NM/N65-125 [18].

|   |                                                                    |
|---|--------------------------------------------------------------------|
| 1 | Altura total de la bomba, $p$ [kPa] o $H$ [m] = $H_{\text{total}}$ |
| 2 | Diámetro del impulsor [mm]                                         |
| 3 | Curvas de eficiencia hidráulica $\eta$ [%]                         |
| 4 | Tipo de bomba, número de polos y frecuencia                        |
| 5 | Curva NPSH para impulsor máximo                                    |
| 6 | Curva NPSH para impulsor mínimo                                    |
| 7 | Curva de potencia absorbida en el eje $P_2$ [kW]                   |
| 8 | Curva Q–H de la bomba.                                             |

Tabla 3.1: Parámetros de curvas características de bombas centrífugas [18].

### Curva de altura manométrica vs. caudal (H–Q)

La curva característica H–Q es la más representativa en el análisis de bombas centrífugas, ya que describe la relación entre la altura manométrica generada por la bomba y el caudal impulsado. Esta curva refleja la capacidad de la bomba para transformar la energía mecánica del rodete en energía hidráulica del fluido y permite predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

En bombas centrífugas de rodete radial, la altura manométrica disminuye a medida que aumenta el caudal, lo que representa el límite natural del trabajo de la bomba para este tipo de diseño. El conocimiento de esta curva es esencial porque:

- Determina el rango operativo de la bomba.

- Permite identificar el punto de operación hidráulico y, cuando se dispone de curvas de eficiencia superpuestas, localizar el punto de máxima eficiencia (BEP).
- Define las zonas estables o inestables de operación, fundamentales para la selección y control de bombas en un sistema hidráulico.

## Curvas de potencia ( $P-Q$ )

Las curvas de potencia representan la relación entre el caudal bombeado ( $Q$ ) y la potencia suministrada al eje de la bomba o utilizada por esta en los distintos puntos de operación. Constituyen un complemento esencial a la curva  $H-Q$ , ya que permiten analizar no solo la energía transferida al fluido, sino también la demanda energética del conjunto bomba-motor.

La potencia en el eje de la bomba puede determinarse mediante dos métodos principales:

- Medición directa: mediante un torquímetro, registrando el torque ( $T$ ) aplicado al eje de la bomba y la velocidad angular ( $\omega$ ).
- Medición indirecta: a partir de la potencia eléctrica suministrada al motor.

En el primer caso, la potencia en el eje se obtiene como:

$$P_a = \omega \cdot T \quad (3.4)$$

Mientras que, a partir de la potencia eléctrica:

$$P_e = V \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (3.5)$$

Considerando la eficiencia del motor ( $\eta_m$ ), se obtiene la potencia transmitida al eje de la bomba:

$$P_a = P_e \cdot \eta_m \quad (3.6)$$

En bombas centrífugas radiales y diagonales, la potencia en el eje tiende a aumentar con el caudal. No obstante, a caudales muy bajos, la bomba puede presentar un consumo energético elevado debido a importantes pérdidas hidráulicas internas asociadas a recirculaciones y al efecto de bombeo, lo que reduce significativamente su eficiencia. En bombas axiales, por el contrario, la potencia suele disminuir al incrementarse el caudal.

Estas curvas son fundamentales para dimensionar el motor de accionamiento y seleccionar las protecciones.

### Curvas de Eficiencia ( $\eta$ - $Q$ )

Las curvas de eficiencia muestran la relación entre el caudal bombeado ( $Q$ ) y el rendimiento global de la bomba, expresado como el cociente entre la potencia hidráulica ( $P_{hid}$ ) y la potencia absorbida ( $P_a$ ). Matemáticamente se define como:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_a} \quad (3.7)$$

Donde:

- $\eta$ : Eficiencia de la bomba (%),
- $P_u$ : Potencia útil transmitida al fluido [W],
- $P_a$ : Potencia absorbida por la bomba [W],
- $Q$ : Caudal volumétrico [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],
- $H$ : Altura manométrica total [m].

El aspecto más relevante de estas curvas es el punto de máxima eficiencia ( $BEP$ , Best Efficiency Point), donde la bomba opera en condiciones óptimas de transferencia energética. La operación en torno a este punto resulta ventajosa porque:

- Minimiza las pérdidas energéticas y el consumo eléctrico.
- Reduce vibraciones, cavitación y desgaste mecánico.
- Disminuye los costos de operación y mantenimiento.
- Favorece un funcionamiento estable, confiable y sostenible.

En general, la curva de eficiencia presenta una forma parabólica, alcanzando un máximo en el  $BEP$  y decreciendo hacia caudales menores o mayores. Por esta razón, la selección y dimensionamiento de bombas se realiza procurando que el punto de operación del sistema esté lo más cercano posible al  $BEP$ , garantizando así el mejor aprovechamiento energético y la mayor vida útil del equipo.

### Leyes de semejanza en bombas centrífugas

Una vez identificados los parámetros principales de las curvas características, es posible analizar cómo se comporta una bomba al variar su velocidad de giro. Las leyes

de semejanza (o leyes de afinidad) permiten predecir el comportamiento hidráulico de una bomba a diferentes regímenes de operación a partir de ensayos en una única velocidad de referencia.

## Fundamentos

Cuando una bomba centrífuga trabaja con un fluido de la misma naturaleza (densidad constante) y bajo condiciones geométricas semejantes, el cambio en la velocidad de rotación  $n$  afecta proporcionalmente a las variables hidráulicas principales:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (3.8)$$

donde:

- $Q$ : caudal volumétrico [m<sup>3</sup>/s],
- $H$ : altura manométrica [m],
- $P$ : potencia absorbida [W],
- $n$ : velocidad de rotación [rpm].

Estas relaciones muestran que al duplicar la velocidad de giro, el caudal también se duplica, la altura se cuadruplica y la potencia se multiplica por ocho.

Es importante destacar que las ecuaciones de semejanza clásicas asumen que la eficiencia de la bomba permanece constante al variar la velocidad de giro. Esta suposición es válida únicamente cuando las variaciones de velocidad no superan el 10–20 % de la velocidad nominal de diseño, ya que en ese rango no se producen cambios significativos en las pérdidas internas ni en los fenómenos de recirculación [1, 6].

Cuando las variaciones de velocidad son mayores, la eficiencia puede verse afectada de manera apreciable, por lo que es necesario considerar factores de corrección o recurrir a ensayos experimentales que permitan ajustar las predicciones de las leyes de afinidad.

## Parábolas de regímenes semejantes

Si se grafican las curvas  $H-Q$  para distintas velocidades  $n_1, n_2, n_3, \dots$ , se obtiene un conjunto de parábolas congruentes denominadas parábolas de regímenes semejantes. Cada parábola conecta puntos homólogos ( $A_1, A_2, A_3$ ), que representan condiciones equivalentes de eficiencia a diferentes velocidades.

Para un punto A a caudal  $q$  y altura  $H$ , se cumple:

$$\frac{H_{A1}}{q_{A1}^2} = \frac{H_{A2}}{q_{A2}^2} = k_A \quad (3.9)$$

donde  $k_A$  es una constante característica de la parábola que une los puntos homólogos.

Así, si se conoce la curva de referencia a velocidad  $n_1$ , es posible obtener las curvas para cualquier otra velocidad  $n_2$  aplicando las leyes de semejanza como se puede visualizar en la figura 3.4.

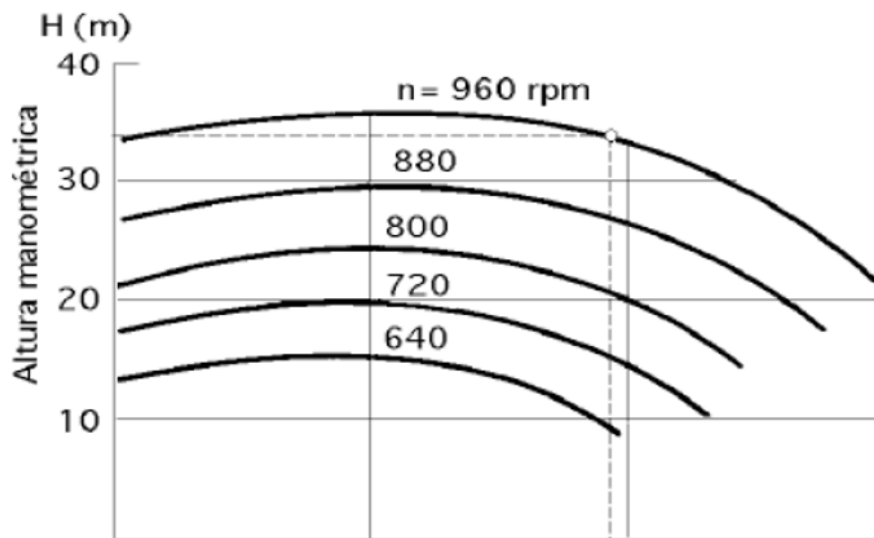


Figura 3.4: Leyes de semejanza

### Aplicaciones prácticas

Las leyes de semejanza son esenciales en ingeniería hidráulica porque permiten:

- Reducir costos de ensayo: basta con ensayar una bomba a una velocidad de referencia para conocer su comportamiento a otras.
- Predecir el rendimiento en condiciones variables: muy útil cuando las bombas operan con variadores de frecuencia.
- Optimizar la selección: permiten estimar el punto de operación óptimo (BEP) y el rango de eficiencia sin necesidad de ensayos adicionales.

En conclusión, las parábolas de regímenes semejantes constituyen una herramienta robusta para el diseño y evaluación de sistemas de bombeo, asegurando eficiencia

energética y confiabilidad operativa.

### **3.4. Configuraciones de conexión de bombas**

En la práctica industrial es frecuente que un solo equipo de bombeo no logre cubrir por sí mismo los requerimientos de caudal y/o presión de un sistema hidráulico. Por esta razón, las bombas centrífugas pueden conectarse en distintas configuraciones que permiten adaptar su desempeño a las condiciones de operación.

Las dos disposiciones más utilizadas son:

- **Serie:** cuando se requiere incrementar la altura manométrica manteniendo constante el caudal.
- **Paralelo:** cuando se busca aumentar el caudal total manteniendo prácticamente constante la altura, siendo además una configuración adecuada para sistemas con demandas de caudal o diferencias de presión variables en el tiempo, ya que permite la puesta en servicio o detención de bombas adicionales según los requerimientos operacionales.

El análisis de estas configuraciones resulta fundamental tanto en aplicaciones industriales como en el ámbito académico, ya que permite comprender la flexibilidad y versatilidad de los sistemas de bombeo, además de optimizar su eficiencia energética y confiabilidad operativa.

#### **Curvas en configuración serie**

En una configuración en serie, dos o más bombas centrífugas están conectadas de manera que el fluido pasa consecutivamente por cada una de ellas, como se puede visualizar en la figura 3.5. Como resultado, el caudal del sistema se mantiene constante, pero la altura manométrica total se incrementa, ya que suma la contribución de cada bomba. Esta contribución se puede ver en la figura 3.6.

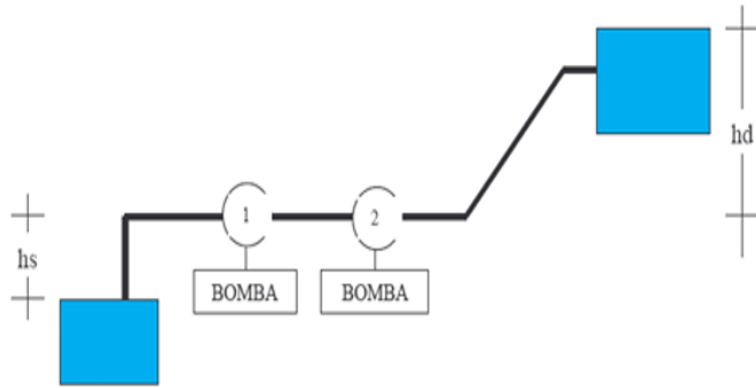


Figura 3.5: Sistema de bombas en serie [8].

La curva característica del sistema en configuración serie se obtiene sumando las alturas manométricas de cada bomba para un mismo caudal:

$$H_{\text{serie}}(Q) = H_1(Q) + H_2(Q) + \dots + H_n(Q) \quad (3.10)$$

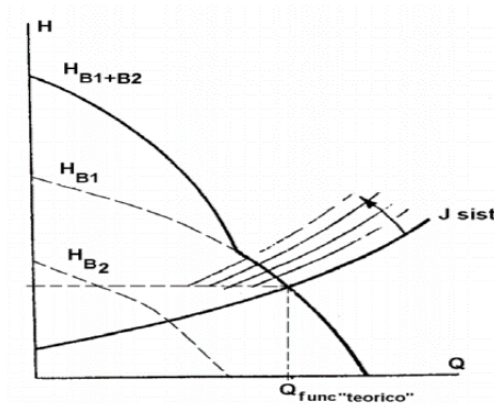


Figura 3.6: Curvas características de bombas en configuración serie [13].

Este tipo de configuración es útil cuando se requiere superar grandes diferencias de altura, como en sistemas de abastecimiento en edificios altos, transporte de fluidos en pendientes pronunciadas o procesos mineros con largas extensiones de piping o sistemas de osmosis inversa para desalar agua de mar. Generalmente, para estos casos se distinguen dos aplicaciones comunes:

- Bombas multietapas: corresponden a bombas que integran a varios rodetes en un mismo eje, operando como si fueran varias bombas en serie, conformada como

en la figura 3.7. Se utilizan cuando se requiere una alta presión en un espacio compacto, como en calderas o sistemas de alimentación de agua a alta presión.

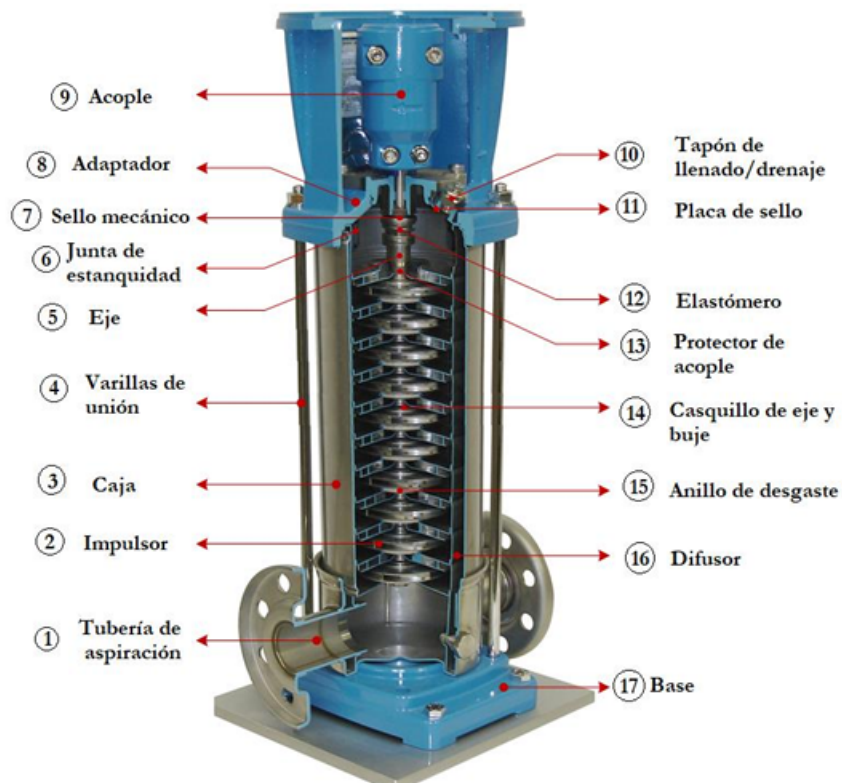


Figura 3.7: Bomba centrífuga multietapa vertical [11].

- Estaciones de bombeo en serie (minería): Cuando el trayecto de conducción del fluido es extenso, como en mineroductos, se instalan varias estaciones de bombeo a lo largo de la tubería, cada una sumando presión al sistema consecutivamente para mantener el flujo constante. Esta solución permite gestionar pérdidas de carga por fricción y mantener una operación eficiente, como se puede ver en la figura 3.8 la estación de bombeo en la minera Chuquicamata, donde se evita equipos muy grandes con condiciones extremas de funcionamiento.



Figura 3.8: Estación de Bombeo PS0 – Tranque Talabre – Chuquicamata [5].

### Curvas en configuración paralelo

En una configuración en paralelo, cada bomba impulsa fluido desde una fuente hacia una línea común de descarga, de modo que sus caudales se suman aguas arriba del sistema. Esto puede observarse en la figura 3.9, donde las dos bombas descargan hacia una tubería que alimenta un mismo destino.

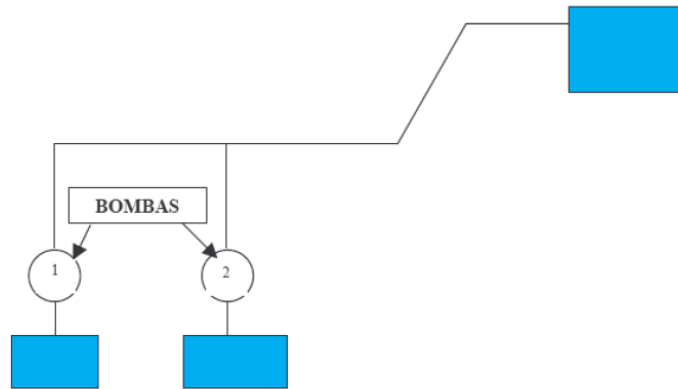


Figura 3.9: Sistema de bombas en paralelo [8].

Esta configuración se utiliza para aumentar el caudal total ( $Q_{total}$ ) del sistema mientras se mantiene constante la altura manométrica ( $H$ ), ya que todas las bombas operan a la misma presión de descarga, esto se ve en la figura 3.10. La curva característica del sistema en paralelo se obtiene sumando los caudales de las bombas individuales para una misma altura manométrica:

$$Q_{\text{paralelo}}(H) = Q_1(H) + Q_2(H) + \cdots + Q_n(H) \quad (3.11)$$

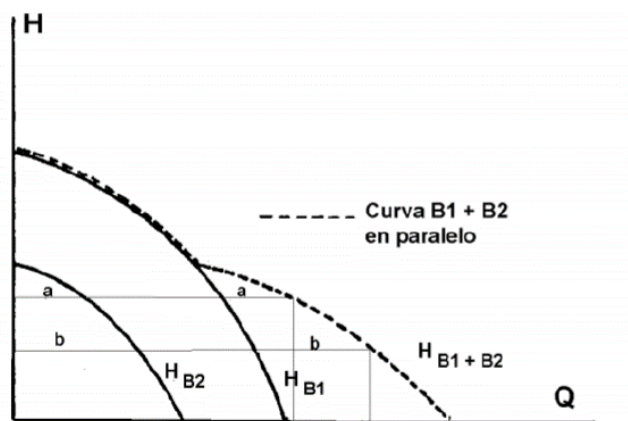


Figura 3.10: Curvas características de bombas en configuración paralelo [13].

El uso de bombas en paralelo es ideal en procesos donde se requiere manejar grandes volúmenes de fluido, como en plantas de tratamiento de aguas, sistemas de riego o circuitos de refrigeración industrial. Una de sus principales ventajas es la flexibilidad operativa frente a caudales variables, ya que se pueden encender o apagar bombas individuales según la demanda. Esto permite mantener una operación eficiente, evitando que una sola bomba trabaje lejos de su punto de máxima eficiencia, y facilita la realización de mantenimiento sin detener completamente el sistema.

### Importancia de las curvas características en el diseño de sistemas

El análisis de las curvas características de bombas en configuraciones serie y paralelo es esencial para:

- Diseñar sistemas hidráulicos eficientes: Permiten seleccionar configuraciones adecuadas según los requerimientos de altura y caudal.
- Optimizar el rendimiento energético: Garantizan que las bombas operen cerca de sus puntos de máxima eficiencia.
- Prevenir fallas: Ayudan a identificar condiciones de operación fuera del rango recomendado, lo que podría causar daños a las bombas o al sistema.
- Aumentar seguridad operativa: Facilita la realización de mantenencias programadas sin necesidad de detener completamente el bombeo, al permitir operar con bombas de respaldo o redundantes en sistemas en paralelo.

### 3.5. Análisis de datos

El análisis de datos experimentales constituye una etapa esencial en la validación de hipótesis y modelos teóricos, así como en la obtención de conclusiones confiables acerca del comportamiento de sistemas físicos. En el caso de bombas centrífugas, este análisis no solo permite construir curvas características a partir de las variables medidas, sino también cuantificar la precisión y confiabilidad de dichas mediciones.

Para lograrlo, resulta indispensable aplicar técnicas estadísticas que permitan identificar, clasificar y reducir los errores experimentales, así como estimar la incertidumbre asociada a los resultados. Asimismo, es necesario enmarcar el tratamiento de los datos dentro de normativas internacionales como la ISO 9906:2012, que establece criterios de exactitud, tolerancia y procedimientos de ensayo en bombas centrífugas.

De este modo, el análisis de datos no se limita únicamente a procesar información cruda obtenida de los instrumentos de medición, sino que constituye un procedimiento sistemático que combina estadística, control de calidad e interpretación técnica para garantizar que los resultados presentados sean reproducibles, comparables y académicamente válidos.

#### Errores de medición y tratamiento estadístico

En toda medición experimental es inevitable la incertidumbre de las mediciones, los cuales afectan la exactitud y confiabilidad de los resultados. Comprender la naturaleza de estos errores y aplicar un tratamiento estadístico adecuado es fundamental para garantizar la validez de los ensayos experimentales y de los parámetros derivados de ellos.

##### Errores sistemáticos ( $e_s$ )

Son aquellos que mantienen una magnitud y signo constantes a lo largo de todas las mediciones, provocando un sesgo en los resultados respecto al valor real. Generalmente provienen de:

- Calibración inadecuada: instrumentos mal calibrados o con errores propios de diseño.
- Condiciones ambientales: variaciones en temperatura, humedad o vibraciones que afectan la lectura.

- Errores del operador: procedimientos inadecuados en la toma de datos.
- Interacción instrumento-sistema: por ejemplo, un manómetro que altera ligeramente la presión del fluido al medir.

$$e_s = e_{instrumental}$$

Estos errores no se reducen al aumentar el número de mediciones y deben corregirse mediante calibración, compensación o técnicas de comparación con patrones de referencia.

### Errores aleatorios ( $e_R$ )

Los errores aleatorios se originan por fluctuaciones impredecibles en las condiciones de medición o en el propio sistema, lo que genera dispersión en los valores obtenidos, por ejemplo, debido a la turbulencia inherente al flujo. A diferencia de los errores sistemáticos, su efecto puede disminuirse mediante el análisis estadístico de múltiples observaciones, siendo el promediado de datos la herramienta más común para atenuarlos. No obstante, el valor promedio no describe la naturaleza ni la magnitud de estas fluctuaciones, para lo cual resulta necesario el uso de indicadores estadísticos como la desviación estándar.

### Tratamiento estadístico de los datos

Para caracterizar un conjunto de mediciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , se emplean los siguientes parámetros estadísticos:

- Valor medio o promedio:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.12)$$

El valor medio representa la mejor estimación del valor verdadero de la magnitud medida.

- Desviación estándar muestral: cuantifica la dispersión de los valores respecto del promedio.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.13)$$

- Incertidumbre aleatoria del promedio: esta incertidumbre corresponde exclusivamente a la variabilidad estadística de las mediciones repetidas y se estima utilizando la distribución  $t$  de Student para un nivel de confianza del 95 %. El uso de esta distribución se justifica debido a que el número de mediciones es finito y reducido, y la desviación estándar poblacional es desconocida, condiciones bajo las cuales la distribución normal no resulta aplicable. Este criterio es consistente con lo establecido en la norma ISO 9906.

$$e_R = \frac{100 \cdot t \cdot s}{\bar{x} \cdot \sqrt{n}} \quad [\%] \quad (3.14)$$

- $t$  es el coeficiente de la distribución  $t$  de Student para  $(n - 1)$  grados de libertad.
- $s$  corresponde a la desviación estándar muestral.
- $\bar{x}$  es el valor medio de la serie de datos.
- $n$  es el número de mediciones realizadas en cada punto de operación.

Cabe destacar que la incertidumbre aleatoria  $e_R$  representa únicamente la variabilidad estadística de las mediciones y no corresponde a la incertidumbre total del sistema de medición. La incertidumbre global del sistema  $e_{\text{sistema}}$  se obtiene combinando la incertidumbre aleatoria con la incertidumbre sistemática  $e_S$ , según:

$$e_{\text{sistema}} = \sqrt{e_S^2 + e_R^2} \quad (3.15)$$

Finalmente, los resultados experimentales se expresan en la forma:

$$X = \bar{x} \pm e_{\text{sistema}} \quad (3.16)$$

lo que garantiza que el intervalo de confianza reportado representa de manera adecuada la precisión global del sistema de medición.

## Propagación de errores y presentación de resultados

Cuando un parámetro experimental depende de múltiples variables, se debe calcular la propagación de errores para estimar la incertidumbre global. Si  $Y$  es una función de

$u$  y  $v$ , su varianza se calcula como:

$$s^2(Y) = \left(\frac{\partial Y}{\partial u}\right)^2 s^2(u) + \left(\frac{\partial Y}{\partial v}\right)^2 s^2(v) \quad (3.17)$$

Finalmente, los resultados experimentales deben presentarse con su respectiva incertidumbre, utilizando el formato:

$$Y = \bar{Y} \pm e \quad (3.18)$$

Esto asegura que las conclusiones obtenidas sean estadísticamente confiables y reproducibles.

## **Norma ISO 9906:2012 y su aplicación**

La Norma Internacional ISO 9906:2012, titulada oficialmente "Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance tests – Grades 1, 2 and 3", es el estándar internacional para la verificación del desempeño hidráulico de bombas rotodinámicas, incluyendo bombas centrífugas, de flujo mixto y axiales. Esta norma, que anula y reemplaza a su primera edición (ISO9906:1999) especifica los ensayos de rendimiento hidráulico para la aceptación del cliente.

El propósito de este estándar es garantizar que las curvas características obtenidas experimentalmente cumplan con los criterios internacionales de calidad, facilitando una comparación fiable con las garantías ofrecidas por los fabricantes. La norma está destinada a su uso en instalaciones de ensayo, tales como laboratorios académicos o centros de prueba de fabricantes. Es aplicable a bombas de cualquier tamaño que manejen líquidos que se comporten como agua limpia y fría.

Es relevante notar la armonización global del estándar: la norma estadounidense ANSI/HI 14.6:2011 y la posterior ASISO9906:2018 están en concordancia técnica con el contenido de la ISO9906:2012. Esto implica que los usuarios que especifican pruebas de aceptación operarán bajo requisitos técnicos y grados de aceptación virtualmente idénticos.

## **Grados de aceptación y tolerancias**

La ISO9906:2012 establece tres niveles de exigencia principales para los ensayos de rendimiento, que están desglosados en seis subgrados con tolerancias específicas.

Cuanto menor es el número del grado, mayor es la precisión requerida y más ajustadas son las tolerancias.

Los niveles se clasifican como:

Tabla 3.2: Resumen de grados de aceptación y sentido de tolerancias según ISO 9906:2012.

| Nivel de grado | Código | Sentido de tolerancia | Enfoque / Observación                               |
|----------------|--------|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| Grado 1        | 1U     | Unidireccional        | Más estricto; no se permite quedar bajo la garantía |
|                | 1E     | Bilateral             | Mayor énfasis en eficiencia                         |
|                | 1B     | Bilateral             | Tolerancias ajustadas                               |
| Grado 2        | 2U     | Unidireccional        | Nivel intermedio                                    |
|                | 2B     | Bilateral             | Nivel intermedio                                    |
| Grado 3        | 3B     | Bilateral             | Más amplio; grado por defecto                       |

especificando las tolerancias para las clasificaciones según la tabla 3.3

Tabla 3.3: Grados de aceptación para la prueba de bombas y sus tolerancias correspondientes (ISO 9906:2012).

| Grado               | 1     |                    | 2                  | 3         | Requisito de Garantía |
|---------------------|-------|--------------------|--------------------|-----------|-----------------------|
|                     | 1U    | 1E/1B              |                    |           |                       |
| $\Delta\tau_Q$      | 10 %  |                    | 16 %               | 18 %      | No aplica             |
| $\Delta\tau_H$      | 6 %   |                    | 10 %               | 14 %      | No aplica             |
| Grado de aceptación | 1U    | 1E/1B              | 2B/2U              | 3B        |                       |
| $\tau_Q$            | +10 % | $\pm 5$ %          | $\pm 8$ %<br>+16 % | $\pm 9$ % | Obligatorio           |
| $\tau_H$            | +6 %  | $\pm 3$ %          | $\pm 5$ %<br>+10 % | $\pm 7$ % | Obligatorio           |
| $\tau_P$            | +10 % | $\pm 4$ %          | $\pm 8$ %<br>+16 % | $\pm 9$ % | Opcional              |
| $\tau_\eta$         | —     | $\geq 0$ %<br>—3 % | —5 %               | —7 %      | Opcional              |

**Nota:**  $\tau_x$  ( $x = Q, H, P, \eta$ ) representa la tolerancia de la cantidad indicada.

En términos prácticos, el grado 1 se utiliza cuando se requiere una verificación más estricta del cumplimiento de garantía (por ejemplo, ensayos de aceptación contractual). El grado 2 corresponde a un nivel intermedio, típico de validaciones técnicas y control de desempeño. El grado 3B es el criterio por defecto de la norma y suele emplearse en contextos de ensayo académico o comparativo, donde se prioriza la reproducibilidad bajo exigencias menos restrictivas.

### Principio de la prueba y leyes de afinidad

El ensayo de aceptación tiene como objetivo principal el Punto de Garantía (Guarantee point), el cual corresponde al punto de flujo/altura ( $Q/H$ ) que la bomba debe alcanzar dentro de las tolerancias predefinidas. La garantía se cumple si, bajo las condiciones de la norma, la curva media de rendimiento obtenida toca o atraviesa los márgenes de tolerancia que envuelven el punto de garantía.

Cuando la velocidad de rotación ( $n$ ) medida durante la prueba difiere de la velocidad nominal o especificada ( $n_{sp}$ ), los resultados deben corregirse mediante las leyes de

afinidad:

$$Q_T = Q \cdot \frac{n_{sp}}{n}, \quad (3.19)$$

$$H_T = H \cdot \left( \frac{n_{sp}}{n} \right)^2, \quad (3.20)$$

$$P_T = P \cdot \left( \frac{n_{sp}}{n} \right)^3 \cdot \left( \frac{\rho_{sp}}{\rho} \right), \quad (3.21)$$

donde el subíndice  $T$  denota el valor corregido a la condición nominal.

### Metrología y evaluación de la incertidumbre

La verificación del cumplimiento de la norma se sustenta en una estricta evaluación metrológica, que incluye la cuantificación de las fluctuaciones y la estimación de la incertidumbre de medición.

**Fluctuación admisible:** Previo al cálculo de las incertidumbres, la norma ISO 9906:2012 establece que se deben verificar las fluctuaciones instantáneas de las variables medidas (caudal, presión, altura diferencial, potencia, velocidad, etc.) para asegurar la estabilidad del sistema de ensayo. Si las oscilaciones superan los límites establecidos, es obligatorio utilizar dispositivos de amortiguación o filtrado simétrico y lineal que reduzcan dichas variaciones sin distorsionar la señal promedio.

La amplitud de fluctuación de una variable medida  $x$  se determina mediante la expresión:

$$\delta_x = \frac{x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}}{\bar{x}} \times 100 \quad [\%] \quad (3.22)$$

donde:

- $x_{\text{máx}}$  y  $x_{\text{mín}}$  corresponden a los valores máximo y mínimo registrados durante el intervalo de régimen estacionario.
- $\bar{x}$  es el valor medio del conjunto de mediciones.

Este valor de  $\delta_x$  se compara con los límites máximos admisibles definidos por la norma, según el grado de precisión del ensayo (Grado 1, 2 o 3). Si la fluctuación calculada excede los límites de la tabla siguiente, el punto de medición se considera inválido o debe repetirse bajo condiciones de flujo más estables.

Tabla 3.4: Amplitud máxima de fluctuación admisible según ISO 9906:2012 [9].

| Variable                             | Grado 1                 | Grado 2    | Grado 3     |
|--------------------------------------|-------------------------|------------|-------------|
| Caudal $Q$                           | $\pm 2 \%$              | $\pm 3 \%$ | $\pm 6 \%$  |
| Altura diferencial $H_{\text{diff}}$ | $\pm 3 \%$              | $\pm 4 \%$ | $\pm 10 \%$ |
| Presión en descarga                  | $\pm 2 \%$              | $\pm 3 \%$ | $\pm 6 \%$  |
| Presión en succión                   | $\pm 2 \%$              | $\pm 3 \%$ | $\pm 6 \%$  |
| Potencia absorbida                   | $\pm 2 \%$              | $\pm 3 \%$ | $\pm 6 \%$  |
| Velocidad de rotación                | $\pm 0,5 \%$            | $\pm 1 \%$ | $\pm 2 \%$  |
| Torque en eje                        | $\pm 2 \%$              | $\pm 3 \%$ | $\pm 6 \%$  |
| Temperatura del líquido              | $\pm 0,3^\circ\text{C}$ |            |             |

De esta forma, el procedimiento garantiza que las mediciones utilizadas en el análisis posterior sean representativas de un flujo estable y reproducible, condición indispensable para la validez de los ensayos de aceptación bajo la norma ISO 9906:2012.

**Incertidumbre de medición.** La incertidumbre total ( $e$ ) combina la componente aleatoria ( $e_R$ ) y la sistemática ( $e_S$ ):

$$e = \sqrt{e_R^2 + e_S^2}. \quad (3.23)$$

**Incertidumbre sistemática** Corresponde a la asociada a las características de los instrumentos de medición y su calibración. Según la Norma ISO 9906:2012, todos los instrumentos deben estar calibrados con trazabilidad a estándares internacionales y correctamente ajustados a cero, además de instalados conforme a las recomendaciones del fabricante y a las condiciones de la norma.

A diferencia de la incertidumbre aleatoria, la sistemática no se reduce con más mediciones, ya que depende únicamente de la calibración y del desempeño intrínseco del instrumento.

Los valores máximos permitidos para cada magnitud (caudal, altura, potencia, velocidad, entre otras) se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 3.5: Valores permitidos para la incertidumbre sistemática [9].

| Magnitud medida                       | Grado 1     | Grados 2 y 3 |
|---------------------------------------|-------------|--------------|
|                                       | ( %)        | ( %)         |
| Caudal                                | $\pm 1,5$   | $\pm 2,5$    |
| Altura diferencial                    | $\pm 1,0$   | $\pm 2,5$    |
| Altura de descarga                    | $\pm 1,0$   | $\pm 2,5$    |
| Altura de succión                     | $\pm 1,0$   | $\pm 2,5$    |
| Altura de succión para ensayo de NPSH | $\pm 0,5^a$ | $\pm 1,0$    |
| Potencia de entrada al motor          | $\pm 1,0$   | $\pm 2,0$    |
| Velocidad de rotación                 | $\pm 0,35$  | $\pm 1,0$    |
| Torque                                | $\pm 0,9$   | $\pm 2,0$    |

<sup>a</sup> Aplicable exclusivamente a ensayos de determinación de NPSH.

El error aleatoria se estima estadísticamente con la distribución *t*-Student (ecuación 3.14) y sucede que el valor *t* de la ecuación se debe seleccionar de acuerdo con los valores de la Tabla 3.6, que representan los valores asignados según una distribución *t*-Student, basada en una confianza del 95 %.

Tabla 3.6: Valores para distribución *t*-Student (95 % de confianza) [9].

| <i>n</i> | <i>t</i> | <i>n</i> | <i>t</i> |
|----------|----------|----------|----------|
| 3        | 4,30     | 12       | 2,20     |
| 4        | 3,18     | 13       | 2,18     |
| 5        | 2,78     | 14       | 2,16     |
| 6        | 2,57     | 15       | 2,14     |
| 7        | 2,45     | 16       | 2,13     |
| 8        | 2,36     | 17       | 2,12     |
| 9        | 2,31     | 18       | 2,11     |
| 10       | 2,26     | 19       | 2,10     |
| 11       | 2,23     | 20       | 2,09     |

*Nota:* *n* es el número de lecturas por punto; los grados de libertad son *n* – 1 y *t* es el valor del coeficiente de *t*-student.

**Incertidumbre general** Una vez determinadas las componentes de incertidumbre sistemática y aleatoria, se calcula la incertidumbre general combinada mediante la ecuación 3.23. Posteriormente, este valor debe compararse con los límites máximos permitidos para cada variable de ensayo, establecidos por la Norma ISO 9906:2012, los cuales se resumen en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Valores máximos permitidos de incertidumbre general para distintas magnitudes, según ISO 9906:2012.

| Variable                                                 | Símbolo   | Grado 1 [ % ] | Grados 2, 3 [ % ] |
|----------------------------------------------------------|-----------|---------------|-------------------|
| Caudal                                                   | $e_Q$     | $\pm 2,0$     | $\pm 3,5$         |
| Velocidad de rotación                                    | $e_n$     | $\pm 0,5$     | $\pm 2,0$         |
| Torque                                                   | $e_T$     | $\pm 1,4$     | $\pm 3,0$         |
| Altura total de bombeo                                   | $e_H$     | $\pm 1,5$     | $\pm 3,5$         |
| Entrada de alimentación del controlador                  | $e_{Pgr}$ | $\pm 1,5$     | $\pm 3,5$         |
| Potencia entrada bomba (torque y velocidad)              | $e_P$     | $\pm 1,5$     | $\pm 3,5$         |
| Potencia entrada bomba (alimentación y eficiencia motor) | $e_P$     | $\pm 2,0$     | $\pm 4,0$         |

**Incertidumbre en la eficiencia** La ISO 9906:2012 establece que la incertidumbre asociada al cálculo de la eficiencia hidráulica depende del método utilizado para determinar la potencia absorbida por la bomba. Existen principalmente dos enfoques de cálculo:

1. Cuando la potencia de entrada se determina a partir de la alimentación del controlador, considerando directamente la energía eléctrica suministrada. En este caso, la incertidumbre general de la eficiencia se expresa como:

$$e_{\eta gr} = \sqrt{e_Q^2 + e_H^2 + e_{Pgr}^2} \quad (3.24)$$

2. Cuando la eficiencia se calcula a partir del torque ( $T$ ) y la velocidad de rotación ( $n$ ), siendo la potencia de entrada el producto de ambas magnitudes. En este caso, la propagación de la incertidumbre incluye estos términos adicionales:

$$e_{\eta} = \sqrt{e_Q^2 + e_H^2 + e_T^2 + e_n^2} \quad (3.25)$$

3. Finalmente, si la eficiencia se obtiene a partir de la potencia eléctrica de entra-

da, corregida por la eficiencia del motor, la incertidumbre se calcula como:

$$e_{\eta} = \sqrt{e_Q^2 + e_H^2 + e_P^2} \quad (3.26)$$

Cada una de estas expresiones permite evaluar el rango de incertidumbre aceptado por la norma en función del método empleado, lo cual es esencial para determinar la confiabilidad de los valores de eficiencia reportados en las curvas características y se verifica la aceptación según la siguiente tabla 3.8.

Tabla 3.8: Valores de incertidumbre general aceptada para eficiencia, según método calculado. ISO 9906

| Variable                                                     | Símbolo       | Grado 1 [ % ] | Grados 2 and 3 [ % ] |
|--------------------------------------------------------------|---------------|---------------|----------------------|
| Eficiencia general (calculada con $Q, H, P_{gr}$ )           | $e_{\eta gr}$ | $\pm 2, 9$    | $\pm 6, 1$           |
| Eficiencia bomba (calculada con $Q, H, T, n$ )               | $e_{\eta}$    | $\pm 2, 9$    | $\pm 6, 1$           |
| Eficiencia bomba (calculada con $Q, H, P_{gr}, \eta_{mot}$ ) | $e_{\eta}$    | $\pm 3, 2$    | $\pm 6, 4$           |

El cumplimiento de los límites de incertidumbre establecidos por la norma ISO 9906:2012 no depende únicamente del método de cálculo empleado, sino también de las condiciones hidráulicas y de instalación del banco de ensayos. Una configuración inadecuada del sistema puede introducir perturbaciones en el flujo que incrementan las fluctuaciones y afectan directamente la calidad metrológica de las mediciones. En este contexto, resulta necesario describir las condiciones operativas y de instalación que debe cumplir el banco de ensayos para asegurar mediciones estables, reproducibles y coherentes con los requisitos normativos.

### Requisitos de Instalación del Banco de Ensayos

El presente subsubcapítulo describe las principales condiciones operativas y de instalación del banco de ensayos de bombas centrífugas que deben cumplirse para asegurar la estabilidad del flujo y la confiabilidad de las mediciones experimentales. Estas condiciones son fundamentales para minimizar perturbaciones hidráulicas y garantizar la reproducibilidad de los resultados obtenidos durante los ensayos.

**Condiciones de flujo.** Para garantizar mediciones confiables, se requiere un flujo axial simétrico, presión estática uniforme y ausencia de remolinos en la sección de medición. Con el fin de minimizar perturbaciones en el flujo, debe mantenerse una longitud recta mínima de al menos  $4D$  desde cualquier discontinuidad (válvulas, codos u

otros accesorios) hasta la sección de medición. En el caso de succión desde un estanque abierto, se recomienda que el tramo recto aguas arriba de la bomba cumpla la siguiente relación:

$$\frac{L}{D} = K + 5. \quad (3.27)$$

donde  $L$  corresponde a la longitud de la tubería recta aguas arriba de la bomba,  $D$  al diámetro de la tubería y  $K$  a un factor dependiente de la condición de instalación, asociado a la presencia de codos, válvulas u otros accesorios previos. El cumplimiento de esta condición permite reducir la generación de remolinos y asimetrías en la presión estática, contribuyendo a la estabilidad y precisión de las mediciones experimentales.

**Instalación de sensores de presión.** Los sensores deben instalarse a una distancia mínima de 2 diámetros ( $2D$ ) desde las bridas de succión y descarga de la bomba. Las perforaciones para las tomas de presión deben cumplir con criterios geométricos precisos, con el fin de no alterar el campo de presiones del flujo:

- La longitud de la perforación ( $\ell$ ) debe satisfacer  $\ell \geq 2,5 d$ , donde  $d$  corresponde al diámetro interno de la perforación utilizada para la toma de presión.
- Para el Grado 1, se exige específicamente la instalación de un anillo colector de presión estática.

**Pérdidas de carga en tubería.** Las pérdidas de carga por fricción ( $H_f$ ) entre la sección de medición y la sección de la bomba deben considerarse en el cálculo de la altura total ( $H$ ) solo si su suma excede el 0,2 % de  $H$  para el Grado 1, o el 0,5 % para los Grados 2 y 3. Basado en el análisis de caudales máximos del banco UTFSM, estas pérdidas son a menudo de un orden menor y no necesitan ser incluidas para los Grados 2 y 3.

### **Aceptación de la prueba y tolerancias**

La prueba de aceptación o recepción consiste en verificar que la curva experimental de la bomba se encuentre dentro de las tolerancias definidas alrededor del punto de garantía, el cual corresponde normalmente al caudal nominal, aunque pueden establecerse garantías adicionales para eficiencia, potencia o NPSH.

La aceptación puede evaluarse de manera:

- Unilateral: La tolerancia solo aplica hacia un lado del eje de la variable.

- Bilateral: La tolerancia se aplica hacia ambos lados, permitiendo variaciones por encima o por debajo del valor garantizado.

### **Método de evaluación de la prueba de aceptación**

La prueba de aceptación debe realizarse en la velocidad nominal de la bomba y sobre el punto de garantía. En caso de que la velocidad de prueba difiera del valor nominal, los resultados deben corregirse aplicando las leyes de afinidad. La norma ISO 9906:2012 establece que la velocidad de giro durante la prueba debe encontrarse en el rango de 50 % a 120 % del valor nominal, siendo recomendable que la variación no supere el 20 % de dicho valor.

**Tolerancias en potencia y eficiencia.** La norma ISO 9906 también establece criterios de aceptación para potencia y eficiencia. En estos casos, el procedimiento difiere: deben graficarse las curvas  $H$  vs  $Q$ ,  $P$  vs  $Q$  y  $\eta$  vs  $Q$ , y verificarse en el punto de garantía mediante el ajuste al origen y a los valores de referencia especificados.

### **Importancia en el contexto académico**

La aplicación de la ISO 9906:2012 en este trabajo asegura comparabilidad con fabricantes y otros laboratorios, aportando rigor académico y confiabilidad práctica.

# Capítulo 4

## Metodología

Este capítulo presenta la metodología experimental empleada para evaluar el desempeño hidráulico de las bombas centrífugas instaladas en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). El enfoque central de esta metodología es la aplicación de los criterios, requisitos y procedimientos establecidos por la Norma Internacional ISO 9906:2012.

La metodología comprende la descripción física del banco de pruebas, la instrumentación utilizada, el procedimiento experimental y el análisis de datos. Dicho análisis se enfoca en la validación metrológica del ensayo (análisis de estabilidad, fluctuaciones según ISO 9906 y repetibilidad) y en la construcción de las curvas características de altura ( $H$ ), potencia ( $P$ ) y eficiencia ( $\eta$ ) para las configuraciones individual, serie y paralelo.

Cabe señalar que la norma fue empleada como documento base en la puesta en marcha y ajuste del banco de pruebas, sirviendo de referencia para la correcta instalación de los instrumentos, la verificación de condiciones de flujo estables y la aceptación de los ensayos dentro de los márgenes de tolerancia establecidos internacionalmente. De este modo, se asegura que los resultados obtenidos no solo cumplan un propósito académico, sino que también posean validez técnica bajo estándares reconocidos.

### 4.1. Descripción del banco de pruebas

El banco de ensayos del laboratorio opera como un sistema cerrado con recirculación de agua limpia y fría desde un estanque de acumulación, permitiendo la realización de ensayos bajo condiciones controladas y estables.

#### 4.1.1. Configuración general del circuito

El sistema, ilustrado esquemáticamente en la Figura 4.1 está compuesto por dos bombas centrífugas idénticas que pueden operar en tres configuraciones distintas me-

diante una red de válvulas de bola:

- Operación individual: una bomba activa, mientras la otra permanece aislada del circuito.
- Operación en serie: la descarga de la bomba 1 se redirige para alimentar la succión de la bomba 2.
- Operación en paralelo: ambas bombas succionan desde un colector común y descargan a un colector común.

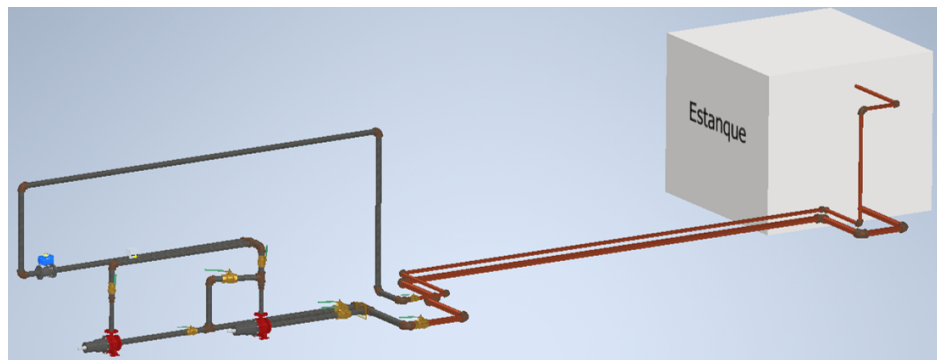


Figura 4.1: Banco de pruebas de bombas centrífugas del Laboratorio de Termofluidos, UTFSM.

El diseño y la instrumentación del banco fueron evaluados y optimizados en un trabajo previo [13], alineando el banco con las exigencias de la Norma ISO 9906:2012. Esto incluyó la corrección de las tomas de presión, mediante la implementación de anillos colectores y la reducción del diámetro de las perforaciones para la medición de presiones, así como la reubicación de sensores con el fin de minimizar perturbaciones en el flujo.

#### 4.1.2. Componentes principales del sistema

##### Bombas Centrífugas y Motores Eléctricos

El banco cuenta con dos conjuntos idénticos de bomba-motor (Figura 4.2):

- Bombas: Marca Vogt, modelo H620. Bombas centrífugas de voluta, una etapa, con diámetro de succión de 2  $\varnothing$  descarga de 1.5 $\varnothing$  un rodete de 170 mm de diámetro.

- Motores: Marca Weg, modelo W22. Motores de inducción trifásicos de 5.5 [kW] y alta eficiencia (IE1), con una velocidad nominal de 2870 [rpm] a 50 Hz.



Figura 4.2: Bomba centrífuga Vogt H620, junto con motor eléctrico Weg W-22.

En el anexo A.6.1 se muestran las curvas de rendimiento de la bomba entregadas por el fabricante y en el anexo A.6.2 se muestran las especificaciones junto con la curva de rendimiento del motor eléctrico Weg.

### Tuberías y conexiones

La red hidráulica del banco está construida con una combinación de materiales: la sección principal utiliza acero galvanizado (conforme a la Norma ASTM A53 Sch40 Grado A) y ciertas secciones específicas emplean cobre tipo L para asegurar una superficie interna lisa.

Un aspecto fundamental del diseño [13] es el cumplimiento de la ISO 9906:2012 para Grado 1 en las tomas de presión. Se instalaron anillos colectores de presión estática (cuatro tomas a 90°) en las secciones de succión (2") y descarga (1.5"). Estas tomas están ubicadas a una distancia mínima de 2 diámetros (2D) de las bridas de la bomba y se conectan a un manifold común para la bomba 2, asegurando una referencia de altura geométrica idéntica ( $z_s = z_d$ ) y eliminando la incertidumbre por desnivel.

La figura A.6 del anexo A.6 resume las dimensiones de las tuberías en las secciones de medición.

## Válvulas y control de flujo

El control del punto de operación del sistema se realiza mediante dos tipos de válvulas:

- Válvula de estrangulación: una válvula neumática Samson 3277 (Figura 4.3 con posicionador electrónico permite una regulación precisa y automatizada del caudal de descarga. La alimentación de aire para su operación es suministrada por un compresor y acumulador Schulz.

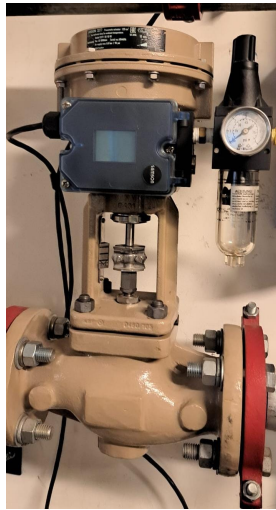


Figura 4.3: Válvula de estrangulación Samson 3277.

- Válvulas de configuración: un conjunto de válvulas de bola Giacomini 4.4 permite reconfigurar manualmente el circuito para los modos de operación individual, serie o paralelo.



Figura 4.4: válvula de bola Giacomini R850.

## 4.2. Instrumentación y sistema de adquisición de datos

El banco está equipado con instrumentación industrial para medir las variables primarias, las cuales son centralizadas en un sistema de control y adquisición de datos (DAQ).

### 4.2.1. Medición de variables primarias

#### 1. Medición de caudal

El caudal fue medido mediante un caudalímetro electromagnético Siemens SITRANS F M, sensor modelo MAG 5100 W con transmisor MAG 5000, mostrado en la figura 4.5. Este instrumento presenta las siguientes características:

- Precisión:  $\pm 0,5\%$  del valor medido.
- Rango de operación: 0 a 10 m/s de velocidad de flujo (cubre completamente el rango operativo de las bombas).
- Frecuencia de muestreo: hasta 10 kHz, lo que permite captar transitorios rápidos y entregar una señal estable al sistema de adquisición.

Gracias a estas propiedades, el sensor asegura un registro confiable y continuo del caudal de agua durante las pruebas.



Figura 4.5: Sensor de caudal electromagnético Siemens SITRANS MAG 5100W con transmisor MAG 5000 [12].

## 2. Medición de presión

Se instalaron transmisores de presión en las líneas de succión y descarga de las bombas con el fin de determinar la diferencia de presión total y, a partir de ella, calcular la altura manométrica ( $H_m$ ).

- En la descarga, se utilizó un transmisor Danfoss MBS 1700 (figura 4.6), configurado en un rango de 0–10 bar de presión manométrica, con salida analógica 4–20 mA, tiempo de respuesta menor a 10 ms y precisión del 1,0 % del fondo de escala.
- En la succión, se instaló un transmisor Wika S10 (figura 4.7), configurado para medir presión absoluta en un rango de –1 a 15 bar, con tiempo de respuesta inferior a 1 ms, salida 4–20 mA y precisión mejor al 0,5 % del span.

De acuerdo con la norma ISO 9906:2012, la instalación de sensores de presión debe respetar una distancia mínima de dos diámetros de tubería ( $2D$ ) desde las bridas de succión y descarga de la bomba. Sin embargo, en el banco de ensayos existente, esta condición no se cumple estrictamente ni en la bomba norte ni en la bomba sur, tanto en los tramos de succión como de descarga, debido a la presencia de uniones, cambios de sección y accesorios cercanos a las secciones de medición, tal como se documenta en el trabajo previo de Bolovic [13].



Figura 4.6: Transmisor de presión Danfoss MBS 1700 [0–10 bar] [4].



Figura 4.7: Transmisor de presión Wika S-10 [–1 a 15 bar] [21].

### 3. Medición de temperatura

La temperatura del agua en el circuito fue medida mediante un sensor RTD tipo Pt100 (figura 4.8), configurado en un rango de 0 a 80 °C y acoplado a un transmisor de 4–20 mA. Este parámetro es esencial para el cálculo de la densidad del fluido ( $\rho$ ) y permite corregir los valores de potencia hidráulica y eficiencia cuando se producen variaciones térmicas.



Figura 4.8: Sensor de temperatura PT100, rango [0–80 °C] [17].

### 4. Medición de potencia eléctrica

Los motores de las bombas están gobernados por variadores de frecuencia Siemens Sinamics G120C de 5,5 kW (figura 4.9). Estos variadores, además de permitir el ajuste preciso de la velocidad de giro de las bombas, entregan información eléctrica relevante como:

- Frecuencia de excitación.
- Voltaje aplicado.

- Corriente absorbida.
- Potencia eléctrica consumida ( $P_e$ ), utilizada para calcular la potencia de entrada de la bomba.



Figura 4.9: Variador de frecuencia Siemens Sinamics G120C de 5,5 kW [16].

## 5. Medición de velocidad de rotación

La velocidad de rotación de los ejes de las bombas fue medida utilizando un tacómetro digital marca Lutron, modelo DT-2236 (figura 4.10). Este instrumento permite la medición tanto por contacto directo como mediante un haz óptico reflejado, utilizando una cinta reflectante adherida al eje para la operación sin contacto.

El rango de medición del Foto-Tacómetro va desde 5 hasta 10,000 [rpm], con una resolución de 0,1 [rpm] para velocidades inferiores a 1,000 [rpm], y una exactitud de  $\pm 0,05\% + 1$  dígito.

Este instrumento fue empleado para verificar la velocidad de giro real de las bombas durante los ensayos, complementando la lectura entregada por los variadores de frecuencia (VFD) Siemens Sinamics G120C. La medición independiente mediante el tacómetro permitió contrastar la referencia de velocidad nominal (2900 [rpm]) con el valor real obtenido en el eje, garantizando la trazabilidad de la variable  $n$  y asegurando la validez de las correcciones aplicadas mediante las leyes de afinidad.



Figura 4.10: Tacómetro digital Lutron DT-2236 utilizado para la medición de velocidad de rotación.

#### 4.2.2. Sistema de control y adquisición de datos

El banco cuenta con un PLC (Programmable Logic Controller) y una pantalla HMI (Human Machine Interface), que componen un sistema de automatización y control. Este permite la lectura de las señales analógicas recibidas por los sensores, controla la válvula neumática, los variadores de frecuencia para encendido de motores y el cambio de velocidad de giro. Además, escala las señales para traducir las magnitudes analógicas de los sensores en valores digitales de las magnitudes físicas medidas.

El sistema en detalle dispone de los componentes que se pueden ver en la figura 4.11:

- Fuente de Poder Siemens PM 1207: Fuente de alimentación de 24 [V] DC para el PLC, y módulos adicionales.
- PLC Simatic S7 1200 CPU 1215C DC/DC/RLY: Este PLC cuenta con 2 puertos PROFINET, con 14 DI (Digital In), 10 DO (Digital Out), 10 salidas binarias (Relé), 2 entradas analógicas (0-10 V) y admite hasta 8 módulos adicionales.
- Módulos de entradas analógicas SM 1231 AI (Analogic In): 3 módulos externos al PLC con conexión directa. Cada uno añade 4 entradas analógicas de 13 bit (12 más el signo), permite lectura de señales de 0-20 [mA], 4-20 [mA] y 0-10 [V].
- Simatic Net CSM1277: Es un puerto ethernet que cuenta con 4 slot de conexión para la comunicación vía Profinet entre los dispositivos.
- Fuente de poder Siemens Sitop: Fuente de poder utilizada para alimentar la

instrumentación con 24[V] DC, capaz de abastecer con hasta 5 [A] de corriente.

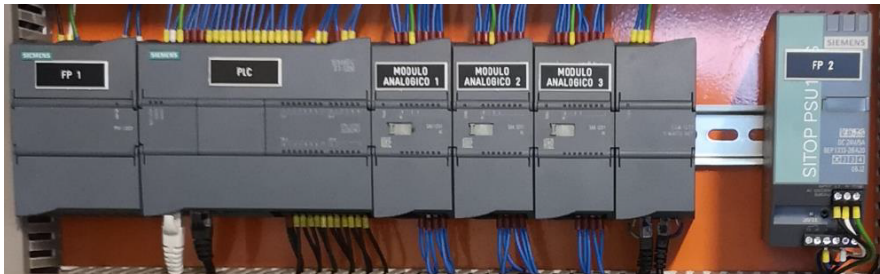


Figura 4.11: Tablero de control del PLC, 2 fuentes de poder, 3 módulos analógicos y switch ethernet.

Pantalla HMI Siemens KTP700 Basic: Interfaz gráfica (Figura 4.12) que se comunica con el PLC en ambas direcciones, por lo que permite la lectura de las variables de control. Además, envía señales al PLC para el control de la válvula neumática y variadores de frecuencia, lo que permite el control del encendido de las bombas y su velocidad de rotación.



Figura 4.12: Pantalla HMI juntos con los controladores de ambos variadores de frecuencia.

Para el análisis de datos, se utilizó la herramienta "Trace" del software TIA Portal del PLC. Esta función permitió registrar las variables del sistema en el tiempo (con

un muestreo de aprox. 100 ms) y exportarlas como archivos `.csv` para su posterior procesamiento y análisis.

### 4.2.3. Tabla resumen de instrumentación

La Tabla 4.1 resume las variables clave, la instrumentación asociada y la incertidumbre sistemática (precisión del fabricante), que sirve como base para el análisis metrológico posterior.

Tabla 4.1: Variables de medición, instrumentación asociada y precisión sistemática ( $e_S$ ).

| Variable                      | Instrumento                                                   | Precisión [ $e_S$ ]          |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Flujo volumétrico (Q)         | Caudalímetro Siemens SITRANS MAG 5100 W + Transmisor MAG 5000 | $\pm 0,5\%$ del valor medido |
| Presión de descarga ( $P_d$ ) | Transmisor Danfoss MBS 1700 (0-10 bar)                        | $\pm 1,0\%$ FS               |
| Presión de succión ( $P_s$ )  | Transmisor Wika S10 (-1 a 15 bar)                             | $< \pm 0,5\%$ del rango      |
| Velocidad de rotación (n)     | VFD Siemens + Tacómetro Lutron DT-2236                        | $\pm 0,05\% + 1$ dígito      |
| Potencia eléctrica ( $P_e$ )  | VFD Siemens Sinamics G120C PN                                 | $\pm 5,0\%$ de la lectura    |

## 4.3. Procedimiento experimental

El procedimiento se diseñó para obtener datos de alta calidad, validando primero la estabilidad y repetibilidad del método antes de caracterizar el rendimiento.

### 4.3.1. Preparación y configuraciones de ensayo

#### Configuraciones hidráulicas

El banco se configuró para tres modos de operación mediante las válvulas de bola:

- Individual: una bomba activa; la otra, aislada del circuito.
- Serie: la descarga de la bomba 1 se redirige a la succión de la bomba 2.

- Paralelo: ambas bombas succionan del estanque común y descargan a una colectora común.

### **Condiciones iniciales**

Para todos los ensayos, el fluido fue agua limpia a temperatura ambiente (registrada entre 13°C y 22°C). La velocidad de rotación de las bombas activas se fijó en 2900 RPM nominales desde el VFD, y este valor fue verificado con el tacómetro.

### **4.3.2. Plan de validación metrológica (base de resultados 5.1)**

Antes de los ensayos de rendimiento, se ejecutó un protocolo de validación para asegurar la calidad de los datos, siguiendo las directrices de la ISO 9906.

#### **Análisis de estabilidad y tiempo de muestreo**

Se realizaron ensayos preliminares para definir un tiempo de adquisición estándar que garantizara que todas las mediciones se tomaron en régimen estacionario. Se analizó la convergencia del promedio acumulado de las variables crudas del PLC.

- Se identificó que la configuración en serie presentaba el "peor caso", siendo la más lenta en alcanzar la estabilidad (ver Anexo A.1).
- Basado en este análisis, se definió un tiempo de adquisición estándar de 60 segundos para todos los puntos de operación.
- El script de análisis (ver función `t_estable_por_epsilon_robusto`) valida esta estabilidad asegurando que, después de un tiempo mínimo ( $N_{MIN} = 30s$ ), la señal cumpla con tres criterios simultáneos:
  1. Un número de pasos consecutivos ( $K_{CONSEC} = 7$ ) con variación mínima.
  2. Una tendencia nula dentro de una ventana de tiempo ( $W_{SLOPE} = 10s$ ).
  3. Una desviación estándar local baja ( $W_{STD} = 10s$ ).

#### **Prueba de repetibilidad**

Se evaluó la consistencia global del método.

- El ensayo de caracterización completo para las bombas individuales (Bomba 1 y Bomba 2) se ejecutó en dos días distintos, bajo condiciones idénticas.
- Los datos de rendimiento (Q, H, P) de ambos días se normalizaron a 2900 RPM (utilizando las Leyes de Afinidad) para permitir una comparación directa.
- Se calculó la desviación porcentual relativa ( $\Delta \%$ ) entre las curvas de ambos ensayos (Anexo A.3) para cuantificar numéricamente la repetibilidad del banco y del procedimiento (Resultados 5.1.3).

### **Análisis de fluctuaciones (ISO 9906)**

Para cada punto de operación de 60 segundos (excluyendo \*shut-off\*), se analizó la serie temporal adquirida por el PLC.

- Se cuantificó la amplitud relativa de fluctuación ( $\delta_x$ ) para las variables clave (caudal, altura diferencial, potencia y velocidad) utilizando la expresión (Ecuación 3.22):
- Este valor se comparó con los límites máximos admisibles de la tabla 3.4 (ISO 9906) para los Grados 1, 2 y 3, permitiendo clasificar el desempeño del banco de ensayos (Anexo A.2).

El valor de  $\delta_x$  obtenido se comparó con los límites máximos admisibles de la tabla 3.4 (ISO 9906) para determinar el grado de aceptación (1, 2 o 3) que el banco de pruebas es capaz de cumplir (Anexo A.2).

### **4.3.3. Ensayo de curvas características (base de resultados 5.2)**

Para cada una de las tres configuraciones (individual, serie y paralelo), se siguió el siguiente protocolo:

1. Se fijó la velocidad de las bombas activas en 2900 RPM.
2. Se cerró completamente la válvula de control Samson (punto de \*shut-off\*,  $Q=0$ ). Se inició la adquisición de datos durante 60 segundos.
3. Se abrió la válvula de estrangulación en incrementos porcentuales definidos (ej. 16 %, 23 %, 29 %, etc.), generando aproximadamente 7 puntos de operación distintos.

4. En cada punto, se esperó un tiempo de estabilización antes de iniciar el registro de 60 segundos de todas las variables primarias ( $Q$ ,  $P_s$ ,  $P_d$ ,  $P_e$ ,  $n$ ,  $T$ ) exportadas por el PLC.

#### 4.3.4. Ensayo de curva del sistema (base de resultados 5.2.3)

La curva de pérdidas del sistema ( $H_{sis} = f(Q)$ ), que representa la resistencia"del circuito, se determinó mediante dos métodos complementarios para su validación.

##### Método empírico

La curva del sistema se obtuvo directamente de los datos de los ensayos individuales (Sección 4.3.3). Dado que el banco es un circuito cerrado que succiona y descarga al mismo estanque (presión atmosférica) y las tomas de presión están en un manifold común ( $\Delta z = 0$ ), la altura manométrica ( $H$ ) que la bomba entrega en un punto de operación es, por definición, exactamente igual a la pérdida de carga total del sistema ( $H_{sis}$ ) para ese caudal ( $Q$ ).

##### Método teórico

Se calculó una curva teórica de pérdidas para fines comparativos. Esta curva se modeló usando la ecuación de pérdidas 3.3. El coeficiente de pérdidas global  $k$  se determinó analíticamente sumando todas las pérdidas por fricción (calculadas con la ecuación de Darcy-Weisbach para los tramos de acero galvanizado y cobre) y las pérdidas menores (calculadas con coeficientes  $K_L$  para todos los accesorios: codos, válvulas, T, etc.). Los parámetros y coeficientes  $K_L$  utilizados se detallan en el Anexo A.5.2.

## 4.4. Metodología de análisis de datos

Los datos crudos de series temporales, exportados desde la herramienta "Trace" del PLC en formato `.csv`, fueron procesados íntegramente mediante scripts desarrollados en Python (ver Anexo A.7). Esta metodología de post-procesamiento permite calcular las variables de rendimiento, normalizarlas a una velocidad de referencia común y cuantificar la incertidumbre de los resultados.

#### 4.4.1. Procesamiento de datos crudos

Para cada punto de operación (correspondiente a un archivo `.csv` de 60 segundos), el primer paso fue obtener un único valor representativo para cada variable medida. Esto se logra promediando la totalidad de las muestras adquiridas durante el intervalo de 60 segundos para cada una de las variables primarias ( $Q$ ,  $P_s$ ,  $P_d$ ,  $P_e$ ,  $T$ , etc.) s.

#### 4.4.2. Cálculo de Parámetros de Rendimiento Experimental

A partir de los valores promedio de las variables primarias, se calculan los parámetros de rendimiento mediante las ecuaciones Ecuaciones (3.2), (3.6) y (3.7). Este proceso, automatizado en Python A.7, se basa en las ecuaciones fundamentales descritas en el Marco Teórico.

- Altura manométrica ( $H$ ): se calcula según la Ecuación ??, considerando las presiones manométricas y las alturas de velocidad en las bridas y la diferencia de altura de los sensores.
- Potencia hidráulica ( $P_u$ ): se calculó según la ecuación 3.6.
- Eficiencia global del conjunto ( $\eta_{global}$ ): Se calculó la eficiencia mediante la ecuación 3.7.

#### 4.4.3. Corrección experimental por leyes de afinidad

La velocidad de rotación real del motor ( $n_{exp}$ ), medida por el tacómetro, presenta leves variaciones respecto a la consigna de 2900 rpm. Para una comparación válida, todos los puntos experimentales ( $Q$ ,  $H$ ) se normalizaron a la velocidad de referencia  $n_{sp} = 2900$  rpm, utilizando las leyes de afinidad (Sección 3.3.4). La potencia eléctrica ( $P_e$ ) y la eficiencia global ( $\eta_{global}$ ) se reportan en función del caudal normalizado ( $Q_{norm}$ ).

#### 4.4.4. Análisis de incertidumbre experimental

Se realiza una cuantificación de la incertidumbre experimental para los ensayos de las bombas individuales, siguiendo la metodología GUM (guía para la expresión de la incertidumbre en la medición) referenciada en la ISO 9906.

- Incertidumbre general (e): la incertidumbre total de cada variable primaria se calcula combinando la componente aleatoria ( $e_R$ ) y la sistemática ( $e_S$ ), obtenida de la Tabla 4.1.
- Propagación de errores: las incertidumbres generales de las variables primarias se propagan para determinar la incertidumbre final de los parámetros de rendimiento. Este análisis (Anexo A.4) permite generar las barras de error (con 95 % de confianza) para la Altura Manométrica ( $u(H)$ ) y la eficiencia global ( $u(\eta)$ ) que se presentan en las gráficas de resultados.

#### 4.4.5. Metodología de comparación con curvas del fabricante

Para la validación de resultados, las curvas experimentales se comparan con las curvas teóricas del fabricante (Vogt).

- Altura y potencia: las curvas H-Q y P-Q del fabricante (digitalizadas) se comparan directamente con las curvas experimentales normalizadas ( $H_{norm}$  vs  $Q_{norm}$ ).
- Eficiencia: el fabricante proporciona la eficiencia de la bomba ( $\eta_{bomba}$ ). La eficiencia experimental calculada es una eficiencia global ( $\eta_{global}$ ), que incluye las pérdidas del motor eléctrico. Para realizar una comparación adecuada, fue necesario modificar la curva de eficiencia del fabricante: esta se multiplica por la curva de rendimiento del motor ( $\eta_{mot}$ ) proporcionada por Weg. De esta forma, se obtiene una curva de eficiencia global teórica ( $\eta_{total,fab} = \eta_{bomba} \cdot \eta_{mot}$ ) que es directamente comparable con la eficiencia global experimental.

### 4.5. Implementación académica y documentación

Parte complementaria y entregable fundamental del presente trabajo, se desarrolla un documento de laboratorio destinado a ser utilizado con fines didácticos en el curso de Turbomáquinas de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM).

Este documento tiene por objetivo estandarizar la metodología experimental y facilitar la correcta ejecución de las pruebas de desempeño hidráulico. Siguiendo la solicitud de enfocar la experiencia en los conceptos fundamentales del curso, la guía se centra exclusivamente en la obtención de las curvas de rendimiento para una bomba trabajando de forma individual, permitiendo a los estudiantes poner a prueba los conocimientos adquiridos.

El material incluye las siguientes secciones fundamentales:

- 1. Introducción y objetivos del ensayo: presenta el propósito del laboratorio, los fundamentos teóricos básicos sobre bombas centrífugas y los objetivos específicos de la experiencia.
- 2. Descripción del banco de pruebas: contiene un esquema detallado de la instalación, la disposición de los instrumentos y las condiciones de operación. Incluye diagramas hidráulicos y eléctricos simplificados para facilitar la comprensión del sistema.
- 3. Procedimiento experimental paso a paso: establece el protocolo que los estudiantes deben seguir durante la realización del ensayo, incluyendo la secuencia de encendido, configuración de válvulas, adquisición de datos y condiciones de seguridad.
- 4. Instrucciones para el registro y análisis de datos: define los parámetros a medir (caudal, presión, velocidad, temperatura), las fórmulas para calcular la altura manométrica, la potencia y la eficiencia, y las recomendaciones para la construcción de las curvas características  $H-Q$ ,  $P-Q$  y  $\eta-Q$ .
- 5. Evaluación de incertidumbres: indica las pautas básicas para estimar y reportar la incertidumbre de las mediciones siguiendo los criterios de la ISO 9906:2012, promoviendo el desarrollo de competencias metrológicas en los estudiantes.
- 6. Formato de informe de laboratorio: proporciona una guía estructurada para la elaboración del informe final, con el formato estándar del Departamento de Ingeniería Mecánica, estableciendo los criterios de presentación, tablas de resultados, gráficos y el análisis de la curva de rendimiento individual.

El documento de laboratorio fue elaborado en formato digital y físico, quedando disponible en el Laboratorio de Termofluidos. Su implementación busca fortalecer la integración entre los contenidos teóricos y prácticos del curso, así como establecer una metodología de medición clara y sistemática, que permita ejecutar los ensayos bajo condiciones reproducibles y metrológicamente válidas. Asimismo, el trabajo considera la documentación y confirmación del sistema de medición, aportando criterios para evaluar su desempeño y confiabilidad.

De esta manera, el presente trabajo no solo contribuye al mejoramiento técnico del banco de pruebas, sino que también genera múltiples efectos académicos y prácticos, al consolidar un procedimiento experimental estandarizado y un recurso formativo permanente que facilitará el aprendizaje experimental de futuras generaciones de estudiantes de ingeniería.

# Capítulo 5

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos de los ensayos de rendimiento hidráulico realizados en el banco de pruebas de bombas centrífugas del Laboratorio de Termofluidos. Se exponen las curvas características de altura manométrica ( $H-Q$ ), potencia consumida ( $P-Q$ ) y eficiencia ( $\eta-Q$ ) para las bombas operando de forma individual y en configuraciones en serie y paralelo. Adicionalmente, se presenta un análisis de la repetibilidad de los ensayos y la caracterización de la curva del sistema. Todos los datos se analizan siguiendo los lineamientos metrológicos descritos en la metodología, basados en la norma ISO 9906:2012.

Antes de presentar las curvas de rendimiento, resulta metodológicamente indispensable evaluar la calidad y consistencia de los datos experimentales obtenidos. Esta sección se orienta a la validación del procedimiento de ensayo, verificando la estabilidad de las mediciones, el cumplimiento de los criterios de fluctuación establecidos por la norma ISO 9906:2012 y la repetibilidad global del proceso de medición.

### 5.0.1. Análisis de estabilidad y definición de la ventana de adquisición

Un aspecto clave en el procesamiento de los datos experimentales es la definición de una ventana de adquisición suficientemente representativa del régimen estacionario del sistema. En este trabajo no se evalúa de forma independiente un tiempo de espera posterior a un cambio de punto de operación; en su lugar, se adopta una estrategia basada en una única ventana de adquisición de datos, dentro de la cual se verifica la estabilidad de las señales y se realiza el análisis estadístico correspondiente. Para este propósito, se aplica un algoritmo de análisis de estabilidad (descrito en la Sección 4.3.2) a los conjuntos de datos obtenidos en todas las configuraciones de ensayo. Dicho algoritmo evalúa la convergencia temporal de las señales medidas, identificando la ausencia de deriva sistemática y la presencia de oscilaciones acotadas, y determina el instante  $t_{\text{estable}}$  a partir del cual las variables pueden considerarse representativas de un

régimen estacionario dentro de la ventana de medición.

Los análisis preliminares muestran que, en la mayoría de los casos, las perturbaciones transitorias asociadas al establecimiento de las condiciones de operación se atenúan antes de los 30 segundos. En función de ello, se fija el parámetro  $N\_MIN$  del algoritmo en 30 segundos, no como un tiempo de espera previo a la adquisición de datos, sino como el instante mínimo a partir del cual se comienza a evaluar la estabilidad de las señales dentro de la ventana considerada.

El análisis evidencia que el instante de estabilización  $t_{estable}$  depende de la configuración hidráulica y de las condiciones de operación. Mientras que en configuraciones individuales la estabilización se alcanza en tiempos inferiores, la configuración en Serie representa el caso más exigente, requiriendo hasta 60 segundos para que todas las variables, en particular las presiones, cumplan simultáneamente los criterios de estabilidad establecidos.

En consecuencia, se define una ventana de adquisición total de 60 segundos como estándar para todos los ensayos realizados. Esta ventana asegura que incluso los casos más desfavorables alcancen un régimen estacionario dentro del período de medición y proporciona una cantidad de datos suficiente para que el análisis estadístico sea independiente del número de muestras adquiridas.

Por lo tanto, todos los valores de resumen presentados en este capítulo se calculan a partir del promedio de los datos correspondientes a dicha ventana de 60 segundos, garantizando que los resultados reportados sean representativos, reproducibles y coherentes con el comportamiento estacionario del sistema.

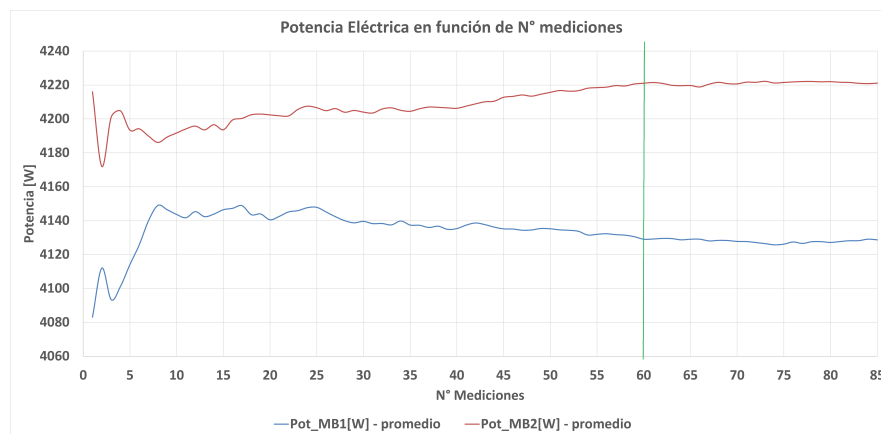


Figura 5.1: Estabilidad de las potencias eléctricas (Pot\_MB1, Pot\_MB2) en función del tiempo (mediciones) para la configuración en serie, representando el peor caso de convergencia.

El análisis completo de estabilidad, incluyendo los valores de  $t_{estable}$  calculados para cada variable en cada punto de ensayo, se presenta en detalle en el Anexo A.1.

### 5.0.2. Análisis de fluctuaciones (clasificación según ISO 9906:2012)

Una vez validado el intervalo de adquisición de datos, el siguiente paso es cuantificar la oscilación de los datos en régimen estacionario. El análisis se realiza para cada punto de operación en todos los ensayos (bomba 1, bomba 2, serie y paralelo). Para ilustrar el procedimiento en detalle y mostrar el comportamiento de las variables de rendimiento fundamentales, la tabla 5.1 presenta un resumen de los resultados de fluctuación para el ensayo de la Bomba 1. Esta tabla muestra el valor de fluctuación medidas ( $\pm \%$ ) para caudal ( $Q$ ), altura ( $H$ ) y potencia en el eje ( $P$ ), y determina el grado ISO 9906 más alto alcanzado por estas variables clave.

Tabla 5.1: Ejemplo de análisis de fluctuación punto a punto para la bomba 1. Se muestra la fluctuación medida ( $\pm \%$ ) y el grado de aceptación ISO 9906 más alto alcanzado por cada variable.

| Apertura<br>(%) | Caudal ( $Q$ )      |       | Altura ( $H$ )      |       | Potencia ( $P$ )    |       |
|-----------------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|
|                 | Fluct. ( $\pm \%$ ) | Grado | Fluct. ( $\pm \%$ ) | Grado | Fluct. ( $\pm \%$ ) | Grado |
| 0 %             | 176.3 %             | Falla | 1.3 %               | G1    | 0.9 %               | G1    |
| 16 %            | 1.8 %               | G1    | 1.0 %               | G1    | 1.1 %               | G1    |
| 23 %            | 0.6 %               | G1    | 0.9 %               | G1    | 0.9 %               | G1    |
| 29 %            | 0.3 %               | G1    | 0.9 %               | G1    | 1.0 %               | G1    |
| 34 %            | 1.3 %               | G1    | 1.1 %               | G1    | 0.8 %               | G1    |
| 43 %            | 0.6 %               | G1    | 1.1 %               | G1    | 1.1 %               | G1    |
| 100 %           | 0.3 %               | G1    | 1.3 %               | G1    | 1.4 %               | G1    |

*Límites (G1/G2/G3): Caudal (2/3/6 %), Altura (3/4/10 %), Potencia (2/3/6 %)*

Los resultados detallados del análisis de fluctuación según la norma ISO 9906, replicando la estructura de la tabla 5.1 para todos los ensayos (bomba 2, serie y paralelo), se encuentran disponibles en el Anexo A.2.

El análisis de la Tabla 5.1 (y de las tablas correspondientes en el Anexo) resulta particularmente ilustrativo. En el punto de operación de shut-off se observan fluctuaciones relativas elevadas, especialmente en el caudal, que superan los límites establecidos

incluso para el Grado 3. No obstante, este comportamiento se asocia principalmente a una inestabilidad de tipo matemático, producto de la normalización de las fluctuaciones respecto de valores medios cercanos a cero, así como a las limitaciones de resolución de los sensores en rangos de caudal muy bajos, más que a una inestabilidad física del sistema. Por esta razón, y en concordancia con la práctica habitual en el análisis de rendimiento de bombas, dicho punto de operación se excluye del análisis posterior.

Para los demás puntos de operación estables, la altura y la velocidad presentan fluctuaciones muy reducidas, cumpliendo en la mayoría de los casos con los criterios del Grado 1. En contraste, el caudal y, en algunos casos, la Potencia, exhiben fluctuaciones superiores en determinados puntos de operación, aunque generalmente dentro de los rangos aceptables según la norma.

Finalmente, con el objetivo de obtener una clasificación global y concisa del comportamiento del banco de ensayos, la Tabla 5.2 resume el caso de mayor fluctuación observado para cada una de las variables de rendimiento fundamentales (caudal, altura, potencia y velocidad) en cualquier punto de operación estable, excluyendo el régimen de shut-off, y considerando todas las configuraciones ensayadas: bombas operando de forma individual, en serie y en paralelo. El detalle completo de las fluctuaciones para todas las variables medidas se presenta en el Anexo A.2.

Tabla 5.2: Peor caso de fluctuación ( $\pm \%$ ) observado en puntos de operación estables (excluyendo *shut-off*) para las variables clave del banco de ensayos.

| Variable Medida   | peor fluctuación ( $\pm \%$ ) |
|-------------------|-------------------------------|
| Caudal ( $Q$ )    | 26,9                          |
| Altura ( $H$ )    | 3,0                           |
| Potencia ( $P$ )  | 12,7                          |
| Velocidad ( $n$ ) | 0,1                           |

Nota: Los límites correspondientes al Grado 3 son: caudal  $\pm 6 \%$ , altura  $\pm 10 \%$ , potencia  $\pm 6 \%$ , velocidad  $\pm 2 \%$ .

Es importante destacar que los valores resumidos en la Tabla 5.2 corresponden a casos puntuales y no representan el comportamiento general del banco de ensayos a lo largo de todo el rango de operación. En particular, la elevada fluctuación relativa observada en el caudal ( $\pm 26,9 \%$ ) se asocia a un único punto de operación correspondiente a la configuración en paralelo, el cual no pudo ser representado en las curvas características debido a su comportamiento inestable. En el resto de los ensayos y configuraciones,

el caudal se mantiene estable y cumple, al menos, con los criterios del grado 3 de la norma ISO 9906.

De manera similar, el peor caso de fluctuación en la altura ( $\pm 3,0\%$ ) corresponde a una condición puntual observada en la configuración en serie, asociada a una apertura cercana al 26 %. Fuera de este punto específico, la altura diferencial presenta fluctuaciones significativamente menores, del orden de 1 %, evidenciando un comportamiento estable del sistema.

En el caso de la potencia, la mayor fluctuación registrada ( $\pm 12,7\%$ ) ocurre en la configuración en paralelo y coincide con el mismo punto de operación en el cual se observa la mayor fluctuación de caudal, lo que sugiere una relación directa entre ambas variables. Para el resto de los puntos de operación, la potencia en el eje presenta fluctuaciones considerablemente menores, típicamente comprendidas entre 1,5 % y 3 %.

Por último, la velocidad de rotación muestra fluctuaciones despreciables en todo el rango de operación, manteniéndose ampliamente dentro de los límites establecidos por la norma, lo que confirma la estabilidad del accionamiento del sistema.

### **5.0.3. Prueba de repetibilidad del ensayo**

Para validar la consistencia del procedimiento experimental completo, se evaluó su repetibilidad. Se ejecutó la caracterización completa de las bombas individuales (Bomba 1 y Bomba 2) en dos días distintos. Los datos de rendimiento (H, Q, P) de cada ensayo fueron normalizados a una velocidad de referencia común de 2900 RPM mediante las leyes de afinidad, para permitir una comparación directa.

Las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 presentan, a modo de ejemplo, la superposición de las curvas de rendimiento normalizadas obtenidas para la Bomba 1 en ambos días de ensayo. La concordancia visual sugiere una alta repetibilidad. (Gráficos similares se obtuvieron para la Bomba 2).

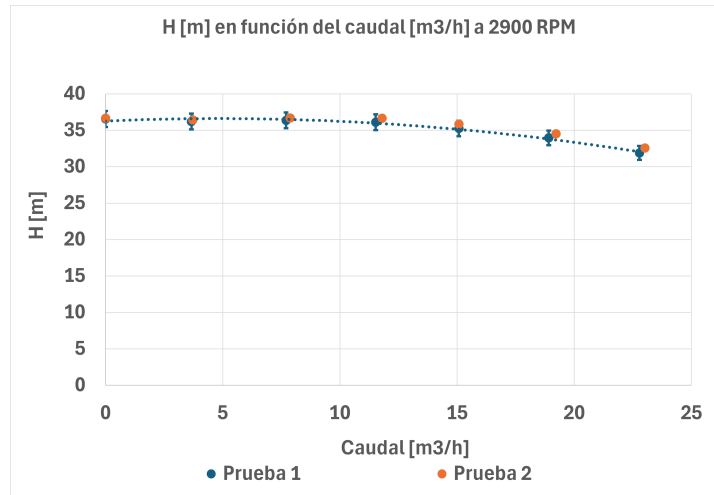


Figura 5.2: Comparación de curvas H-Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 1.

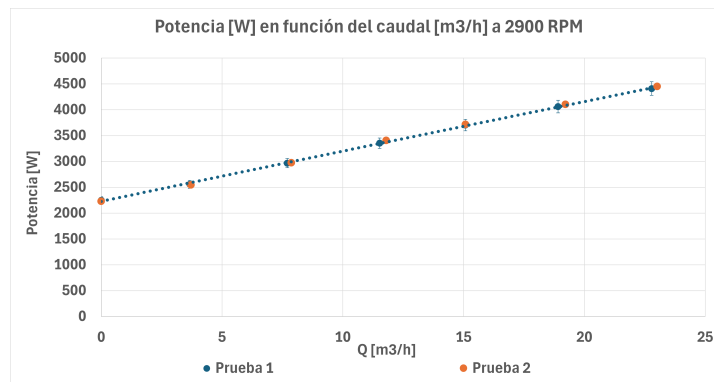


Figura 5.3: Comparación de curvas P-Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 1.

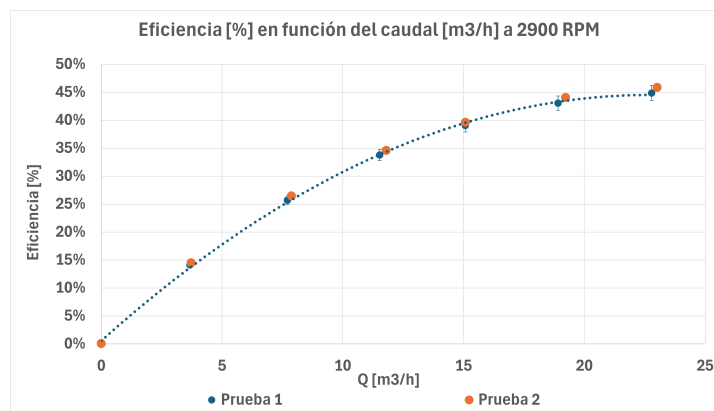


Figura 5.4: Comparación de curvas  $\eta$ -Q (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 1.

En el anexo A.3 se encuentran las tablas de datos de la bomba 1 y la bomba 2, junto con el gráfico para la bomba 2.

El análisis cuantitativo, detallado en la Metodología (Sección ??), consistió en calcular la diferencia porcentual relativa entre las curvas normalizadas punto a punto para cada bomba por separado. La Tabla 5.3 resume los casos de mayor desviación encontrados para cada parámetro clave en todo el rango operativo estable (excluyendo shut-off), considerando el valor máximo obtenido entre ambas bombas.

Tabla 5.3: Máxima desviación porcentual relativa encontrada entre los ensayos de repetibilidad (peor caso entre B1 y B2, datos normalizados a 2900 RPM).

| Parámetro de Rendimiento         | Máxima Desviación ( $\pm$ %) |
|----------------------------------|------------------------------|
| Altura Manométrica (H)           | 2,1                          |
| Potencia en el Eje ( $P_{eje}$ ) | 1,5                          |
| Eficiencia Calculada ( $\eta$ )  | 3,0                          |

Las bajas desviaciones máximas registradas, manteniéndose igual o menor que 3,0 % para todos los parámetros fundamentales, confirman cuantitativamente una excelente repetibilidad del procedimiento experimental y la fiabilidad del banco de ensayos. Habiendo establecido la validez metrológica de las mediciones (estabilidad, cumplimiento de fluctuaciones y repetibilidad), se procede a presentar los resultados detallados del rendimiento de las bombas.

## 5.1. Curvas Características

Habiendo validado la metodología experimental en términos de estabilidad, cumplimiento de fluctuaciones ISO y repetibilidad (Sección 5), se procede a presentar las curvas características de rendimiento de las bombas. Todos los resultados experimentales presentados a continuación han sido normalizados a la velocidad de referencia de 2900 RPM mediante las leyes de afinidad, procedimiento detallado en la Metodología (Sección ??). Esta normalización permite la comparación directa con las curvas teóricas proporcionadas por el fabricante Vogt para el modelo H620 a dicha velocidad.

Un aspecto fundamental de la presentación de resultados experimentales es la cuantificación de su incertidumbre. Siguiendo los procedimientos de propagación de errores detallados en la Metodología (Sección 4.3.2), se calcularon las incertidumbres totales para la Altura ( $e_H$ ), la potencia ( $e_{P_{eje}}$ ) y la eficiencia ( $e_\eta$ ) para cada punto de operación.

Los valores numéricos detallados de estas incertidumbres se encuentran tabulados en el Anexo A.4.

En las gráficas de este capítulo, la incertidumbre total calculada se representa visualmente mediante **\*\*barras de error verticales\*\*** en cada punto experimental graficado. Estas barras indican el intervalo dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero con un nivel de confianza del 95 %, proporcionando una medida visual inmediata de la fiabilidad de cada punto medido y permitiendo evaluar la significancia estadística de las desviaciones respecto a las curvas teóricas.

### Bombas individuales: comparación bomba 1 y bomba 2

Las Figuras 5.5, 5.6 y 5.7 presentan una comparación directa del rendimiento experimental de la Bomba 1 y la Bomba 2, representado mediante puntos con barras de error, junto con las curvas teóricas proporcionadas por el fabricante. Todos los resultados experimentales se encuentran normalizados a una velocidad de rotación de 2900 rpm y las barras de error corresponden a un nivel de confianza del 95 %.

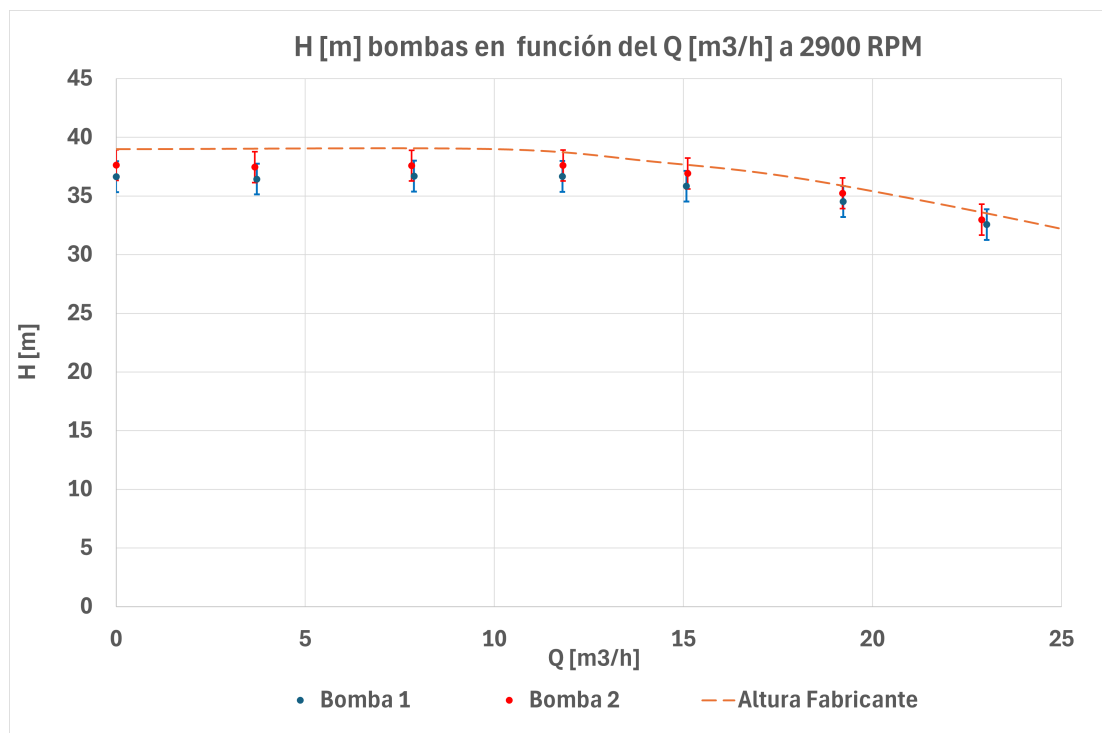


Figura 5.5: Curva H–Q experimental de la bomba 1 y la bomba 2, normalizadas a 2900 rpm, comparadas con la curva teórica del fabricante.

En la Figura 5.5 se observa que ambas bombas presentan una tendencia H–Q coherente con la curva teórica del fabricante. No obstante, tanto la Bomba 1 como la Bomba 2 entregan una altura manométrica ligeramente inferior a la especificada, diferencia que se acentúa a caudales medios y altos. Comparativamente, la Bomba 2 muestra valores de altura sistemáticamente superiores a los de la Bomba 1, situándose más cercana a la curva del fabricante en la mayor parte del rango de operación. Las barras de error indican que estas diferencias resultan estadísticamente significativas en varios puntos de operación.

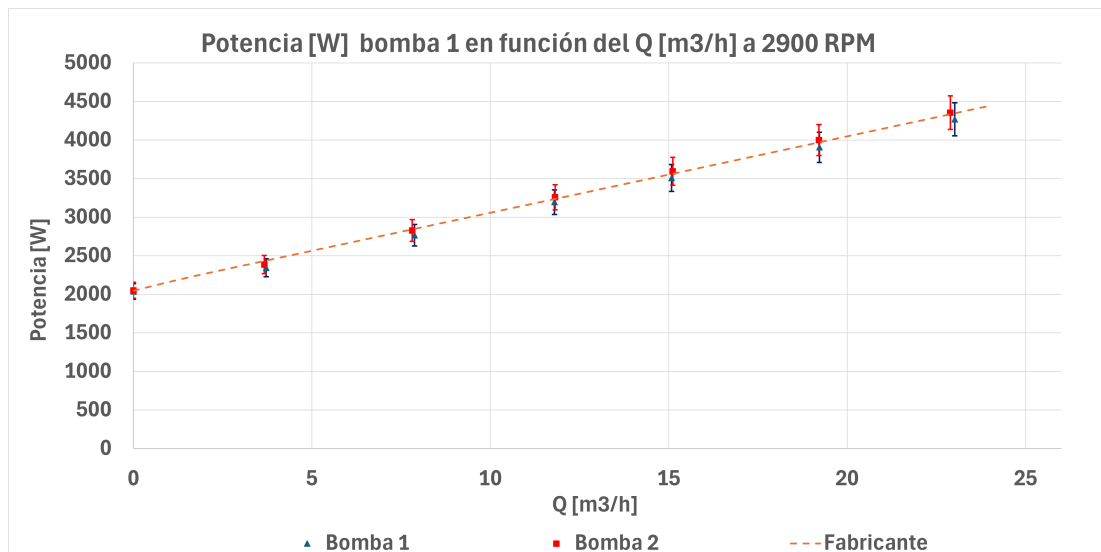


Figura 5.6: Curva  $P$ – $Q$  experimental de la bomba 1 y la bomba 2, normalizadas a 2900 rpm, comparadas con la curva teórica del fabricante.

La Figura 5.6 muestra la relación entre la potencia en el eje y el caudal para ambas bombas. En ambos casos, la potencia experimental es mayor que la indicada por el fabricante, evidenciando un consumo energético superior al teórico en todo el rango de caudales. La Bomba 2 presenta, en general, un consumo ligeramente inferior al de la Bomba 1, lo que resulta consistente con el mejor desempeño hidráulico observado en la curva de altura.

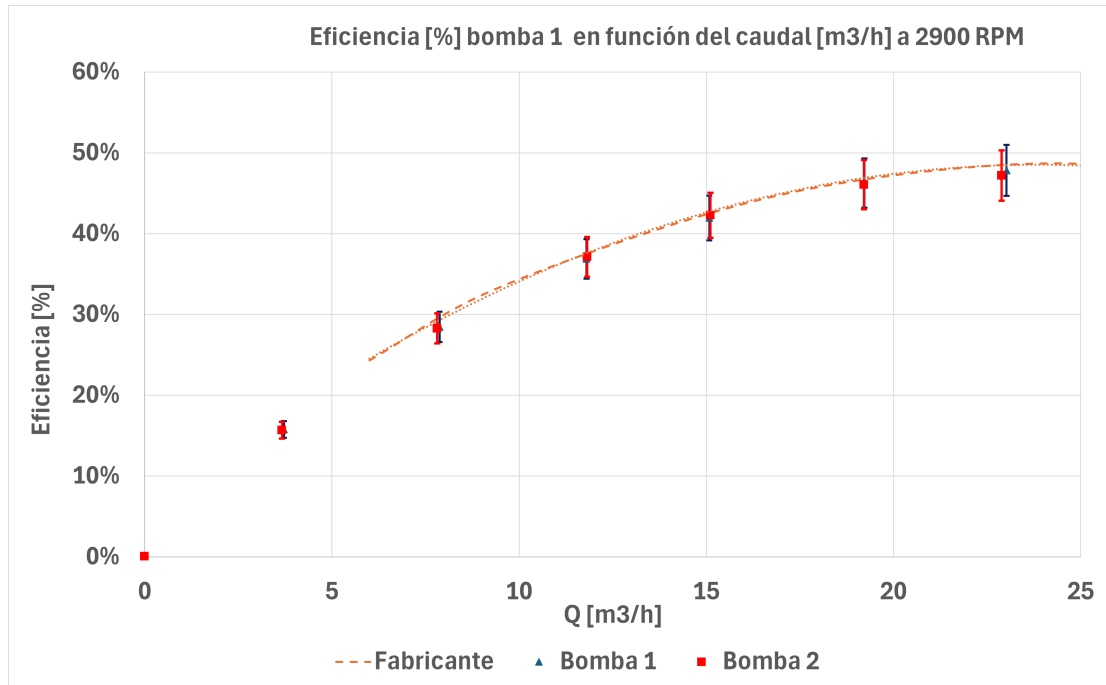


Figura 5.7: Curva de eficiencia  $\eta$ - $Q$  experimental de la bomba 1 y la bomba 2, normalizadas a 2900 rpm, comparadas con la curva teórica del fabricante.

Como consecuencia directa de las diferencias observadas en altura y potencia, la Figura 5.7 muestra que las curvas de eficiencia experimental de ambas bombas se sitúan por debajo de la eficiencia teórica del fabricante. La Bomba 2 alcanza valores de eficiencia levemente superiores a los de la Bomba 1 en la mayor parte del rango operativo, confirmando un comportamiento global ligeramente más favorable. Cabe destacar que la incertidumbre asociada a la eficiencia no es constante y varía con el caudal, debido a la propagación de las incertidumbres de las magnitudes medidas. Para efectos de visualización, se emplea en los gráficos un valor de incertidumbre representativo del escenario más desfavorable, mientras que el desglose completo de la incertidumbre para cada punto se presenta en el Anexo A.4.

En términos generales, el análisis comparativo evidencia que ambas bombas, aunque nominalmente idénticas, presentan pequeñas diferencias en su desempeño experimental. Sin embargo, dichas diferencias se mantienen acotadas y muestran un comportamiento consistente entre ambas unidades, situándose ambas por debajo de las especificaciones del fabricante, con la bomba 2 exhibiendo un rendimiento hidráulico ligeramente superior.

### 5.1.1. Rendimiento en configuraciones combinadas

Finalmente, se evalúa el rendimiento experimental del sistema con las bombas conectadas en serie y en paralelo. A diferencia de las pruebas individuales, para estas configuraciones no se realiza un análisis de propagación de incertidumbre, por lo que los puntos experimentales se presentan sin barras de error.

#### Bombas en serie

Las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10 muestran el rendimiento experimental del sistema de bombas operando en serie.

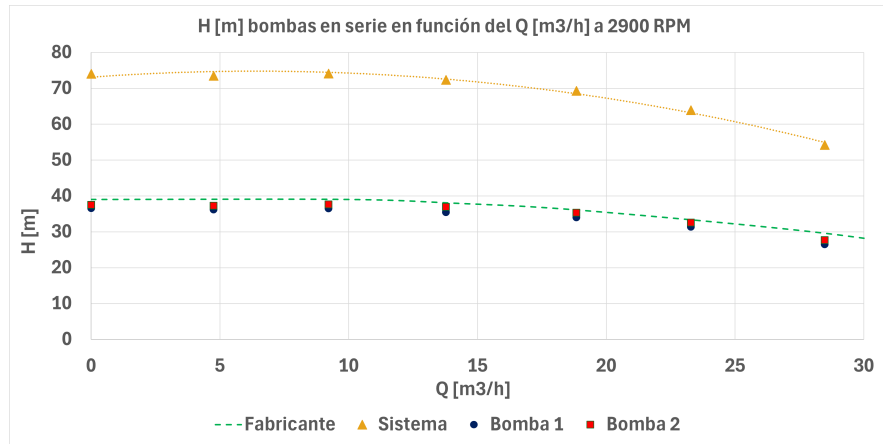


Figura 5.8: Curva H-Q experimental (bombas en serie, normalizada a 2900 rpm).

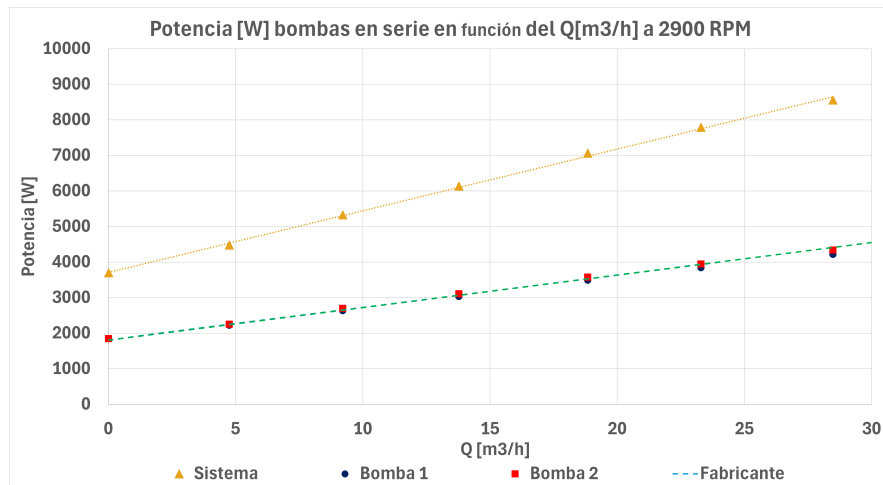


Figura 5.9: Curva P-Q experimental (bombas en serie, normalizada a 2900 RPM).

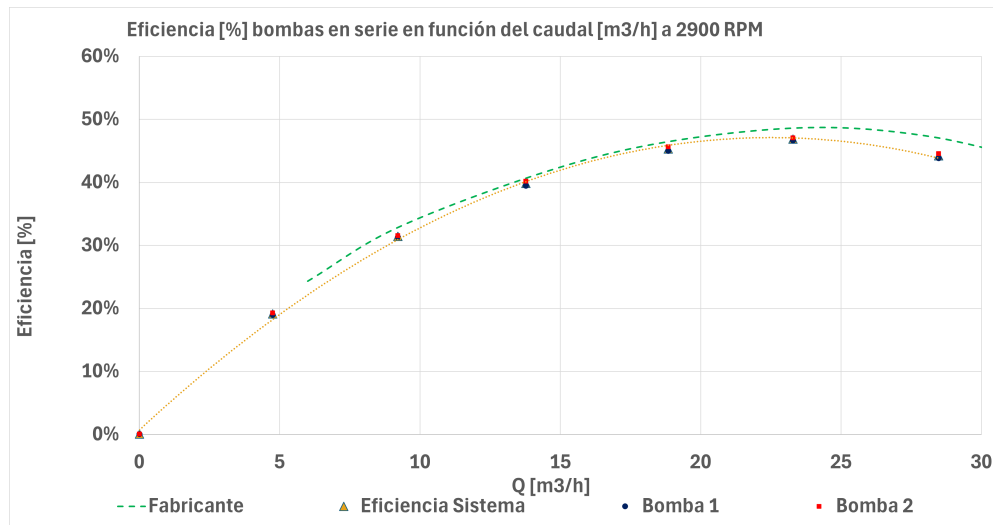


Figura 5.10: Curva  $\eta$ -Q experimental (Bombas en Serie, normalizada a 2900 RPM).

Para la configuración en serie, se observa en la figura 5.8 que la altura manométrica ( $H$ ) a caudal cero es de aproximadamente 74 m. Esta curva presenta un perfil relativamente plano hasta los 9 m³/h, punto a partir del cual comienza a descender de forma más pronunciada.

La curva de potencia (figura 5.9) muestra, como es de esperar, un incremento marcadamente lineal de la potencia consumida a medida que aumenta el caudal. La potencia a caudal nulo es de aproximadamente 4100 W, y se eleva hasta unos 9500 W para el máximo caudal medido.

La curva de eficiencia (Figura 5.10) parte de cero y muestra un comportamiento parabólico. El punto de máxima eficiencia (BEP) experimental para la configuración en serie se localiza en torno a 23 m³/h con una eficiencia máxima de 47 %.

### Bombas en paralelo

Finalmente, las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 muestran las curvas características experimentales realizadas en el banco de ensayos de la universidad aplicado en el sistema de bombas operando en paralelo, normalizadas a 2900 rpm.

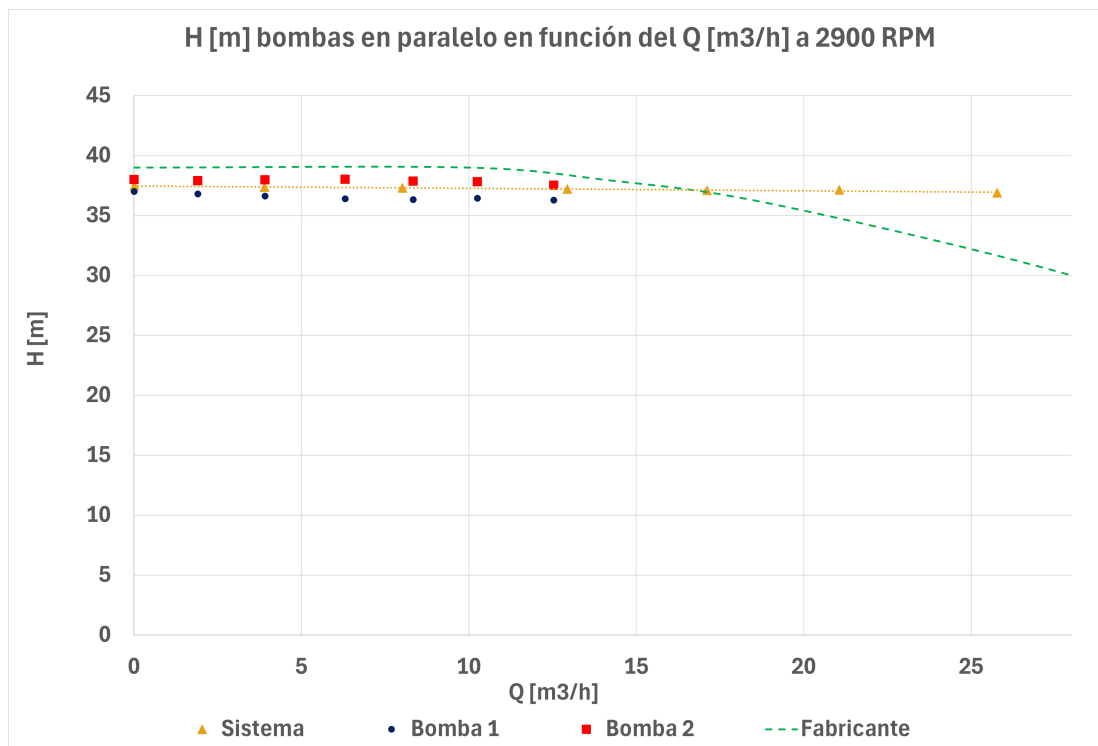


Figura 5.11: Curva H-Q experimental.

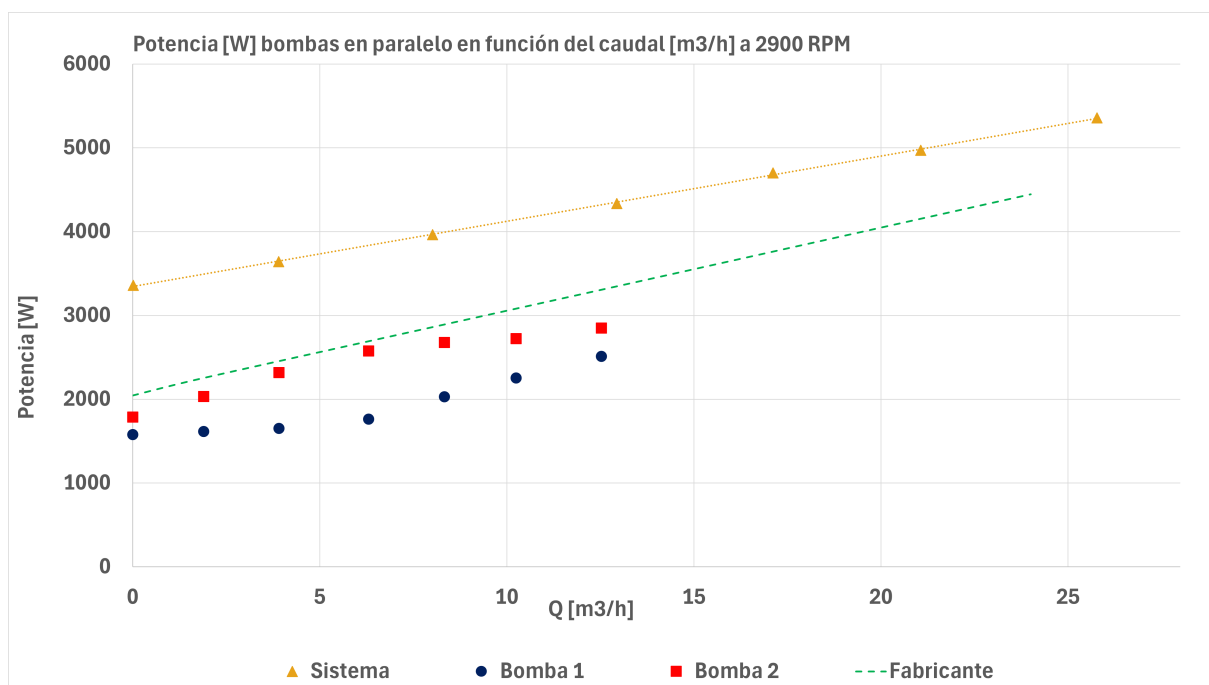


Figura 5.12: Curva P-Q experimental.

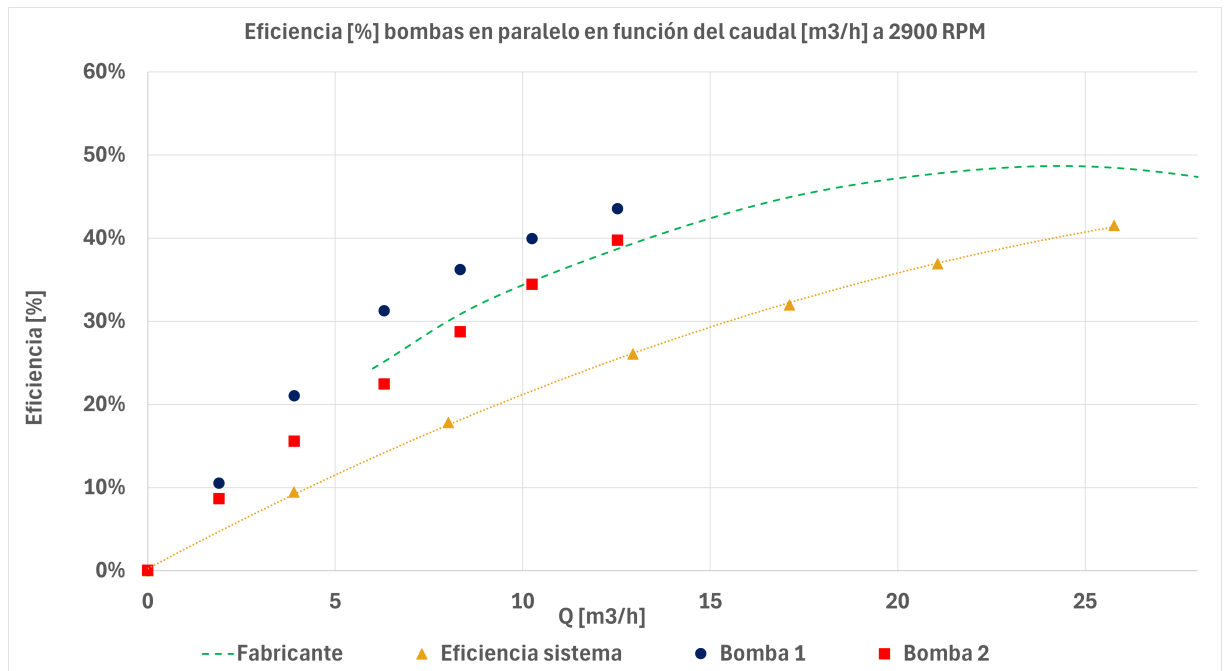


Figura 5.13: Curva  $\eta$ - $Q$  experimental.

La configuración en paralelo (Figura 5.11) se caracteriza por una curva H-Q notablemente plana. El sistema mantiene una altura manométrica casi constante de aproximadamente 37,5 m a caudal cero, disminuyendo de forma muy leve, a 37 m para el máximo caudal medido de 25 m³/h. Esto demuestra la capacidad de la configuración para entregar un amplio rango de caudales a una altura elevada y constante.

La curva de potencia (Figura 5.12) presenta un comportamiento lineal, comenzando en aproximadamente 4100 W a caudal nulo (potencia consumida por ambas bombas) y aumentando hasta unos 6600 W en el punto de máximo caudal.

La curva de eficiencia (Figura 5.13) muestra un crecimiento parabólico que, a diferencia de otras configuraciones, no parece alcanzar un punto máximo claro dentro del rango medido. La eficiencia continúa aumentando, alcanzando su valor más alto en el último punto medido ( $Q \approx 25$  m³/h) con un valor de aproximadamente 65 %.

### 5.1.2. Curva del Sistema

En esta sección se caracteriza la curva de pérdidas de carga del circuito hidráulico, comúnmente denominada la "Curva del Sistema". Esta curva representa la altura manométrica ( $H_{sis}$ ) que la bomba debe vencer para transportar un caudal ( $Q$ ) determinado a través de la instalación.

La altura del sistema se compone de dos términos principales: la altura estática ( $\Delta z$ ) y las pérdidas por fricción ( $h_f$ ), que son proporcionales al cuadrado del caudal ( $H_{sis} = \Delta z + k \cdot Q^2$ ).

Para este trabajo, se determina la curva del sistema mediante dos métodos:

- Curva Empírica (Experimental): Obtenida midiendo directamente la diferencia de presión (altura) requerida para forzar diferentes caudales a través del circuito. Estas mediciones se realizaron durante los ensayos de las Bombas 1 y 2.
- Curva Teórica: Calculada analíticamente a partir de la Ecuación de Darcy-Weisbach para pérdidas mayores y el método de coeficientes de pérdida ( $K_L$ ) para pérdidas en elementos o accesorios.

Las Figuras 5.14 y 5.15 presentan la curva empírica del sistema obtenida durante los ensayos de cada bomba, comparadas con el cálculo teórico.

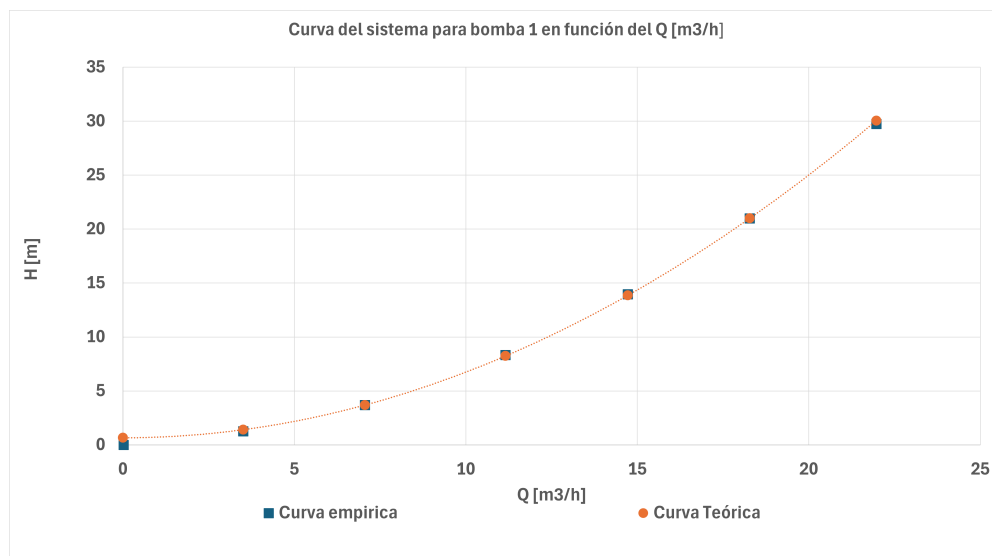


Figura 5.14: Comparación de la Curva empírica del sistema (ensayo B1) vs. la Curva Teórica.

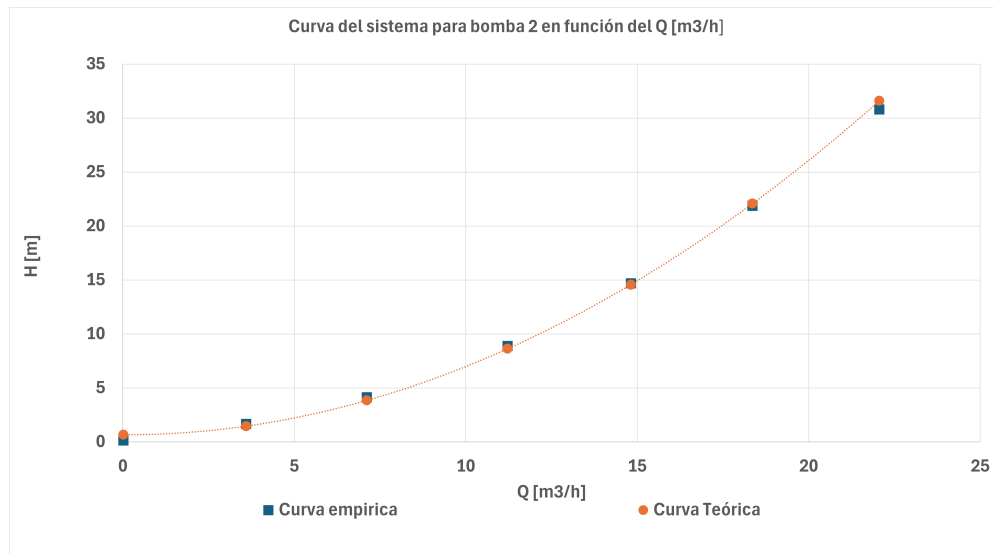


Figura 5.15: Comparación de la Curva empírica del sistema (ensayo B2) vs. la Curva Teórica.

Como se observa en ambas figuras (5.14 y 5.15), las curvas experimentales (puntos cuadrados) parten del origen (0, 0). Esto indica que la altura estática ( $\Delta z$ ) de la instalación es nula o despreciable, lo que sugiere que el sistema es un circuito cerrado o que los puntos de entrada y salida están a la misma elevación.

A medida que el caudal aumenta, la altura requerida crece de forma parabólica, en total concordancia con la teoría de pérdidas por fricción ( $h_f \propto k \cdot Q^2$ ).

El hallazgo más notable es la excelente concordancia entre los datos empíricos y los puntos de la curva teórica, presente en las mediciones de ambos ensayos. Los puntos de ambas series se superponen casi perfectamente en todo el rango de caudales. Esta consistencia entre el ensayo de la Bomba 1 y el de la Bomba 2 no solo valida la precisión del modelo teórico (coeficientes  $K_L$  y factores de fricción), sino que también confirma la alta repetibilidad y fiabilidad de las mediciones experimentales realizadas. Los datos empleados para la construcción de estas curvas se detallan en el Anexo A.5.2.

# Capítulo 6

## Discusión

Este capítulo se dedica al análisis e interpretación de los resultados experimentales presentados en el Capítulo 5. El propósito es conectar los datos obtenidos con los principios teóricos del Capítulo 3, desentrañando el significado de las mediciones y el comportamiento observado del banco de pruebas y las bombas.

### 6.1. Calidad metrológica del banco

La validación preliminar de los datos (Sección 5) revela dos aspectos fundamentales sobre la naturaleza del banco de pruebas: su consistencia a largo plazo y su volatilidad a corto plazo.

Un hallazgo de gran relevancia es la excelente repetibilidad del sistema. Al comparar ensayos completos de las bombas individuales en días distintos (Sección 5.0.3), las desviaciones máximas para los parámetros clave —altura, potencia y eficiencia— se mantuvieron por debajo del 3,0 % (Tabla 5.3). Esto demuestra que el banco de pruebas y la metodología de ensayo (Capítulo 4) son robustos y consistentes. Esta fiabilidad constituye la piedra angular para cualquier instrumento de uso académico, asegurando que los fenómenos observados son reales y no artefactos aleatorios.

Un hallazgo de gran relevancia es la excelente repetibilidad del sistema. Al comparar ensayos completos de las bombas individuales en días distintos (sección 5.0.3), las desviaciones máximas para los parámetros clave —altura, potencia y eficiencia— se mantuvieron por debajo del 3,0 % (Tabla 5.3). Esto demuestra que el banco de pruebas y la metodología de ensayo (Capítulo 4) son robustos y consistentes. Esta fiabilidad constituye la piedra angular para cualquier instrumento de uso académico, asegurando que los fenómenos observados son reales y no artefactos aleatorios.

### 6.1.1. Independencia temporal de las mediciones

El análisis de estabilidad descrito en la Sección 5.0.1 permite establecer que una ventana de adquisición de 60 s es adecuada para obtener valores promedio representativos e independientes del tiempo de medición. En este contexto, más que identificar un régimen estrictamente estacionario, el objetivo es verificar que las magnitudes medidas no presenten variaciones sistemáticas que afecten el valor promedio al extender el intervalo de adquisición.

Durante el análisis se observa que la configuración en serie presenta el comportamiento más lento en términos de convergencia temporal, alcanzando la independencia del promedio en tiempos cercanos o levemente superiores a los 60 s. No obstante, se adopta este valor como referencia para todos los ensayos, dado que la mayoría de las configuraciones —en particular las bombas operando de forma individual y en paralelo— alcanzan dicha condición en tiempos menores, y que extender el intervalo de medición más allá de 60 s no produce variaciones significativas en los valores promedio calculados.

Este comportamiento más inercial observado en la configuración en serie es consistente con la naturaleza del sistema hidráulico, el cual presenta un mayor volumen interno presurizado y una interacción transitoria más compleja entre ambas bombas y la línea de descarga común, lo que se traduce en tiempos de convergencia temporal ligeramente superiores.

### 6.1.2. Fluctuaciones instantáneas

El análisis de fluctuaciones instantáneas conforme a la norma ISO 9906:2012 (Sección 5.0.2) permite evaluar el comportamiento dinámico de las variables medidas en el banco de ensayos. En términos generales, la velocidad de rotación ( $n$ ) y la altura diferencial ( $H$ ) presentan fluctuaciones reducidas, cumpliendo los requisitos de los grados 1 y 2, respectivamente, incluso en los casos más desfavorables. En contraste, las variables caudal ( $Q$ ) y potencia en el eje ( $P$ ) exhiben fluctuaciones relativas mayores, alcanzando valores máximos de  $\pm 26,9\%$  y  $\pm 12,7\%$ , respectivamente, tal como se resume en la Tabla 5.2.

Un comportamiento particularmente sensible se observa en las mediciones de presión en la succión de ambas bombas. Estas presentan fluctuaciones elevadas en determinados puntos de operación, tanto en ensayos individuales como en configuraciones

en serie y en paralelo, superando en algunos casos los límites establecidos para el grado 3 de la norma ISO 9906. Cabe destacar que este comportamiento no se manifiesta de forma uniforme en todo el rango operativo, sino que se concentra en condiciones específicas de bajo caudal y elevada restricción hidráulica.

La causa de estas fluctuaciones se asocia probablemente a fenómenos locales en la zona de succión, tales como separación del flujo, recirculaciones internas y alta sensibilidad de los sensores de presión en rangos de presión reducidos. Asimismo, no se descarta la posible aparición incipiente de fenómenos de cavitación o la formación de microburbujas, los cuales pueden amplificar las variaciones instantáneas de presión sin necesariamente afectar las magnitudes globales de rendimiento de la bomba.

Este resultado indica que, si bien el banco de ensayos cumple adecuadamente las exigencias normativas para las variables globales de desempeño ( $H$ ,  $P$  y  $\eta$ ), la región de succión constituye el punto más sensible del sistema desde el punto de vista de fluctuaciones instantáneas. Dicho comportamiento se interpreta como una limitación local del sistema de medición y de las condiciones hidráulicas en la entrada de las bombas, más que como una deficiencia global del funcionamiento del banco.

### **6.1.3. Análisis desagregado de fluctuaciones por variable y configuración (ISO 9906)**

Con el fin de profundizar la interpretación de la Sección 6.1.2, se sintetizan aquí los patrones dominantes observados en el Análisis Detallado de Fluctuaciones (Anexo A.2), desagregando por variable y configuración, y contrastándolos con los límites de la ISO 9906 (Grados 1/2/3).

**Caudal ( $Q_g$ ).** En la condición de shut-off (0 % de apertura), el caudal presenta fluctuaciones relativas muy elevadas (p. ej., 176,3 % en la Bomba 1 y 243,8 % en la Bomba 2), claramente fuera de los límites del Grado 3. Este comportamiento no se asocia a una inestabilidad física del sistema, sino que responde principalmente a una inestabilidad de carácter matemático, derivada del cálculo de fluctuaciones normalizadas respecto de valores medios de caudal cercanos a cero, lo cual amplifica artificialmente la variación relativa. Este resultado es esperable al operar con la válvula cerrada y justifica la exclusión de esta condición del análisis de rendimiento.

En aperturas intermedias, el caudal  $Q_g$  cumple típicamente con los criterios del Grado 1 en ensayos individuales (p. ej., Bomba 1: 0,6 %–1,8 %; Bomba 2: 0,6 %–2,6 %;

véanse §A.2.1–A.2.2), evidenciando un comportamiento estable y reproducible. En la configuración en paralelo, se identifican casos puntuales de incremento en la fluctuación del caudal (p. ej., 26,9 % a un 36 % de apertura), donde no se cumple el Grado 3 (§A.2.4). Este comportamiento coincide con el “peor caso” reportado en la Sección 6.1.2 y se asocia a la mayor sensibilidad del caudal total ante interacciones hidráulicas entre bombas y pérdidas del sistema, más que a una condición generalizada del banco de ensayos.

**Altura ( $H$ ).** Las fluctuaciones de  $H$  se mantienen dentro de G1 en la mayor parte de las condiciones y configuraciones (p. ej., B1: 0,9 %–1,6 %; B2: 0,5 %–1,2 %; Serie: 1,0 %–2,6 %; Paralelo: 0,6 %–1,3 %; §A.2.1–A.2.4). Este comportamiento respalda la estabilidad de la medición de presión diferencial y es consistente con la superposición entre la curva del sistema teórica y la empírica (Sección 5.1.2).

**Potencia ( $P$ ).** En ensayos individuales, las fluctuaciones de  $P$  se mantienen en G1–G2 (B1: 0,8 %–1,4 %; B2: 1,0 %–1,1 %; §A.2.1–A.2.2). En serie, se detectan puntos con excedencias sobre G2 e incluso G3 (p. ej., 6,9 % y 8,7 % en  $P_{eje}$  de B1 y B2 a 26 % de apertura; §A.2.3), en concordancia con el aumento de interacción hidráulica y la mayor sensibilidad del par requerido en condiciones de carga combinada.

**Presiones de succión ( $P_{a1}$ ,  $P_{b1}$ ) y descarga ( $P_{a2}$ ,  $P_{b2}$ ).** Las presiones de succión presentan el comportamiento más crítico: exceden G3 de manera sistemática en amplios rangos de operación, tanto en ensayos individuales como en configuraciones combinadas (v. gr., B1: 17,4 %–91,8 % en  $P_{a1}$ ; B2: 5,5 %–147,7 % en  $P_{b1}$  y 409,3 % en paralelo a 30 %; §A.2.1, §A.2.2, §A.2.4). En cambio, las presiones de descarga ( $P_{a2}$  y  $P_{b2}$ ) se mantuvieron dentro de G1–G3, típicamente por debajo de 3 %–4 %, lo que indica un régimen de impulsión más estable.

**Velocidad ( $n$ ) y temperatura ( $T$ ).** La velocidad de rotación cumplió sistemáticamente G1 (0,1 % en todos los casos), corroborando la estabilidad del control de velocidad por VFD. La temperatura se mantuvo dentro del límite de 0,3 °C salvo en shut-off, donde se registraron picos (p. ej., 1,5 °C en B1 y en serie), coherentes con estratificación térmica y baja convección a caudal nulo.

**Implicancia metrológica.** Los patrones observados confirman que las mayores fluctuaciones se concentran en la zona de succión, lo que explica la dominancia de la incertidumbre sistemática asociada a las mediciones de presión ( $P_{a1}/P_{b1}$ ) y su posterior propagación hacia la altura diferencial ( $H$ ) y la eficiencia ( $\eta$ ). Este comportamiento se ve reforzado por el hecho de que, en dichas condiciones, las presiones medidas se sitúan en rangos bajos respecto del fondo de escala de los sensores, aumentando su sensibilidad relativa y amplificando las fluctuaciones registradas.

Asimismo, los picos de fluctuación observados en el caudal ( $Q$ ) y en la potencia en el eje ( $P$ ) bajo condiciones particulares de operación (p. ej., configuración en paralelo a 36 % de apertura y en serie a 26 %) caracterizan regímenes dinámicos más sensibles a la interacción entre bombas y a la resistencia hidráulica del sistema. Este comportamiento es coherente con la imposibilidad de determinar un punto de máxima eficiencia (BEP) en la configuración en paralelo dentro del rango operativo disponible, y se interpreta como una combinación de efectos hidráulicos y limitaciones metrológicas del sistema de medición.

#### **6.1.4. Repetibilidad e incertidumbre**

En términos de repetibilidad, los resultados confirman que las pruebas pueden reproducirse con alta fiabilidad. Tanto la bomba 1 como la bomba 2, operando por separado, replican prácticamente los mismos valores de  $H$ ,  $Q$ ,  $P$  y  $\eta$  dentro del margen del 3 %. Este grado de concordancia valida la consistencia operativa del banco y la robustez de la instrumentación, lo que respalda su uso para prácticas académicas con resultados confiables.

Respecto a la incertidumbre global, se verifica que el error relativo disminuye considerablemente al promediar sobre 60 s, gracias a la reducción de la componente aleatoria. Sin embargo, la incertidumbre sistemática se mantiene como el factor dominante, elevando el error total de forma significativa. El efecto más notorio se produce en la presión de entrada, cuyo comportamiento errático y sensibilidad extrema amplifican la incertidumbre combinada del ensayo. Este fenómeno resalta la importancia de mantener controladas las condiciones hidráulicas de succión y, a futuro, de mejorar la amortiguación y el filtrado de la línea de entrada.

**Consideración sobre la medición de temperatura en Bomba 2.** Cabe señalar que la toma de temperatura asociada a la Bomba 2 se encuentra instalada en la succión

de la Bomba 1, de modo que, durante los ensayos individuales de la Bomba 2, no se registró la temperatura representativa de su circuito sino la correspondiente al tramo de entrada de la Bomba 1. En consecuencia, los incrementos de temperatura y, por extensión, las correcciones de propiedades del fluido (densidad y viscosidad) aplicadas a la Bomba 2 presentan un sesgo sistemático cuando esta opera de forma independiente. Este hecho explica la poca fiabilidad de los  $\Delta T$  reportados para la Bomba 2 en condición individual y su influencia en la propagación de incertidumbre de las magnitudes derivadas (especialmente en  $\eta$ ), lo que debe ser tenido en cuenta al interpretar los resultados comparativos de rendimiento.

### **6.1.5. Cumplimiento de los grados de incertidumbre según ISO 9906**

El análisis detallado de las incertidumbres aleatoria, sistemática y general (Anexo A.4) permite contrastar cuantitativamente los resultados con los grados de aceptación establecidos en la norma ISO 9906:2012. A partir de este contraste, se determina que, aunque el banco de ensayos presenta una excelente estabilidad y repetibilidad, las incertidumbres combinadas no cumplen con los límites exigidos por la norma, principalmente debido a la elevada contribución sistemática de las presiones de succión.

En la bomba 1, la presión de entrada ( $P_{a1}$ ) exhibe incertidumbres sistemáticas ( $e_s$ ) extremadamente altas, alcanzando valores del orden de 92.9 %, 117.9 %, 242.3 % e incluso 367.5 % en distintas aperturas de válvula (Tabla A.13). De manera análoga, en la bomba 2, la presión de succión ( $P_{b1}$ ) presenta los mayores desvíos, con valores sistemáticos que superan los 2 300 %, lo que representa una clara excedencia respecto de los grados máximos de incertidumbre aceptables según ISO 9906. Este comportamiento se atribuye principalmente a la alta sensibilidad del transductor en la zona de baja presión, asociada a que el rango nominal de operación del sensor de presión en la succión es considerablemente mayor que el rango efectivo de presiones utilizado durante los ensayos. En estas condiciones, pequeñas variaciones absolutas de presión se traducen en grandes variaciones relativas, amplificando la incertidumbre sistemática. Adicionalmente, influyen fenómenos hidráulicos locales como turbulencias y microburbujas a la entrada de la bomba, así como posibles efectos de ruido eléctrico asociados al variador de frecuencia (VFD).

En contraste, las demás variables medidas —como el caudal ( $Q_g$ ), la presión de

descarga ( $P_{a2}$  y  $P_{b2}$ ), la temperatura del fluido ( $T$ ) y la velocidad de rotación ( $n$ )—mantienen incertidumbres sistemáticas y totales dentro de márgenes aceptables, usualmente inferiores al 5 %. De este modo, el problema se concentra exclusivamente en la línea de succión, donde las condiciones hidráulicas del flujo generan un nivel de inestabilidad que se refleja directamente en la calidad metrológica de la medición.

Al propagar estas incertidumbres hacia las magnitudes derivadas, se obtuvieron valores absolutos de  $u(H) \approx 1,31$  m para la altura y  $u(\eta) \approx 6\text{--}7$  % para la eficiencia en el rango operativo medio, mientras que en condiciones de válvula cerrada la incertidumbre relativa de eficiencia aumenta hasta aproximadamente 20 %. Estos resultados confirman que, aunque la componente aleatoria se reduce significativamente al emplear una ventana de promediado de 60 s, la componente sistemática domina el presupuesto total de error, elevando el nivel de incertidumbre global por sobre los grados permitidos por la norma.

En consecuencia, se concluye que el banco de pruebas cumple parcialmente con los requisitos metrológicos de la norma ISO 9906:2012. Si bien las magnitudes globales de rendimiento ( $H$ ,  $P_{eje}$  y  $\eta$ ) se mantienen dentro de un rango de dispersión aceptable y presentan resultados físicamente coherentes, las presiones de succión, por lo tanto, las alturas derivadas de ellas, no satisfacen los grados de incertidumbre especificados. Este hallazgo reviste gran importancia, pues establece el límite de aceptación de los datos desde el punto de vista normativo y permite interpretar con rigor los resultados experimentales obtenidos en las secciones posteriores.

## **6.2. Diferencia entre el catálogo y las mediciones: análisis del rendimiento individual**

El núcleo de este estudio radica en la comparación del rendimiento experimental de las bombas individuales con las curvas teóricas del fabricante (Sección ??).

Los resultados son claros y consistentes para ambas unidades:

- Las curvas  $H\text{--}Q$  experimentales se sitúan por debajo de las curvas del fabricante (figuras ?? y ??).
- Las curvas de potencia ( $P_{eje}\text{--}Q$ ) experimentales se sitúan por encima de las teóricas (Figuras ?? y ??).

- Como consecuencia directa, las curvas de eficiencia ( $\eta-Q$ ) se ubican globalmente por debajo de las teóricas (Figuras ?? y ??).

### **Significado físico y causas de la brecha**

Esta “brecha de rendimiento” cuantifica la diferencia entre el mundo ideal de un catálogo y el entorno real de un laboratorio académico. Las principales causas son:

- **Desgaste Físico:** El banco de pruebas ha sido capaz de cuantificar la degradación del rendimiento. Es altamente probable que el desgaste natural de los rodets y las holguras internas de las bombas (que no son nuevas) haya reducido su capacidad de impartir energía al fluido (menor  $H$ ) y aumentado las pérdidas, requiriendo más potencia (mayor  $P_{eje}$ ) para el mismo trabajo.
- **Idelización de las curvas:** Las curvas del fabricante se obtienen en condiciones de ensayo perfectas. El banco, en cambio, mide el rendimiento del sistema global, que incluye las pérdidas en el motor WEG y el VFD Siemens Sinamics. Aunque la eficiencia del motor se consideró teóricamente (Sección 4.4.5) , el rendimiento real del motor operando a cargas parciales y alimentado por un VFD puede ser inferior al nominal, contribuyendo a la brecha de eficiencia
- **Efectos de instalación:** pequeñas asimetrías, longitudes rectas insuficientes o efectos de entrada alteran las presiones medidas y afectan la exactitud del diferencial de altura.

#### **6.2.1. Definición del BEP y comparación con fabricante**

En las curvas de eficiencia individuales, no fue posible determinar con certeza el Punto de Máxima Eficiencia (BEP). El motivo es que la curva del sistema limita el rango de caudales alcanzables, impidiendo medir la región donde la eficiencia comienza a decaer. No obstante, las tendencias indican que la eficiencia máxima se encuentra cerca del límite superior del rango operativo alcanzado.

Aun así, se observa un alto grado de concordancia con el fabricante: para la bomba 2, especialmente, las curvas experimentales de eficiencia se aproximan notablemente a las teóricas, y el rango de incertidumbre abarca la curva del fabricante, lo que indica buena correspondencia dentro de los márgenes esperados.

De forma similar, en las curvas de altura, a mayores caudales las curvas experimentales se acercan progresivamente a las del fabricante, reflejando que el comportamiento real converge hacia la condición teórica en la zona de flujo plenamente desarrollado y pérdidas relativas menores.

## **6.3. Validación experimental**

El estudio proporciona una validación robusta de los dos pilares teóricos de la hidráulica de bombas: las pérdidas del sistema y las leyes de configuración.

### **6.3.1. Validación cruzada de la curva del sistema**

Un resultado de notable precisión es la caracterización de la curva del sistema (Sección 5.1.2) . Las Figuras 5.14 y 5.15 muestran una superposición casi perfecta entre la curva empírica (datos medidos) y la curva teórica (calculada analíticamente) . Esto significa que:

- Valida instrumentación: Demuestra que el caudalímetro Siemens y los transmisores de presión Danfoss y Wika funcionan en alta concordancia y con gran precisión.
- Valida el modelo teórico: Confirma que el modelo analítico de pérdidas (basado en Darcy-Weisbach y los coeficientes  $K_L$  de los accesorios del Anexo A.5.2) describe con exactitud la resistencia hidráulica real del banco

### **6.3.2. Demostración de las configuraciones serie y paralelo**

Los ensayos en configuraciones combinadas (Sección 5.1.1) validan cualitativa y cuantitativamente la teoría:

- Configuración en serie: La Figura 5.8 muestra una curva H-Q que, a caudal cero, alcanza una altura (aprox. 74 m) que es la suma de las alturas individuales (aprox. 37 m cada una). Esto demuestra experimentalmente el principio de suma de alturas
- Configuración Paralelo: La Figura 5.11 muestra una curva H-Q notablemente plana, manteniendo una altura casi constante (aprox. 37.5 m) mientras entrega un rango de caudal extendido, validando el principio de suma de caudales.

En la curva de eficiencia en paralelo (Figura 5.13) se aprecia un comportamiento ascendente en todo el rango medido, sin alcanzar un máximo. Esto indica que el BEP del conjunto se encuentra más allá del caudal máximo alcanzable por el banco, limitado por su propia resistencia. En otras palabras, el sistema opera de forma estable y eficiente, pero no permite explorar completamente el potencial hidráulico máximo de las bombas en paralelo.

# Capítulo 7

## Conclusión

El presente estudio logra cumplir de forma íntegra los objetivos planteados, tanto en la obtención experimental de las curvas características de bombas centrífugas en distintas configuraciones, como en la validación del desempeño del banco de ensayos implementado en el laboratorio de hidráulica. El análisis global permite integrar los resultados experimentales con los fundamentos teóricos de la mecánica de fluidos e identificar las limitaciones, potencialidades y alcances del sistema de medición.

### 7.1. Evaluación metrológica del banco de ensayos

El banco de pruebas demuestra un desempeño metrológico consistente, estable y confiable, con una variación de los parámetro en la repetibilidad inferior al 3 % para las magnitudes hidráulicas principales (altura, potencia y eficiencia). Este resultado confirma la robustez de la instrumentación y la validez de la metodología experimental aplicada, consolidando su utilidad con fines académicos y de investigación.

No obstante, se identifican zonas críticas en la calidad de las mediciones, principalmente en las presiones de succión, donde las fluctuaciones exceden los límites establecidos por la norma ISO 9906:2012, incluso fuera del grado 3. Este comportamiento refleja la alta sensibilidad de la línea de succión a perturbaciones hidrodinámicas locales (turbulencias, microburbujas y recirculaciones del flujo), así como a posibles interferencias de origen electrónico asociadas al uso del variador de frecuencia, lo cual evidencia que esta variable constituye el punto más débil del sistema de medición.

El análisis temporal permite establecer que 60 s constituye un intervalo de muestreo óptimo para asegurar la convergencia de los promedios, aunque la configuración en serie requirió tiempos ligeramente mayores para alcanzar el estado estacionario. Pese a ello, la estabilidad promedio y la baja dispersión observada respaldan el uso de este intervalo como estándar de medición.

**Limitación de la medición de temperatura en Bomba 2.** Durante los ensayos individuales de la Bomba 2, la temperatura del fluido no fue medida en su propio circuito, sino en la succión de la Bomba 1. En consecuencia, los incrementos de temperatura ( $\Delta T$ ) empleados para ajustar propiedades termofísicas (densidad y viscosidad) no resultan representativos de la Bomba 2 en operación individual. Esta condición introduce un sesgo sistemático en las correcciones termodinámicas y en la propagación de incertidumbre asociada, lo que debe considerarse explícitamente al acotar el alcance metrológico de las magnitudes derivadas de Bomba 2 en dicho régimen.

### 7.1.1. Análisis de incertidumbres y cumplimiento normativo

El desglose detallado de las incertidumbres aleatorias, sistemáticas y totales (Anexo A.4) permite contrastar cuantitativamente los resultados con los grados de aceptación establecidos por la norma ISO 9906:2012. Si bien las magnitudes principales de rendimiento ( $H$ ,  $P_{eje}$  y  $\eta$ ) presentan una buena estabilidad promedio y una dispersión físicamente coherente, el análisis evidencia que las incertidumbres combinadas no cumplen plenamente los grados de aceptación de la norma, principalmente debido a la contribución sistemática asociada a las presiones de succión.

En particular, en la bomba 1 la presión de entrada ( $P_{a1}$ ) registra incertidumbres sistemáticas elevadas en aperturas bajas de válvula, alcanzando valores del orden de 90–370 %. De forma análoga, en la bomba 2 la presión de succión ( $P_{b1}$ ) presenta los mayores desvíos relativos, con valores extremadamente altos en condiciones de shut-off y aperturas reducidas, llegando a superar el 2 300 %.

No obstante, es importante destacar que estos valores extremos corresponden a puntos de operación con presiones medias cercanas a cero, donde el cálculo de incertidumbre relativa amplifica artificialmente el resultado. Por este motivo, dichas condiciones —en particular el shut-off— no se consideran representativas del régimen operativo normal ni se utilizan para la evaluación del cumplimiento normativo, aunque se reportan por completitud metodológica.

Al excluir el shut-off y considerar únicamente el rango operativo efectivo (aperturas mayores al 29 %), las incertidumbres sistemáticas de las presiones de succión disminuyen progresivamente, situándose típicamente entre 20 % y 70 %, con una tendencia decreciente al aumentar el caudal. Este comportamiento confirma que la elevada incertidumbre está dominada por efectos metrológicos, asociados al rango de operación del transductor de presión y a la baja magnitud absoluta de la señal, más que a una

inestabilidad hidráulica del sistema.

En contraste, las demás variables medidas como caudal, presión de descarga, temperatura del fluido y velocidad de rotación presentan incertidumbres sistemáticas y totales reducidas, generalmente inferiores al 5 %, evidenciando un desempeño metrológicamente estable del banco de ensayos en el rango operativo de interés.

## 7.2. Análisis de rendimiento hidráulico

Las curvas características obtenidas experimentalmente para las bombas individuales evidenciaron una disminución de la altura ( $H$ ) y una mayor potencia en el eje ( $P$ ) respecto a las curvas del fabricante, resultando en una eficiencia global inferior. Estas diferencias no se deben a errores de medición aleatorios, sino a desviaciones reales de rendimiento, confirmadas por la falta de superposición entre los intervalos de confianza y las curvas teóricas.

El origen de esta brecha se atribuye principalmente a:

- Desgaste físico y holguras internas de las bombas, que reducen la capacidad de impartir energía al fluido.
- Idealización de los ensayos de fábrica, donde no se consideran pérdidas del sistema, del motor ni del variador de frecuencia.
- Efectos de instalación real, como turbulencias de entrada, longitudes rectas insuficientes o pequeñas asimetrías geométricas.

A pesar de estas desviaciones, la tendencia general de las curvas es coherente con el comportamiento teórico esperado. En particular, se observa que a mayores caudales las curvas experimentales de altura tienden a acercarse a las del fabricante, especialmente para la bomba 2, lo que evidencia un comportamiento hidráulico sano en condiciones de flujo plenamente desarrollado. Asimismo, la curva de eficiencia de la bomba 2 se mantiene dentro del rango de incertidumbre del fabricante, lo que valida la calidad de la medición y la correcta estimación del rendimiento energético.

Si bien no fue posible determinar con precisión el Punto de Máxima Eficiencia (BEP) debido a las limitaciones impuestas por la curva del sistema, las tendencias observadas sugieren que éste se encuentra próximo al límite superior del rango operativo del banco, lo cual confirma que el sistema opera dentro del dominio hidráulico previsto.

**Alcance de las conclusiones para la bomba 2.** A la luz de la ubicación del sensor de temperatura instalada en la succión de la bomba 1, las estimaciones de  $\Delta T$  y las correcciones de propiedades para la bomba 2 no reflejan su condición térmica real cuando opera de forma individual. Por ello, si bien las tendencias observadas en  $H-Q$ ,  $P_{eje}-Q$  y  $\eta-Q$  de la bomba 2 son físicamente coherentes y comparables con el fabricante dentro de los rangos de incertidumbre reportados, la confirmación cuantitativa de su eficiencia y la ubicación precisa de su BEP deben interpretarse con cautela en este escenario, atendiendo a la no representatividad del  $\Delta T$  utilizado.

### 7.3. Validación de los principios teóricos

El trabajo experimental permite validar empíricamente las leyes de configuración de bombas centrífugas:

- En serie, la curva  $H-Q$  verifica el principio de suma de alturas, alcanzando aproximadamente 74 m a caudal nulo, equivalente a la suma de las alturas individuales.
- En paralelo, la curva  $H-Q$  presenta una altura constante de alrededor de 37.5 m con un aumento significativo del caudal total, demostrando la suma de caudales y el carácter “plano” esperado de esta configuración.

Además, la curva de eficiencia en paralelo muestra un crecimiento continuo sin alcanzar su máximo dentro del rango medido, lo que sugiere que el BEP conjunto se encuentra fuera del dominio accesible del banco. Esto confirma que la limitación no proviene de las bombas, sino de la resistencia hidráulica del sistema, reafirmando la validez del modelo teórico aplicado.

Por otro lado, la curva del sistema medida coincide casi perfectamente con la calculada analíticamente mediante la ecuación de Darcy–Weisbach y los coeficientes de pérdidas locales, lo que constituye una validación simultánea del modelo teórico y de la instrumentación empleada. Esta concordancia respalda la precisión del diseño hidráulico del circuito y refuerza la credibilidad de las mediciones obtenidas.

## **7.4. Alcances académicos y proyección futura**

El banco de ensayos ha demostrado ser una herramienta académica de alto valor formativo, capaz de reproducir fielmente los principios teóricos de la hidráulica de bombas y de evidenciar de manera práctica la diferencia entre el rendimiento ideal y el real. Este enfoque experimental ofrece a los estudiantes la posibilidad de visualizar la relación entre carga, caudal, potencia y eficiencia, así como comprender los efectos de operar en configuraciones serie o paralelo y de analizar la influencia del punto de operación sobre el consumo energético.

El estudio permite también establecer el alcance normativo y metrológico del sistema, evidenciando que, si bien no cumple completamente con los grados de incertidumbre de la norma ISO 9906, su comportamiento es estable, repetible y físicamente coherente, garantizando resultados válidos para fines comparativos y formativos. De este modo, se consolida el banco como una plataforma de aprendizaje experimental que vincula directamente los conceptos teóricos de turbomáquinas con su aplicación práctica en laboratorio.

# Capítulo 8

## Recomendaciones

El análisis integral del banco de ensayos de bombas centrífugas permite identificar diversas oportunidades de mejora tanto en el ámbito metrológico como en el hidráulico y operativo. Las recomendaciones que se presentan a continuación buscan optimizar el desempeño del sistema, reducir las incertidumbres sistemáticas observadas, mejorar la representatividad de las mediciones y acercar el banco a los estándares establecidos por la norma ISO 9906:2012, reforzando además su valor académico y científico.

### 8.1. Recomendaciones metrológicas

#### 8.1.1. Optimización de las mediciones de presión

El componente más crítico identificado en el banco de ensayos corresponde a las presiones de succión ( $P_{a1}$  y  $P_{b1}$ ), las cuales presentan fluctuaciones e incertidumbres sistemáticas que exceden los límites del Grado 3 de la norma ISO 9906:2012. A partir de este diagnóstico, se proponen las siguientes acciones de mejora, priorizadas según su impacto esperado en la calidad metrológica de la medición:

- Sustitución de los transductores de presión de succión por sensores de menor rango y mayor resolución (del orden de  $\pm 1$  bar o inferior), adecuados al nivel real de presión operado. Esta medida resulta prioritaria, ya que permitiría mejorar significativamente la relación señal/ruido y reducir la amplificación artificial de la incertidumbre relativa observada en condiciones de baja presión. Junto con ello, se debe verificar la correcta geometría de las tomas de presión y el estado de los anillos colectores, evaluando si las fluctuaciones persisten tras esta modificación.
- Verificación y estandarización de las tomas de presión, asegurando su correcta alineación geométrica, profundidad y simetría, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ISO 9906, con el fin de evitar perturbaciones locales o pérdidas

adicionales no controladas.

- Implementación de blindaje y aislamiento eléctrico en las líneas de señal de los sensores de presión, con el objetivo de minimizar interferencias electromagnéticas inducidas por el variador de frecuencia (VFD), especialmente relevantes en señales de baja amplitud.
- Incorporación de volúmenes de amortiguación hidráulica (cámaras de estabilización) ubicados aguas arriba de la succión de cada bomba, preferentemente en la línea de alimentación desde el estanque, con purgadores automáticos. Estos elementos permitirían atenuar oscilaciones de presión asociadas a microburbujas y a fluctuaciones del flujo, sin afectar directamente la condición de succión inmediata de la bomba.
- Evaluación cautelosa del uso de acondicionadores de flujo aguas arriba de la succión. Si bien estos dispositivos pueden mejorar la uniformidad del perfil de velocidad, su instalación debe analizarse cuidadosamente, ya que una restricción adicional en la línea de succión podría incrementar las pérdidas de carga y favorecer condiciones de cavitación. Su implementación solo se recomienda tras verificar márgenes suficientes de NPSH disponible.

### **8.1.2. Optimización de las mediciones de presión**

El componente más crítico identificado en el banco de ensayos corresponde a las presiones de succión ( $P_{a1}$  y  $P_{b1}$ ), las cuales presentan fluctuaciones e incertidumbres sistemáticas que exceden los límites del Grado 3 de la norma ISO 9906:2012. A partir de este diagnóstico, se proponen las siguientes acciones de mejora, priorizadas según su impacto esperado en la calidad metrológica de la medición:

- Sustitución de los transductores de presión de succión por sensores de menor rango y mayor resolución (del orden de  $\pm 1$  bar o inferior), acordes al nivel real de presión operado. Esta medida se considera prioritaria, ya que permite mejorar significativamente la relación señal/ruido y reducir la amplificación artificial de la incertidumbre relativa observada en condiciones de baja presión. En conjunto con este cambio, se verifica la correcta geometría de las tomas de presión y el estado de los anillos colectores, evaluando si las fluctuaciones persisten tras la modificación.

- Verificación y estandarización de las tomas de presión, asegurando su correcta alineación geométrica, profundidad y simetría, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ISO 9906, con el fin de evitar perturbaciones locales o pérdidas adicionales no controladas.
- Reubicación del sensor de temperatura del fluido o instalación de un segundo sensor, evitando su emplazamiento inmediato en la zona de succión. La presencia del sensor en esta región puede introducir perturbaciones locales del flujo y generar turbulencias adicionales frente a las tomas de presión. Por ello, se recomienda ubicar la medición de temperatura en un tramo de la línea general, suficientemente alejado de la succión de la bomba, donde el flujo sea más uniforme y representativo.
- Implementación de blindaje y aislamiento eléctrico en las líneas de señal de los sensores, con el objetivo de minimizar interferencias electromagnéticas inducidas por el variador de frecuencia (VFD), particularmente relevantes en señales de baja amplitud como las presiones de succión.
- Evaluación cautelosa del uso de acondicionadores de flujo aguas arriba de la succión. Si bien estos dispositivos pueden mejorar la uniformidad del perfil de velocidad, su incorporación debe analizarse cuidadosamente, ya que una restricción adicional en la línea de succión puede incrementar las pérdidas de carga y favorecer condiciones de cavitación. Su implementación solo se considera viable tras verificar que el NPSH disponible sea suficiente.

### **8.1.3. Verificación y calibración periódica**

Para mantener la trazabilidad de las mediciones, se recomienda implementar un programa de calibración anual de los instrumentos principales (caudalímetro, transmisores de presión, sensores de potencia y temperatura). Estas calibraciones deben seguir procedimientos trazables al Sistema Internacional (SI) y realizarse bajo condiciones hidráulicas controladas. Asimismo, se sugiere ejecutar pruebas periódicas de repetibilidad y reproducibilidad para garantizar la estabilidad de las mediciones en distintas jornadas y condiciones de operación.

subsectionExtensión y control del registro temporal

En caso de que las limitaciones metrológicas asociadas a las mediciones de presión en la succión no se resuelvan mediante la optimización de los sensores y de las

tomas de presión, se recomienda ampliar el intervalo de muestreo a 120 s en ensayos de validación e incertidumbre. Esta extensión permite aumentar el número de muestras efectivas y reducir la influencia de fluctuaciones de baja frecuencia en el cálculo de los promedios.

Adicionalmente, la implementación de un sistema de detección automática de independencia temporal —basado en criterios estadísticos de convergencia del promedio— permite identificar el instante a partir del cual las mediciones dejan de depender del tiempo de adquisición. De este modo, el registro y procesamiento de datos se realiza únicamente sobre valores representativos, disminuyendo la dispersión asociada a los transitorios iniciales.

sectionRecomendaciones hidráulicas

#### **8.1.4. Mejoras en la línea de succión**

El comportamiento inestable observado en la línea de succión sugiere la necesidad de revisar y optimizar su diseño hidráulico. En particular, se proponen las siguientes mejoras:

- Incrementar la altura estática de entrada o modificar el nivel del tanque de suministro, con el fin de aumentar la presión disponible en la succión, reduciendo el riesgo de cavitación y las oscilaciones de presión.
- Eliminar codos, válvulas u otros accesorios ubicados inmediatamente antes de la entrada de las bombas y asegurar la longitud recta mínima recomendada por el fabricante, favoreciendo un perfil de velocidad más uniforme.
- Implementar un tanque de nivel constante o un sistema de alimentación presurizado, que permita mantener condiciones hidráulicas estables y controladas en la succión.

Estas modificaciones no solo contribuyen a mejorar la estabilidad hidráulica y la calidad metrológica de las mediciones, sino que además permiten variar de forma controlada la presión en la succión del sistema, habilitando la realización de ensayos específicos de NPSH y la obtención de la correspondiente curva característica, ampliando así las capacidades experimentales del banco de pruebas.

### 8.1.5. Verificación del régimen de cavitación y NPSH

Dado el comportamiento observado en la línea de succión, se recomienda evaluar el régimen de cavitación mediante el análisis del NPSH disponible ( $NPSH_A$ ) y su comparación con el NPSH requerido ( $NPSH_R$ ) proporcionado por el fabricante. El valor de  $NPSH_A$  puede determinarse de forma directa a partir de las condiciones hidráulicas del sistema, considerando la presión en el estanque de alimentación, la altura geométrica, las pérdidas de carga en la línea de succión y la presión de vapor del fluido, comenzando el balance energético desde el estanque hasta la brida de succión de la bomba.

Este cálculo permite verificar, al menos de manera aproximada, si las bombas operan con un margen suficiente respecto del inicio de cavitación, aun sin realizar ensayos específicos de NPSH. De este modo, es posible descartar que las fluctuaciones observadas en las presiones de succión se deban a procesos de vaporización o ingreso de aire en condiciones normales de operación.

Adicionalmente, en caso de disponer de un estanque cerrado y presurizable, por ejemplo mediante el uso de una bomba de vacío o un sistema de control de presión, sería posible realizar ensayos experimentales específicos para determinar el  $NPSH_R$  de las bombas. Esta capacidad permitiría obtener curvas completas de NPSH y ampliar significativamente el alcance experimental del banco de ensayos.

### 8.1.6. Optimización del sistema de descarga

Se recomienda revisar en detalle las uniones, válvulas y accesorios del tramo de descarga, verificando la ausencia de pérdidas de carga adicionales o no controladas. La reducción de estas pérdidas permite disminuir la resistencia hidráulica global del sistema, lo que contribuye directamente a ampliar el rango de caudales operables del banco de ensayos.

Asimismo, la instalación de sensores de presión secundarios en puntos estratégicos de la línea de descarga permitiría obtener un perfil más completo de las pérdidas distribuidas y localizadas, facilitando la validación experimental del modelo teórico de Darcy–Weisbach aplicado en la caracterización hidráulica del sistema. Este enfoque mejora tanto la capacidad de diagnóstico del banco como su flexibilidad operativa en ensayos a distintos caudales.

## **8.2. Recomendaciones normativas y de control experimental**

### **8.2.1. Alineación con ISO 9906:2012**

Para acercar el banco al cumplimiento del grado 2 de la norma ISO 9906, se recomienda:

- Repetir los ensayos tras aplicar las mejoras metrológicas (succión, temperatura, calibración) para verificar la reducción efectiva de las incertidumbres sistemáticas.
- Incorporar barras de error en las curvas experimentales ( $H-Q$ ,  $P-Q$ ,  $\eta-Q$ ) que reflejen la incertidumbre combinada obtenida mediante propagación.
- Implementar una hoja de cálculo o script de propagación de incertidumbre automática según el método GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), con trazabilidad explícita a los parámetros primarios.

### **8.2.2. Automatización y control de adquisición**

Se recomienda modernizar el sistema de adquisición de datos mediante:

- Aplicación de filtros digitales de señal para eliminar ruido eléctrico del VFD sin distorsionar la respuesta física.

## **8.3. Recomendaciones académicas y de investigación**

### **8.3.1. Fortalecimiento del uso docente**

Se recomienda integrar el banco en los cursos de Turbomáquinas, Hidráulica y Energía, promoviendo el aprendizaje práctico de los conceptos de carga, caudal, potencia, eficiencia y configuración de bombas. El sistema puede utilizarse para:

- Comparar configuraciones serie y paralelo y analizar su impacto en el punto de operación.

- Evaluar la eficiencia energética de sistemas de bombeo y aplicar análisis de incertidumbre con base en ISO 9906.
- Introducir herramientas de adquisición y procesamiento digital de datos, vinculando teoría, práctica e instrumentación moderna.

### **8.3.2. Líneas futuras de desarrollo**

Para ampliar las capacidades del banco, se propone las siguiente línea de trabajo:

- Integrar mediciones de vibración, nivel de ruido y temperatura de motor, extendiendo el análisis hacia la eficiencia mecánica y energética global.

## **8.4. Síntesis final**

Las recomendaciones expuestas tienen por objetivo optimizar la calidad metrológica del banco, corregir la ubicación del sensor de temperatura de la Bomba 2, reducir las incertidumbres sistemáticas en succión y consolidar la trazabilidad de las mediciones según la norma ISO 9906:2012. La implementación de estas mejoras permitirá disponer de un banco de ensayos con mayor precisión, confiabilidad y valor académico, capaz de reproducir con exactitud los principios hidráulicos y servir como referencia en futuras investigaciones y actividades docentes.

# Bibliografía

- [1] Basic pump parameters and the affinity laws. Course material, PDHonline, 2005. Consultado en 2025.
- [2] Faisal Ansoria and Edi Widodo. Analysis on centrifugal pump performance in single, serial, and parallel. Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering (JEMMME), 3(2):79–86, 2018.
- [3] F. Regino D. A. Quintero, H. Claro and J. A. Gómez. Development of a data acquisition system using labview and arduino microcontroller for a centrifugal pump test bench connected in series and parallel. In Journal of Physics: Conference Series, volume 1257, page 012002, 2019.
- [4] Danfoss. Mbs 1700 / mbs 1750 – pressure transmitters. <https://designcenter.danfoss.com/products/climate-solutions-for-heating/pressure-transmitters/pressure-transmitters/mbs-1700--mbs-1750/p/060G6105>, s.f. Información técnica del transmisor de presión. Accedido el 21 de julio de 2025.
- [5] EIC Ingenieros. Diseño de estaciones de bombeo de relaves y agua industrial, 2025. Consultado en septiembre de 2025.
- [6] FluidFlow. The application of pump affinity laws to predict pump performance, 2020. Consultado en 2025.
- [7] Robert W. Fox, Alan T. McDonald, and Philip J. Pritchard. Introducción a la Mecánica de Fluidos. Wiley, New York, 8 edition, 2011.
- [8] Hernán Andrés García Hernández and Jesús Alberto Suárez Rincón. Diseño, construcción y puesta a prueba de un banco de bombas centrífugas en serie, paralelo y mixto, 2010.
- [9] International Organization for Standardization. Iso 9906:2012 – rotodynamic pumps: Hydraulic performance acceptance tests – grades 1, 2 and 3, 2012. Norma técnica ISO.
- [10] Miriam Chávez-Estrada Ivette Amores-Silva and Mónica Miranda-Ramos. Diseño, implementación y control para un banco de pruebas con bombas centrífugas en conexión serie y paralelo. Científica, 22(1):51–59, 2018.
- [11] Juan Carlos Calderón Malla and Felipe Israel Montalván Pulla. Adquisición de señales acústicas y vibracionales para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical, 2019. Ingeniería Mecánica.
- [12] Process Instrument Solutions. Siemens sitrans f m magflo 5100 w. <https://www.processinstrumentsolutions.co.uk/product/siemens-sitrans-f-m-magflo-5100-w/>, s.f. Información técnica del sensor. Accedido el 21 de julio de 2025.
- [13] Kevin Alexander Bolovic Riquelme. Evaluación, equipamiento y puesta en marcha del banco de ensayos de bombas centrífugas del laboratorio de termofluidos según norma ISO 9906-2012, 2019.

- [14] Vladimir Prakht Safarbek Oshurbekov, Vadim Kazakbaev and Vladimir Dmitrievskii. Improving reliability and energy efficiency of three parallel pumps by selecting trade-off operating points. *Mathematics*, 9:1297, 2021.
- [15] Naveen Sharma and Lajpat Rai. Design, fabrication and performance evaluation of a test rig of centrifugal pumps in series and parallel combination. *Asian Journal of Science and Applied Technology (AJSAT)*, 1(1):12–17, 2013.
- [16] Siemens AG. Sinamics gl20c: Instrucciones breves de puesta en marcha. [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/689/94003689/att\\_81700/v1/G120C\\_GS4\\_0414\\_esp\\_es-ES.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/689/94003689/att_81700/v1/G120C_GS4_0414_esp_es-ES.pdf), 2014. Manual técnico en español. Accedido el 21 de julio de 2025.
- [17] SRC Soluciones. ¿qué es un sensor pt100? <https://srcsl.com/que-es-un-sensor-pt100/>, s.f. Artículo informativo. Accedido el 21 de julio de 2025.
- [18] Vogt Chile. Catálogo de selección bombas normalizadas. <https://www.vogt.cl/catalogos-vogt/es/Catalogo-Seleccion-Bombas-Normalizadas.pdf>, 2023. Accedido el 30 de marzo de 2025.
- [19] Frank M. White. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, New York, 7 edition, 2011. Análisis de energía en sistemas hidráulicos con bombas.
- [20] Frank M. White. *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill, New York, 7 edition, 2016.
- [21] WIKA. Electronic pressure measurement. <https://www.atlanticvalve.com/docs/wika/wika-electronic-temperature.pdf>, s.f. Ficha técnica de sensores de Presion electrónicos. Accedido el 21 de julio de 2025.
- [22] Álvaro García Amo. Diseño y simulación de una bomba centrífuga mediante su prototipo virtual. 2020. Proyecto Fin de Grado, Ingeniería Mecánica.
- [23] Yunus A. Çengel and John M. Cimbala. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Education, México, 3 edition, 2014. Aplicación de la ecuación de energía en bombas centrífugas.

# Capítulo A

## Anexos

### A.1. Análisis Estabilidad

#### A.1.1. Estabilidad Bomba 1

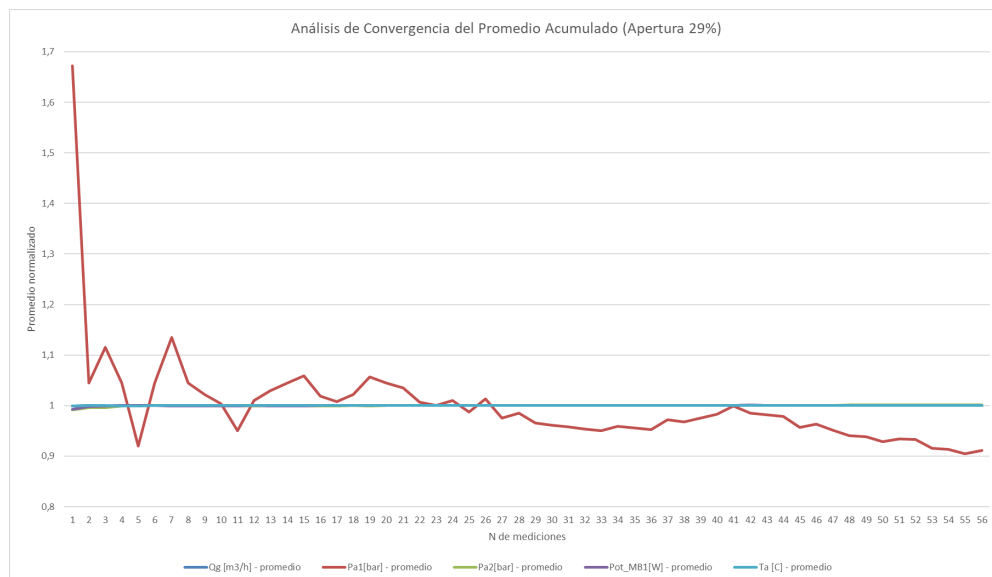


Figura A.1: Análisis de Convergencia del Promedio Acumulado (Apertura 29 %).

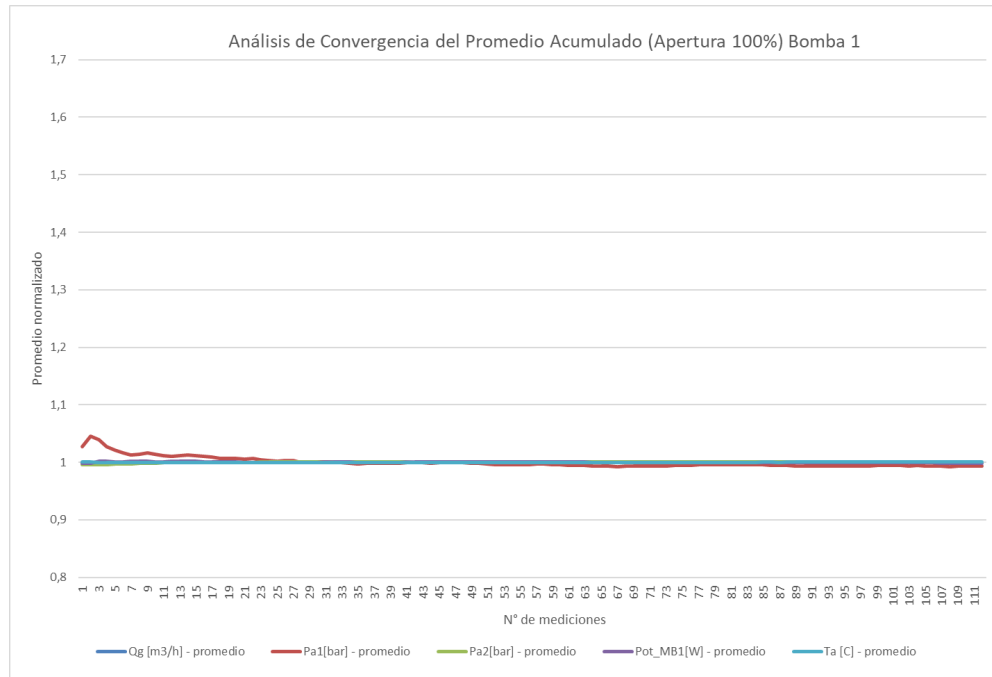


Figura A.2: Análisis de Convergencia del Promedio Acumulado (Apertura 100 %).

Tabla A.1: Análisis de Estabilización de Parámetros de Medición (Bomba 1).

| <b>Apertura<br/>( % )</b> | $N_{estable}$ (Qg) | $N_{estable}$ (Pa1) | $N_{estable}$ (Pa2) | $N_{estable}$ (Pot_MB1) | $N_{estable}$ (T°) |
|---------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|
| 0 %                       | 0                  | 36                  | 36                  | 36                      | 0                  |
| 16 %                      | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 23 %                      | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 29 %                      | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 34 %                      | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 43 %                      | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 100 %                     | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |

Nota:  $N_{estable}$  representa el número de mediciones requeridas para que el parámetro alcance un estado de estabilidad robusta. En caso de haber un 0 significa que esta variable no converge durante la toma de datos.

### A.1.2. Estabilidad Bomba 2

Tabla A.2: Análisis de Estabilización de Parámetros de Medición (Bomba 2).

| <b>Apertura<br/>( % )</b> | $N_{estable}$ (Qg) | $N_{estable}$ (Pb1) | $N_{estable}$ (Pb2) | $N_{estable}$ (Pot_MB2) | $N_{estable}$ (T°) |
|---------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|
| 0 %                       | 0                  | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 16 %                      | 55                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 23 %                      | 39                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 29 %                      | 39                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 34 %                      | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 43 %                      | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |
| 100 %                     | 36                 | 36                  | 36                  | 36                      | 36                 |

Nota:  $N_{estable}$  representa el número de mediciones requeridas para que el parámetro alcance un estado de estabilidad robusta. En caso de haber un 0 significa que esta variable no converge durante la toma de datos.

### A.1.3. Estabilidad bombas en paralelo

Tabla A.3: Análisis de Estabilización (Configuración en Paralelo).

| <b>Apertura<br/>( % )</b> | $N_{est}$ (Qg) | $N_{est}$ (Pa1) | $N_{est}$ (Pa2) | $N_{est}$ (Pb1) | $N_{est}$ (Pb2) | $N_{est}$ (Pot1) | $N_{est}$ (Pot2) | $N_{est}$ (T°) |
|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|
| 0 %                       | 0              | 36              | 36              | 36              | 36              | 46               | 41               | 0              |
| 16 %                      | 0              | 36              | 36              | 36              | 36              | 43               | 43               | 36             |
| 23 %                      | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 36               | 37               | 60             |
| 30 %                      | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 42               | 36               | 36             |
| 36 %                      | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 36               | 63               | 36             |
| 44 %                      | 45             | 36              | 36              | 36              | 36              | 36               | 36               | 36             |
| 100 %                     | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 62               | 65               | 36             |

Nota:  $N_{est}$  representa el número de mediciones requeridas para que el parámetro alcance estabilidad robusta. En caso de haber un 0 significa que esta variable no converge durante la toma de datos.

### A.1.4. Estabilidad Bombas en serie

Tabla A.4: Análisis de Estabilización (Configuración en Serie).

| Apertura<br>(%) | $N_{est}$ (Qg) | $N_{est}$ (Pa1) | $N_{est}$ (Pa2) | $N_{est}$ (Pb1) | $N_{est}$ (Pb2) | $N_{est}$ (Pot1) | $N_{est}$ (Pot2) | $N_{est}$ (T°) |
|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|
| 0 %             | 0              | 36              | 36              | 36              | 36              | 36               | 36               | 36             |
| 15 %            | 63             | 36              | 36              | 36              | 36              | 43               | 36               | 36             |
| 21 %            | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 36               | 43               | 36             |
| 26 %            | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 36               | 36               | 36             |
| 32 %            | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 0                | 64               | 36             |
| 39 %            | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 0                | 0                | 36             |
| 100 %           | 36             | 36              | 36              | 36              | 36              | 62               | 0                | 36             |

Nota:  $N_{est}$  representa el número de mediciones requeridas para que el parámetro alcance estabilidad robusta. En caso de haber un 0 significa que esta variable no converge durante la toma de datos.

## A.2. Análisis Detallado de Fluctuaciones ISO 9906

### A.2.1. Fluctuaciones: Bomba 1

Tabla A.5: Análisis detallado de fluctuación ISO 9906 para la Bomba 1: Fluctuación medida ( $\pm$  %) y cumplimiento por Grado.

| Variable Medida (% Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Apertura 0 % (Shut-off)      |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                    | 176,3 %               | No | No | No |
| H_bomba_1 [m]                | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                 | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                       | 17,4 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                       | 1,3 %                 | No | No | Sí |
| Vm1 [rpm]                    | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                       | 1,5[C°]               | No | No | No |
| Apertura 16 %                |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                    | 1,8 %                 | Sí | Sí | Sí |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.5 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| H_bomba_1 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 22,1 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 23 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 45,4 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 0,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 29 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 91,8 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 34 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 0,8 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 18,2 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 0,8 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |

Continúa en la página siguiente

| Tabla A.5 – continuación de la página anterior                                                                                                                                                                                                                                       |                       |    |    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Variable Medida ( % Apertura)                                                                                                                                                                                                                                                        | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
| Ta [C]                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 43 %                                                                                                                                                                                                                                                                        |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                                                                                                                                                                                                                                                                               | 11,2 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 100 %                                                                                                                                                                                                                                                                       |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                                                                                                                                                                                                                                                                               | 7,1 %                 | No | No | No |
| Pa2[m]                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1,2 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Límites (G1/G2/G3): Caudal ( $\pm 2\%/ \pm 3\%/ \pm 6\%$ ), Altura ( $\pm 3\%/ \pm 4\%/ \pm 10\%$ ), Potencia ( $\pm 2\%/ \pm 3\%/ \pm 6\%$ ), Presiones (Pa1, Pa2) ( $\pm 2\%/ \pm 3\%/ \pm 6\%$ ), Velocidad ( $\pm 0.5\%/ \pm 1\%/ \pm 2\%$ ), Temp ( $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ) |                       |    |    |    |

### A.2.2. Fluctuaciones: Bomba 2

Tabla A.6: Análisis detallado de fluctuación ISO 9906 para la Bomba 1: Fluctuación medida ( $\pm$  %) y cumplimiento por Grado.

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Apertura 0 % (Shut-off)       |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 243,8 %               | No | No | No |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.6 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| H_bomba_2 [m]                 | 0,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb1[m]                        | 147,7 %               | No | No | No |
| Pb2[m]                        | 0,3 %                 | No | No | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 16 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 2,6 %                 | No | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb1[m]                        | 39,3 %                | No | No | No |
| Pb2[m]                        | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 23 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb1[m]                        | 23,8 %                | No | No | No |
| Pb2[m]                        | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 29 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb1[m]                        | 25,0 %                | No | No | No |
| Pb2[m]                        | 0,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.6 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 34 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb1[m]                        | 8,3 %                 | No | No | No |
| Pb2[m]                        | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 43 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,8 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb1[m]                        | 5,5 %                 | No | No | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 100 %                |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb1[m]                        | 1,3 %                 | No | No | No |
| Pb2[m]                        | 0,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |

Límites (G1/G2/G3): Caudal ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Altura ( $\pm 3\%/\pm 4\%/\pm 10\%$ ), Potencia ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Presiones (Pa1, Pa2) ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Velocidad ( $\pm 0.5\%/\pm 1\%/\pm 2\%$ ), Temp ( $\pm 0.3^\circ\text{C}$ )

### A.2.3. Fluctuaciones: Configuración Serie

Tabla A.7: Análisis detallado de fluctuación ISO 9906 para las Bombas en serie: Fluctuación medida ( $\pm$  %) y cumplimiento por Grado.

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Apertura 0 % (Shut-off)       |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 400,0 %               | No | No | No |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 33,9 %                | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 1,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa2[m]                        | 1,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 1,5[C°]               | No | No | No |
| Apertura 15 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 2,2 %                 | No | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,2 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 2,1 %                 | No | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 33,0 %                | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 1,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa2[m]                        | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.7 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Apertura 21 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,8 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,2 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 134,8 %               | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa2[m]                        | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 26 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 3,9 %                 | No | No | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 3,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 1,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 6,9 %                 | No | No | No |
| P_Eje_B2 [W]                  | 8,7 %                 | No | No | No |
| Pa1[m]                        | 109,6 %               | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 7,5 %                 | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 4,9 %                 | No | No | Sí |
| Pb2[m]                        | 4,1 %                 | No | No | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 32 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.7 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| H_bomba_2 [m]                 | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 2,6 %                 | No | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 2,4 %                 | No | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 14,6 %                | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa2[m]                        | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 39 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 1,2 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 2,2 %                 | No | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 2,3 %                 | No | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 10,2 %                | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 1,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa2[m]                        | 1,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 100 %                |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 2,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 2,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 2,6 %                 | No | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 2,3 %                 | No | Sí | Sí |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.7 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Pa1[m]                        | 7,6 %                 | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 5,3 %                 | No | No | Sí |
| Pa2[m]                        | 3,0 %                 | No | No | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,8 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |

Límites (G1/G2/G3): Caudal ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Altura ( $\pm 3\%/\pm 4\%/\pm 10\%$ ), Potencia ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Presiones (Pa1, Pa2) ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Velocidad ( $\pm 0.5\%/\pm 1\%/\pm 2\%$ ), Temp ( $\pm 0.3^\circ\text{C}$ )

#### A.2.4. Fluctuaciones: Configuración Paralelo

Tabla A.8: Análisis detallado de fluctuación ISO 9906 para las Bombas en paralelo:  
Fluctuación medida ( $\pm$  %) y cumplimiento por Grado.

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Apertura 0 % (Shut-off)       |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 246,2 %               | No | No | No |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 2,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 15,4 %                | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 113,3 %               | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,6[C°]               | No | No | No |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.8 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Apertura 16 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 1,9 %                 | No | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 2,1 %                 | No | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 12,0 %                | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 61,5 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 0,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,3[C°]               | No | No | No |
| Apertura 23 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 2,2 %                 | No | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 25,9 %                | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 46,3 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,4 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,7[C°]               | No | No | No |
| Apertura 30 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 1,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.8 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| H_bomba_2 [m]                 | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 2,0 %                 | No | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 409,3 %               | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 20,3 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 36 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 26,9 %                | No | No | No |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 12,7 %                | No | No | No |
| P_Eje_B2 [W]                  | 4,9 %                 | No | No | Sí |
| Pa1[m]                        | 152,8 %               | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 42,3 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 3,5 %                 | No | No | Sí |
| Pb2[m]                        | 3,1 %                 | No | No | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 44 %                 |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,8 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,7 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 1,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 1,9 %                 | Sí | Sí | Sí |

Continúa en la página siguiente

Tabla A.8 – continuación de la página anterior

| Variable Medida ( % Apertura) | Fluctuación ( $\pm$ ) | G1 | G2 | G3 |
|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|
| Pa1[m]                        | 16,7 %                | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 10,6 %                | No | No | No |
| Pa2[m]                        | 0,9 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,5 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |
| Apertura 100 %                |                       |    |    |    |
| Qg [m3/h]                     | 0,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_1 [m]                 | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| H_bomba_2 [m]                 | 0,6 %                 | Sí | Sí | Sí |
| P_Eje_B1 [W]                  | 2,2 %                 | No | Sí | Sí |
| P_Eje_B2 [W]                  | 2,1 %                 | No | Sí | Sí |
| Pa1[m]                        | 9,3 %                 | No | No | No |
| Pb1[m]                        | 4,6 %                 | No | No | Sí |
| Pa2[m]                        | 1,0 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Pb2[m]                        | 0,3 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm1 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Vm2 [rpm]                     | 0,1 %                 | Sí | Sí | Sí |
| Ta [C]                        | 0,0[C°]               | Sí | Sí | Sí |

Límites (G1/G2/G3): Caudal ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Altura ( $\pm 3\%/\pm 4\%/\pm 10\%$ ), Potencia ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Presiones (Pa1, Pa2) ( $\pm 2\%/\pm 3\%/\pm 6\%$ ), Velocidad ( $\pm 0.5\%/\pm 1\%/\pm 2\%$ ), Temp ( $\pm 0.3^\circ\text{C}$ )

## A.3. Análisis de repetibilidad

### A.3.1. Repetibilidad bomba 1

Tabla A.9: Evaluación de repetibilidad entre ensayos experimentales (Bomba 1).

| EV1 [ % ] | Prueba 1  |         |         |            | Prueba 2  |         |         |            | Diferencia relativa ( % ) |            |            |               |
|-----------|-----------|---------|---------|------------|-----------|---------|---------|------------|---------------------------|------------|------------|---------------|
|           | $Q$ [L/s] | $H$ [m] | $P$ [W] | $\eta$ [-] | $Q$ [L/s] | $H$ [m] | $P$ [W] | $\eta$ [-] | $\Delta Q$                | $\Delta H$ | $\Delta P$ | $\Delta \eta$ |
| 0         | 0.0       | 36.6    | 2249    | 0.00       | 0.0       | 36.6    | 2229    | 0.00       | –                         | –          | –          | –             |
| 16        | 3.7       | 36.2    | 2558    | 0.14       | 3.7       | 36.4    | 2544    | 0.15       | 1.5                       | 0.6        | -0.5       | 2.6           |
| 23        | 7.7       | 36.4    | 2968    | 0.26       | 7.9       | 36.7    | 2972    | 0.26       | 2.2                       | 0.9        | 0.1        | 3.0           |
| 29        | 11.5      | 36.1    | 3354    | 0.34       | 11.8      | 36.7    | 3404    | 0.35       | 2.3                       | 1.5        | 1.5        | 2.4           |
| 34        | 15.1      | 35.3    | 3704    | 0.39       | 15.1      | 35.8    | 3714    | 0.40       | 0.0                       | 1.7        | 0.3        | 1.4           |
| 43        | 18.9      | 34.0    | 4061    | 0.43       | 19.2      | 34.5    | 4102    | 0.44       | 1.6                       | 1.7        | 1.0        | 2.3           |
| 100       | 22.8      | 31.9    | 4410    | 0.45       | 23.0      | 32.6    | 4451    | 0.46       | 1.0                       | 2.1        | 0.9        | 2.2           |

### A.3.2. Repetibilidad bomba 2

Tabla A.10: Evaluación de repetibilidad entre ensayos experimentales (Bomba 2).

| EV1 [ % ] | Prueba 1  |         |         |            | Prueba 2  |         |         |            | Diferencia relativa ( % ) |            |            |               |
|-----------|-----------|---------|---------|------------|-----------|---------|---------|------------|---------------------------|------------|------------|---------------|
|           | $Q$ [L/s] | $H$ [m] | $P$ [W] | $\eta$ [-] | $Q$ [L/s] | $H$ [m] | $P$ [W] | $\eta$ [-] | $\Delta Q$                | $\Delta H$ | $\Delta P$ | $\Delta \eta$ |
| 0         | 0.0       | 37.6    | 2237    | 0.00       | 0.0       | 37.6    | 2243    | 0.00       | –                         | –          | –          | –             |
| 16        | 3.7       | 37.5    | 2590    | 0.15       | 3.7       | 37.4    | 2586    | 0.14       | -1.5                      | 0.0        | -0.1       | -1.4          |
| 23        | 7.9       | 37.6    | 3049    | 0.27       | 7.8       | 37.6    | 3034    | 0.26       | -1.6                      | 0.0        | -0.5       | -1.1          |
| 29        | 11.9      | 37.5    | 3471    | 0.35       | 11.8      | 37.6    | 3464    | 0.35       | -0.9                      | 0.1        | -0.2       | -0.5          |
| 34        | 15.1      | 36.8    | 3797    | 0.40       | 15.1      | 36.9    | 3795    | 0.40       | -0.1                      | 0.2        | 0.0        | 0.2           |
| 43        | 19.2      | 35.2    | 4179    | 0.44       | 19.2      | 35.2    | 4189    | 0.44       | 0.2                       | 0.2        | 0.2        | 0.1           |
| 100       | 22.8      | 32.9    | 4503    | 0.45       | 22.9      | 33.0    | 4528    | 0.45       | 0.3                       | 0.2        | 0.6        | 0.0           |

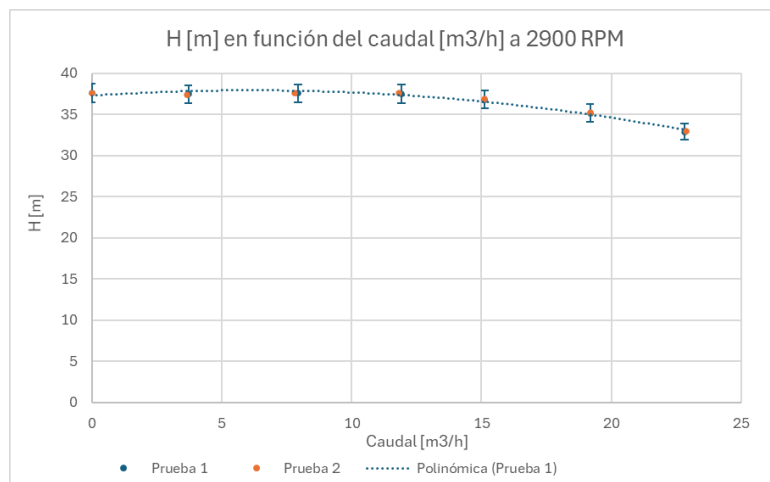


Figura A.3: Comparación de curvas  $H-Q$  (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 2.

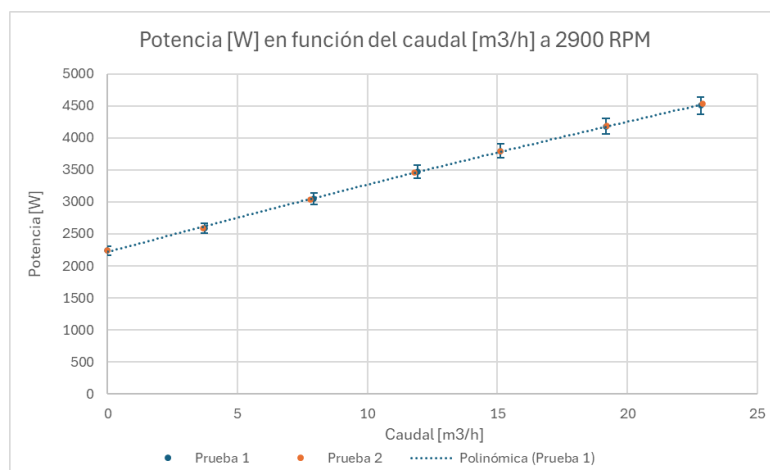


Figura A.4: Comparación de curvas  $P-Q$  (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 2.

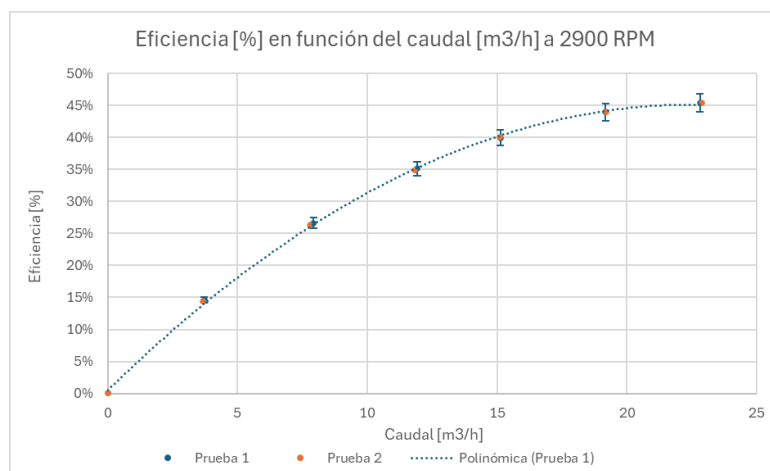


Figura A.5: Comparación de curvas  $\eta-Q$  (Ensayo Día 1 vs. Día 2) para la Bomba 2.

## A.4. Incertidumbre

### A.4.1. Incertidumbre Bomba 1

Tabla A.11: Desglose de los componentes de la incertidumbres (en %) para cada parámetro medido, según la apertura de la válvula para la bomba 1.

| Apertura<br>(%) | Parámetro | Relativo (Aleatorio)<br>( $e_R$ ) (%) | Sistemático<br>( $e_S$ ) (%) | General (Total)<br>( $u_G$ ) (%) |
|-----------------|-----------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 0 %             | Qg        | 19,35                                 | 0,50                         | 19,36                            |
|                 | Pa1       | 2,31                                  | 92,86                        | 92,89                            |
|                 | Pa2       | 0,15                                  | 2,88                         | 2,88                             |
|                 | T°        | 0,02                                  | 3,42                         | 3,42                             |
|                 | RPM       | 0,00                                  | 0,09                         | 0,09                             |
|                 | Pot_MB1   | 0,16                                  | 5,00                         | 5,00                             |
| 16 %            | Qg        | 0,22                                  | 0,50                         | 0,55                             |
|                 | Pa1       | 2,62                                  | 117,91                       | 117,94                           |
|                 | Pa2       | 0,10                                  | 2,92                         | 2,92                             |
|                 | T°        | 0,02                                  | 3,42                         | 3,42                             |
|                 | RPM       | 0,00                                  | 0,09                         | 0,09                             |

(Continúa en la página siguiente...)

Tabla A.11: (Continuación)

| Apertura<br>(%) | Parámetro | Relativo (Aleatorio)<br>( $e_R$ ) (%) | Sistemático<br>( $e_S$ ) (%) | General (Total)<br>( $u_G$ ) (%) |
|-----------------|-----------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                 | Pot_MB1   | 0,11                                  | 5,00                         | 5,00                             |
| 23 %            | Qg        | 0,06                                  | 0,50                         | 0,50                             |
|                 | Pa1       | 6,26                                  | 242,20                       | 242,28                           |
|                 | Pa2       | 0,10                                  | 2,95                         | 2,95                             |
|                 | T°        | 0,02                                  | 3,42                         | 3,42                             |
|                 | RPM       | 0,00                                  | 0,09                         | 0,09                             |
|                 | Pot_MB1   | 0,11                                  | 5,00                         | 5,00                             |
| 29 %            | Qg        | 0,05                                  | 0,50                         | 0,50                             |
|                 | Pa1       | -13,64                                | -367,21                      | 367,47                           |
|                 | Pa2       | 0,13                                  | 3,04                         | 3,04                             |
|                 | T°        | 0,02                                  | 3,42                         | 3,42                             |
|                 | RPM       | 0,00                                  | 0,09                         | 0,09                             |
|                 | Pot_MB1   | 0,11                                  | 5,00                         | 5,00                             |
| 34 %            | Qg        | 0,13                                  | 0,50                         | 0,52                             |
|                 | Pa1       | -2,29                                 | -96,88                       | 96,90                            |
|                 | Pa2       | 0,10                                  | 3,18                         | 3,18                             |
|                 | T°        | 0,02                                  | 3,42                         | 3,42                             |
|                 | RPM       | 0,00                                  | 0,09                         | 0,09                             |
|                 | Pot_MB1   | 0,11                                  | 5,00                         | 5,00                             |
| 43 %            | Qg        | 0,04                                  | 0,50                         | 0,50                             |
|                 | Pa1       | -0,75                                 | -44,99                       | 45,00                            |
|                 | Pa2       | 0,07                                  | 3,46                         | 3,46                             |
|                 | T°        | 0,01                                  | 3,42                         | 3,42                             |
|                 | RPM       | 0,00                                  | 0,09                         | 0,09                             |
|                 | Pot_MB1   | 0,07                                  | 5,00                         | 5,00                             |
| 100 %           | Qg        | 0,02                                  | 0,50                         | 0,50                             |
|                 | Pa1       | -0,56                                 | -28,54                       | 28,54                            |
|                 | Pa2       | 0,10                                  | 3,87                         | 3,88                             |

(Continúa en la página siguiente...)

Tabla A.11: (Continuación)

| Apertura<br>(%) | Parámetro | Relativo (Aleatorio)<br>( $e_R$ ) (%) | Sistemático<br>( $e_S$ ) (%) | General (Total)<br>( $u_G$ ) (%) |
|-----------------|-----------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                 | T°        | 0,01                                  | 3,42                         | 3,42                             |
|                 | RPM       | 0,00                                  | 0,09                         | 0,09                             |
|                 | Pot_MB1   | 0,10                                  | 5,00                         | 5,00                             |

Nota: Las incertidumbres fue calculada como se menciona en la metodología

Tabla A.12: Resultados de Altura Manométrica ( $H$ ) y Eficiencia ( $\eta$ ) con sus incertidumbres propagadas para la bomba 1.

| Apertura<br>(%) | $H_{prom}$<br>(m) | $u(H)$<br>(m) | $\eta_{prom}$<br>(%) | $u(\eta)$<br>(%) |
|-----------------|-------------------|---------------|----------------------|------------------|
| 0 %             | 35,02             | 1,31          | 0,0                  | 20,3             |
| 16 %            | 34,71             | 1,31          | 16                   | 6,3              |
| 23 %            | 34,78             | 1,31          | 28                   | 6,3              |
| 29 %            | 34,44             | 1,31          | 37                   | 6,3              |
| 34 %            | 34,64             | 1,31          | 42                   | 6,4              |
| 43 %            | 32,25             | 1,31          | 46                   | 6,5              |
| 100 %           | 30,33             | 1,31          | 48                   | 6,6              |

Nota:  $u(H)$  y  $u(\eta)$  son las incertidumbres generales absolutas propagadas.

#### A.4.2. Incertidumbre Bomba 2

Tabla A.13: Desglose de los componentes de la incertidumbres (en %) para cada parámetro medido, según la apertura de la válvula para la bomba 2.

| Apertura<br>(%) | Parámetro | Relativo (Aleatorio)<br>( $e_R$ ) (%) | Sistemático<br>( $e_S$ ) (%) | General (Total)<br>( $u_G$ ) (%) |
|-----------------|-----------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                 | Qg        | 20,1                                  | 0,5                          | 20,1                             |
|                 | Pb1       | -34,9                                 | -2363,6                      | 2363,9                           |

0 %

(Continúa en la página siguiente...)

Tabla A.13: (Continuación)

| Apertura<br>(%) | Parámetro | Relativo (Aleatorio)<br>( $e_R$ ) (%) | Sistemático<br>( $e_S$ ) (%) | General (Total)<br>( $u_G$ ) (%) |
|-----------------|-----------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                 | Pb2       | 0,0                                   | 2,8                          | 2,8                              |
|                 | T°        | 0,0                                   | 3,4                          | 3,4                              |
|                 | RPM       | 0,0                                   | 0,1                          | 0,1                              |
|                 | Pot_MB2   | 0,1                                   | 5,0                          | 5,0                              |
| 16 %            | Qg        | 0,1                                   | 0,5                          | 0,5                              |
|                 | Pb1       | −3,6                                  | −314,6                       | 314,6                            |
|                 | Pb2       | 0,0                                   | 2,9                          | 2,9                              |
|                 | T°        | 0,0                                   | 3,4                          | 3,4                              |
|                 | RPM       | 0,0                                   | 0,1                          | 0,1                              |
|                 | Pot_MB2   | 0,1                                   | 5,0                          | 5,0                              |
| 23 %            | Qg        | 0,1                                   | 0,5                          | 0,5                              |
|                 | Pb1       | −1,8                                  | −127,1                       | 127,1                            |
|                 | Pb2       | 0,0                                   | 2,9                          | 2,9                              |
|                 | T°        | 0,0                                   | 3,4                          | 3,4                              |
|                 | RPM       | 0,0                                   | 0,1                          | 0,1                              |
|                 | Pot_MB2   | 0,1                                   | 5,0                          | 5,0                              |
| 29 %            | Qg        | 0,1                                   | 0,5                          | 0,5                              |
|                 | Pb1       | −2,0                                  | −66,7                        | 66,8                             |
|                 | Pb2       | 0,0                                   | 3,0                          | 3,0                              |
|                 | T°        | 0,0                                   | 3,4                          | 3,4                              |
|                 | RPM       | 0,0                                   | 0,1                          | 0,1                              |
|                 | Pot_MB2   | 0,1                                   | 5,0                          | 5,0                              |
| 34 %            | Qg        | 0,0                                   | 0,5                          | 0,5                              |
|                 | Pb1       | −0,7                                  | −44,4                        | 44,4                             |
|                 | Pb2       | 0,0                                   | 3,1                          | 3,1                              |
|                 | T°        | 0,0                                   | 3,4                          | 3,4                              |
|                 | RPM       | 0,0                                   | 0,1                          | 0,1                              |
|                 | Pot_MB2   | 0,1                                   | 5,0                          | 5,0                              |

(Continúa en la página siguiente...)

Tabla A.13: (Continuación)

| Apertura<br>( % ) | Parámetro | Relativo (Aleatorio)<br>( $e_R$ ) ( % ) | Sistemático<br>( $e_S$ ) ( % ) | General (Total)<br>( $u_G$ ) ( % ) |
|-------------------|-----------|-----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 43 %              | Qg        | 0,0                                     | 0,5                            | 0,5                                |
|                   | Pb1       | -0,4                                    | -29,3                          | 29,3                               |
|                   | Pb2       | 0,0                                     | 3,4                            | 3,4                                |
|                   | T°        | 0,0                                     | 3,4                            | 3,4                                |
|                   | RPM       | 0,0                                     | 0,1                            | 0,1                                |
|                   | Pot_MB2   | 0,1                                     | 5,0                            | 5,0                                |
| 100 %             | Qg        | 0,0                                     | 0,5                            | 0,5                                |
|                   | Pb1       | -0,3                                    | -21,4                          | 21,4                               |
|                   | Pb2       | 0,0                                     | 3,9                            | 3,9                                |
|                   | T°        | 0,0                                     | 3,4                            | 3,4                                |
|                   | RPM       | 0,0                                     | 0,1                            | 0,1                                |
|                   | Pot_MB2   | 0,1                                     | 5,0                            | 5,0                                |

Nota: Las incertidumbres fue calculada como se menciona en la metodología

Tabla A.14: Resultados de Altura Manométrica ( $H$ ) y Eficiencia ( $\eta$ ) con sus incertidumbres propagadas para la bomba 2.

| Apertura<br>( % ) | $H_{prom}$<br>(m) | $u(H)$<br>(m) | $\eta_{prom}$<br>( % ) | $u(\eta)$<br>( % ) |
|-------------------|-------------------|---------------|------------------------|--------------------|
| 0 %               | 36,47             | 1,31          | 0,0                    | 21,0               |
| 16 %              | 36,16             | 1,31          | 15                     | 6,2                |
| 23 %              | 36,09             | 1,31          | 27                     | 6,2                |
| 29 %              | 35,94             | 1,31          | 35                     | 6,2                |
| 34 %              | 35,12             | 1,31          | 40                     | 6,3                |
| 43 %              | 33,42             | 1,31          | 44                     | 6,4                |
| 100 %             | 31,27             | 1,31          | 45                     | 6,5                |

Nota:  $u(H)$  y  $u(\eta)$  son las incertidumbres generales absolutas propagadas.

## A.5. Curva del sistema

### A.5.1. Curva del sistema empírica

Tabla A.15: Datos Empíricos de la Curva del Sistema (Ensayo Bomba 1).

| <b>Caudal (<math>Q</math>)</b><br>( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) | <b>Altura del Sistema (<math>H_{sis}</math>)</b><br>(m) |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 0,0                                                              | 0,0                                                     |
| 3,5                                                              | 1,3                                                     |
| 7,1                                                              | 3,7                                                     |
| 11,2                                                             | 8,3                                                     |
| 14,7                                                             | 14,0                                                    |
| 18,3                                                             | 21,0                                                    |
| 22,0                                                             | 29,7                                                    |

Tabla A.16: Datos Empíricos de la Curva del Sistema (Ensayo Bomba 2).

| <b>Caudal (<math>Q</math>)</b><br>( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) | <b>Altura del Sistema (<math>H_{sis}</math>)</b><br>(m) |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 0,0                                                              | 0,0                                                     |
| 3,6                                                              | 1,7                                                     |
| 7,1                                                              | 4,1                                                     |
| 11,2                                                             | 8,9                                                     |
| 14,8                                                             | 14,7                                                    |
| 18,4                                                             | 21,9                                                    |
| 22,1                                                             | 30,8                                                    |

### A.5.2. Curva del Sistema Teórica

Tabla A.17: Parámetros para el Cálculo de la Curva Teórica del Sistema.

| Categoría                                    | Parámetro                                        | Valor                 |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|
| Propiedades del Fluido                       | Densidad ( $\rho$ )                              | 999,1                 |
|                                              | (Agua a 14.6 °C)                                 | (kg m <sup>-3</sup> ) |
|                                              | Viscosidad dinámica ( $\mu$ )                    | 0,001 14<br>(Pa*s)    |
| Propiedad de Tubería                         | Rugosidad tubería de cobre Tipo L                | 0,0015<br>(mm)        |
|                                              | Rugosidad tubería de acero galvanizado           | 0,15<br>(mm)          |
| Pérdidas por accesorios ( $K_{accesorios}$ ) | Válvula de bola                                  | 0,1                   |
|                                              | Válvula de globo                                 | 10,0                  |
|                                              | Entrada estanque                                 | 0,5                   |
|                                              | Salida estanque                                  | 1                     |
|                                              | Codos 90°                                        | 0,9                   |
|                                              | T en línea                                       | 0,2                   |
|                                              | T derivada                                       | 1                     |
|                                              | Difusor                                          | 0,2                   |
|                                              | Estrangulación                                   | 0,5                   |
| Pérdidas Mayores                             | Coef. de Fricción ( $f$ )<br>(Diagrama de Moody) | Calculado             |

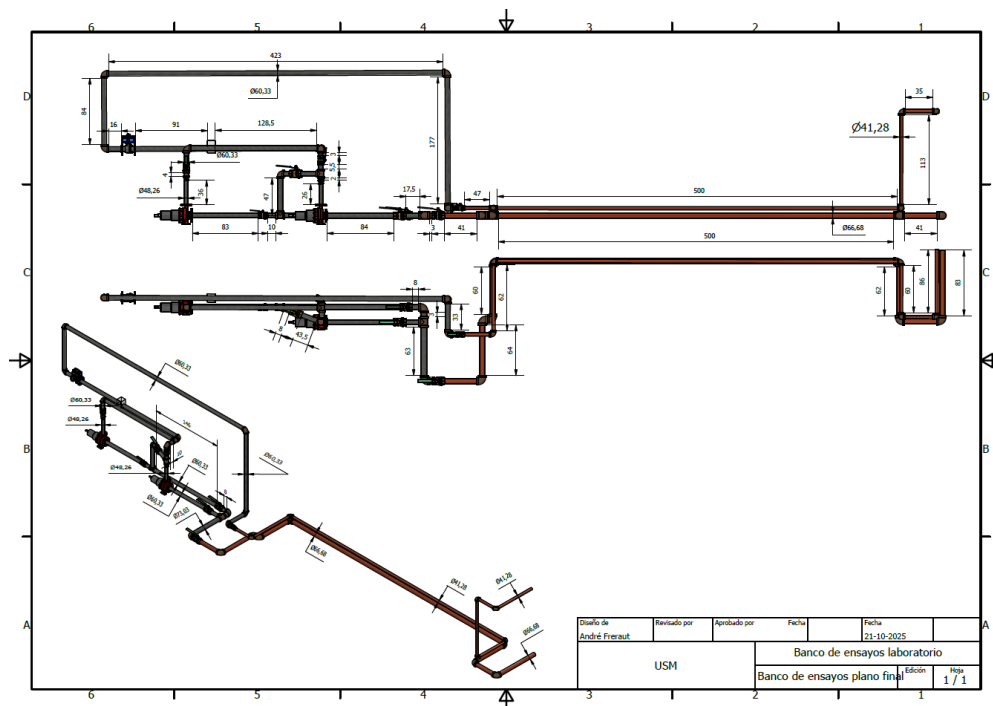


Figura A.6: Banco de pruebas de bombas centrífugas del Laboratorio de Termofluidos, UTFSM, Diseñado en software Inventor.

## A.6. Instrumentos

### A.6.1. Curva de bomba

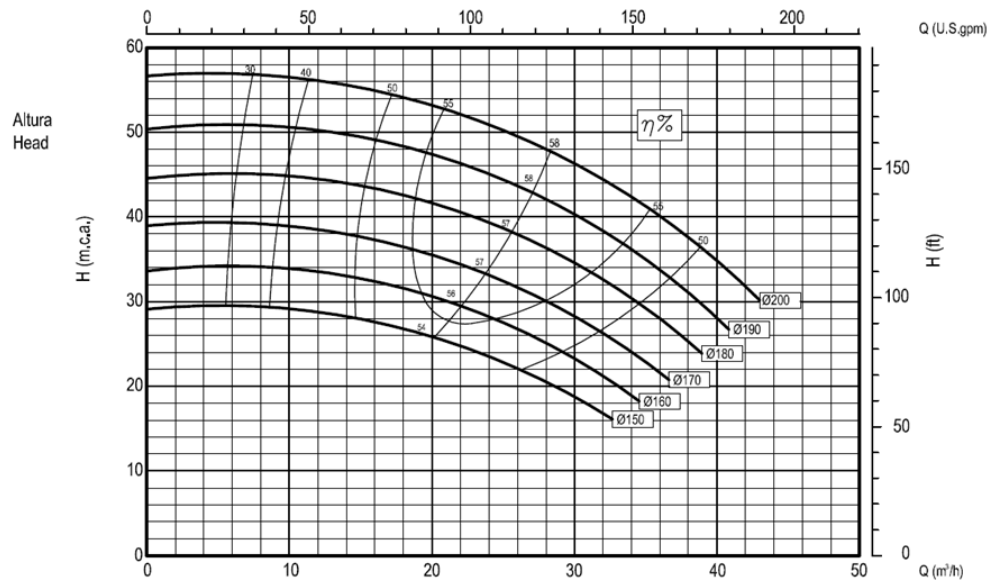


Figura A.7: Curva de altura junto a eficiencia en función del caudal entregada por el fabricante.

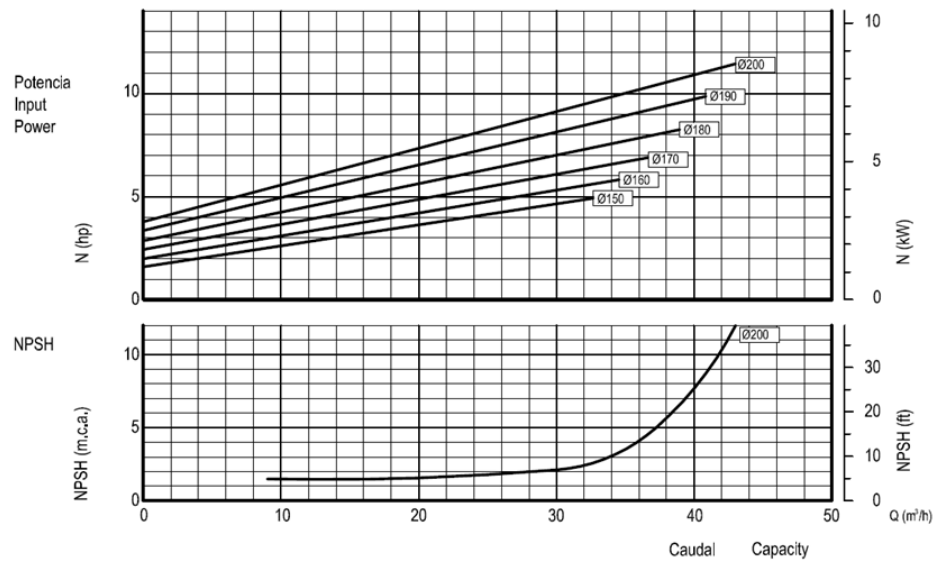


Figura A.8: Curva de potencia y NPSH en función del caudal entregada por el fabricante.

## A.6.2. Motor eléctrico

|                       |                                                                                                                               |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eficiencia ( $\eta$ ) | -0,15 (1- $\eta$ ) para $P_{nom} \leq 150$ kW<br>-0,1 (1- $\eta$ ) para $P_{nom} > 150$ kW<br>Siendo $\eta$ un numero decimal |
| Factor de potencia    | $\frac{1 - \cos \emptyset}{6}$<br>Como mínimo 0,02 y máximo 0,07                                                              |
| Deslizamiento         | $\pm 20\%$ para $P_{nom} \geq 1$ kW and $\pm 30\%$ para $P_{nom} < 1$ kW                                                      |
| Corriente de arranque | 20% (sin límite inferior)                                                                                                     |
| Par de arranque       | - 15% + 25%                                                                                                                   |
| Par máximo            | - 10 %                                                                                                                        |
| Momento de inercia    | $\pm 10\%$                                                                                                                    |

Figura A.9: Tolerancias motor eléctrico WEG.

| Potencia                    |      | Carcasa | Full Load Torque (Kgfm) | Corriente con rotor trabado I/In | Par con rotor trabado T/Trn | Break-down Torque T/Trn | Momento de Inercia J (Kg·m²) | Tiempo máximo con rotor trabado (s) |      | Peso (kg) | Nivel de ruido dB (A) | 400V                     |      |                    |      |      |      | Corriente nominal In (A) |      |
|-----------------------------|------|---------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------|-----------|-----------------------|--------------------------|------|--------------------|------|------|------|--------------------------|------|
|                             |      |         |                         |                                  |                             |                         |                              |                                     |      |           |                       | % de la potencia nominal |      |                    |      |      |      |                          |      |
|                             |      |         |                         |                                  |                             |                         |                              |                                     |      |           |                       | Rendimiento              |      | Factor de potencia |      |      |      |                          |      |
| KW                          | HP   |         |                         |                                  |                             |                         |                              | Caliente                            | Frio |           |                       | 50                       | 75   | 100                | 50   | 75   | 100  |                          |      |
| II Poleo High-output design |      |         |                         |                                  |                             |                         |                              |                                     |      |           |                       |                          |      |                    |      |      |      |                          |      |
| 0,37                        | 0,5  | 53      | 0,132                   | 5,0                              | 2,2                         | 2,2                     | 0,0062                       | 7                                   | 15   | 7,2       | 52                    | 2740                     | 60,0 | 62,0               | 64,0 | 0,58 | 0,73 | 0,80                     | 1,04 |
| 0,55                        | 0,75 | 80      | 0,194                   | 5,1                              | 2,5                         | 2,6                     | 0,0064                       | 21                                  | 46   | 8,0       | 59                    | 2755                     | 64,5 | 66,5               | 69,0 | 0,60 | 0,74 | 0,83                     | 1,39 |
| 0,75                        | 1    | 71      | 0,267                   | 5,5                              | 2,8                         | 2,8                     | 0,0065                       | 12                                  | 26   | 9,0       | 56                    | 2740                     | 71,0 | 72,0               | 72,1 | 0,70 | 0,82 | 0,89                     | 1,69 |
| 0,75                        | 1    | 90S     | 0,257                   | 6,3                              | 2,7                         | 2,7                     | 0,0012                       | 15                                  | 33   | 26,0      | 64                    | 2840                     | 74,2 | 76,2               | 76,2 | 0,63 | 0,76 | 0,82                     | 1,73 |
| 1,1                         | 1,5  | 90S     | 0,372                   | 6,3                              | 2,7                         | 2,6                     | 0,0015                       | 7                                   | 15   | 15,0      | 64                    | 2880                     | 74,5 | 76,5               | 76,5 | 0,63 | 0,76 | 0,83                     | 2,50 |
| 1,5                         | 2    | 80      | 0,532                   | 5,5                              | 2,8                         | 2,7                     | 0,0060                       | 15                                  | 33   | 15,0      | 59                    | 2745                     | 76,0 | 77,0               | 77,2 | 0,71 | 0,82 | 0,87                     | 3,22 |
| 1,5                         | 2    | 90L     | 0,511                   | 6,3                              | 2,7                         | 2,6                     | 0,0020                       | 7                                   | 15   | 19,5      | 64                    | 2860                     | 77,5 | 78,0               | 78,5 | 0,63 | 0,76 | 0,83                     | 3,32 |
| 2,2                         | 3    | 100L    | 0,749                   | 7,5                              | 2,2                         | 2,7                     | 0,0063                       | 13                                  | 29   | 27,0      | 67                    | 2860                     | 81,0 | 81,5               | 81,5 | 0,73 | 0,83 | 0,88                     | 4,33 |
| 2,2                         | 3    | 90S     | 0,763                   | 6,8                              | 2,8                         | 2,9                     | 0,0021                       | 9                                   | 20   | 16,7      | 64                    | 2810                     | 81,0 | 81,5               | 81,5 | 0,63 | 0,77 | 0,85                     | 4,58 |
| 3                           | 4    | 112M    | 1,02                    | 7,2                              | 2,4                         | 2,8                     | 0,0063                       | 20                                  | 44   | 37,0      | 64                    | 2875                     | 83,0 | 83,5               | 83,5 | 0,75 | 0,84 | 0,89                     | 5,83 |
| 3                           | 4    | 90L     | 1,04                    | 6,0                              | 3,4                         | 3                       | 0,0025                       | 7                                   | 15   | 23,5      | 64                    | 2820                     | 81,0 | 81,5               | 81,5 | 0,57 | 0,71 | 0,80                     | 6,64 |
| 4                           | 5,5  | 100L    | 1,35                    | 8,4                              | 3,2                         | 3,4                     | 0,0064                       | 8                                   | 18   | 37,0      | 67                    | 2885                     | 83,0 | 84,0               | 83,5 | 0,69 | 0,81 | 0,87                     | 7,95 |
| 4                           | 5,5  | 132S    | 1,34                    | 6,5                              | 2,3                         | 2,8                     | 0,0187                       | 13                                  | 29   | 61,0      | 68                    | 2910                     | 83,0 | 84,0               | 84,0 | 0,67 | 0,78 | 0,85                     | 8,09 |
| 5,5                         | 7,5  | 112M    | 1,87                    | 7,7                              | 2,5                         | 3                       | 0,0094                       | 10                                  | 22   | 40,0      | 64                    | 2870                     | 85,5 | 86,0               | 86,0 | 0,79 | 0,86 | 0,89                     | 10,3 |
| 5,5                         | 7,5  | 132M    | 1,84                    | 6,5                              | 2,4                         | 3                       | 0,0180                       | 11                                  | 24   | 42,0      | 68                    | 2910                     | 85,0 | 86,0               | 86,0 | 0,71 | 0,81 | 0,87                     | 10,6 |
| 7,5                         | 10   | 112M    | 2,54                    | 7,2                              | 3,1                         | 3,2                     | 0,0094                       | 8                                   | 18   | 42,0      | 64                    | 2875                     | 85,5 | 86,5               | 86,5 | 0,64 | 0,77 | 0,84                     | 14,9 |
| 7,5                         | 10   | 132M    | 2,52                    | 6,4                              | 2,3                         | 2,6                     | 0,0234                       | 11                                  | 24   | 65,0      | 68                    | 2900                     | 85,5 | 86,5               | 86,5 | 0,72 | 0,82 | 0,87                     | 14,4 |
| 9,2                         | 12,5 | 150M    | 3,05                    | 6,6                              | 1,8                         | 2,5                     | 0,0335                       | 13                                  | 29   | 93,0      | 67                    | 2925                     | 87,5 | 88,1               | 88,0 | 0,73 | 0,83 | 0,87                     | 17,3 |
| 11                          | 15   | 132M    | 3,65                    | 8,0                              | 3                           | 3,4                     | 0,0270                       | 8                                   | 18   | 74,0      | 68                    | 2925                     | 87,5 | 89,3               | 89,3 | 0,67 | 0,79 | 0,85                     | 20,9 |
| 15                          | 20   | 160L    | 4,99                    | 7,2                              | 2,2                         | 2,8                     | 0,0517                       | 9                                   | 20   | 108       | 67                    | 2930                     | 89,5 | 89,8               | 89,5 | 0,71 | 0,81 | 0,86                     | 28,1 |
| 22                          | 30   | 160L    | 7,29                    | 7,8                              | 2,5                         | 3,3                     | 0,0880                       | 7                                   | 15   | 140       | 67                    | 2940                     | 90,5 | 91,0               | 91,0 | 0,73 | 0,82 | 0,87                     | 40,1 |
| 22                          | 30   | 180L    | 7,25                    | 7,3                              | 2,2                         | 3,1                     | 0,1084                       | 7                                   | 15   | 156       | 67                    | 2950                     | 90,7 | 91,0               | 90,8 | 0,76 | 0,84 | 0,88                     | 39,7 |
| 30                          | 40   | 180L    | 9,94                    | 8,2                              | 2,2                         | 2,9                     | 0,1301                       | 8                                   | 18   | 194       | 76                    | 2940                     | 91,5 | 91,8               | 91,5 | 0,78 | 0,86 | 0,89                     | 52,9 |
| 30                          | 40   | 200M    | 9,89                    | 6,9                              | 2,5                         | 2,7                     | 0,1526                       | 18                                  | 40   | 220       | 72                    | 2965                     | 91,6 | 92,0               | 91,6 | 0,76 | 0,84 | 0,87                     | 54,3 |
| 37                          | 50   | 200M    | 12,2                    | 6,7                              | 2,6                         | 2,6                     | 0,1960                       | 16                                  | 35   | 232       | 72                    | 2965                     | 92,0 | 92,5               | 92,0 | 0,76 | 0,84 | 0,87                     | 66,7 |
| 45                          | 60   | 200L    | 14,8                    | 7,0                              | 2,3                         | 2,5                     | 0,2264                       | 13                                  | 29   | 272       | 72                    | 2965                     | 92,3 | 92,6               | 92,5 | 0,77 | 0,85 | 0,88                     | 79,8 |
| 55                          | 75   | 225S/M  | 18,1                    | 7,2                              | 2,1                         | 2,7                     | 0,3238                       | 9                                   | 20   | 394       | 75                    | 2960                     | 92,2 | 93,0               | 92,8 | 0,81 | 0,87 | 0,89                     | 96,1 |
| 75                          | 100  | 250S/M  | 24,5                    | 7,8                              | 2,5                         | 3                       | 0,4924                       | 9                                   | 20   | 457       | 75                    | 2965                     | 93,0 | 93,5               | 93,0 | 0,78 | 0,86 | 0,89                     | 130  |
| 110                         | 150  | 280S/M  | 35,0                    | 7,0                              | 2                           | 2,8                     | 1,10                         | 20                                  | 44   | 702       | 77                    | 2975                     | 93,5 | 94,2               | 94,0 | 0,79 | 0,86 | 0,89                     | 190  |
| 132                         | 180  | 280S/M  | 43,2                    | 7,2                              | 1,9                         | 2,7                     | 1,33                         | 16                                  | 35   | 759       | 77                    | 2975                     | 94,0 | 94,3               | 94,3 | 0,81 | 0,86 | 0,89                     | 227  |
| 132                         | 180  | 280S/M  | 43,2                    | 7,2                              | 1,9                         | 2,7                     | 1,33                         | 16                                  | 35   | 759       | 77                    | 2975                     | 94,0 | 94,3               | 94,3 | 0,81 | 0,86 | 0,89                     | 227  |
| 200                         | 270  | 315S/M  | 65,4                    | 7,7                              | 2,1                         | 2,8                     | 2,46                         | 17                                  | 37   | 1135      | 77                    | 2980                     | 94,4 | 94,7               | 94,6 | 0,80 | 0,87 | 0,90                     | 339  |
| 200                         | 270  | 355M/L  | 65,3                    | 7,4                              | 1,7                         | 2,7                     | 3,56                         | 29                                  | 62   | 1430      | 80                    | 2985                     | 94,5 | 94,8               | 94,7 | 0,82 | 0,87 | 0,89                     | 343  |
| 220                         | 300  | 355M/L  | 71,8                    | 7,7                              | 1,8                         | 2,8                     | 4,09                         | 20                                  | 44   | 1496      | 80                    | 2985                     | 94,5 | 94,8               | 94,7 | 0,83 | 0,88 | 0,90                     | 373  |
| 250                         | 340  | 355M/L  | 81,5                    | 7,9                              | 2,1                         | 2,8                     | 4,53                         | 20                                  | 44   | 1592      | 80                    | 2985                     | 94,5 | 94,8               | 94,7 | 0,86 | 0,88 | 0,90                     | 423  |
| 250                         | 350  | 355M/L  | 85,0                    | 7,8                              | 2,3                         | 2,6                     | 4,85                         | 20                                  | 44   | 1665      | 80                    | 2980                     | 94,5 | 94,8               | 94,8 | 0,89 | 0,92 | 0,93                     | 426  |
| 280                         | 380  | 355M/L  | 91,5                    | 7,6                              | 2                           | 2,6                     | 5,06                         | 17                                  | 37   | 1663      | 80                    | 2980                     | 94,5 | 94,9               | 94,8 | 0,85 | 0,90 | 0,91                     | 468  |
| 300                         | 400  | 355M/L  | 97,3                    | 8,5                              | 2,5                         | 2,7                     | 5,59                         | 22                                  | 48   | 1770      | 80                    | 2985                     | 94,5 | 94,8               | 94,8 | 0,87 | 0,90 | 0,91                     | 502  |

Figura A.10: Características eléctricas motor WEG 112M.

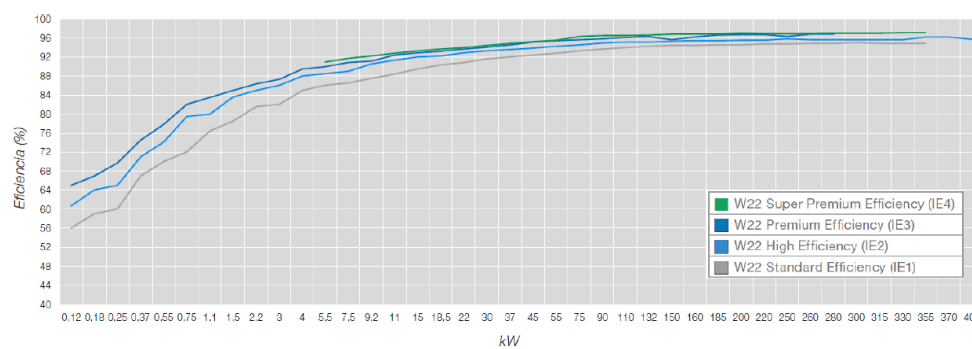


Figura A.11: Eficiencia motor eléctrico en función de la potencia a condiciones nominales.

### A.6.3. Sensor Wika S10

| Datos técnicos                                                    |            | Modelo S-10 / S-11                                                                                                        |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|-------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------|-----|-----|------|--------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----|--|
| Rango de medición                                                 | bar        | 0.1                                                                                                                       | 0.16                                                    | 0.25 | 0.4 | 0.6 | 1    | 1.6                                        | 2.5                | 4                  | 6                  | 10 |  |
| Límite de sobrecarga                                              | bar        | 1                                                                                                                         | 1.5                                                     | 2    | 2   | 4   | 5    | 10                                         | 10                 | 17                 | 35                 | 35 |  |
| Presión de rotura                                                 | bar        | 2                                                                                                                         | 2                                                       | 2.4  | 2.4 | 4.8 | 6    | 12                                         | 12                 | 20.5               | 42                 | 42 |  |
| Rango de medición                                                 | bar        | 16                                                                                                                        | 25                                                      | 40   | 60  | 100 | 160  | 250                                        | 400                | 600                | 1000 <sup>1)</sup> |    |  |
| Límite de sobrecarga                                              | bar        | 80                                                                                                                        | 50                                                      | 80   | 120 | 200 | 320  | 500                                        | 800                | 1200               | 1500               |    |  |
| Presión de rotura                                                 | bar        | 96                                                                                                                        | 96                                                      | 400  | 550 | 800 | 1000 | 1200                                       | 1700 <sup>2)</sup> | 2400 <sup>2)</sup> | 3000               |    |  |
| [Vacio, rangos compuestos +/-, presión absoluta]                  |            |                                                                                                                           |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Material                                                          |            |                                                                                                                           |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| ■ Piezas en contacto con el medio                                 |            | Acero inoxidable (para otros materiales consultar programa de sellos separadores)                                         |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| ➤ Modelo S-10                                                     |            | Acero inoxidable                                                                                                          |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| ➤ Modelo S-11                                                     |            | Acero inoxidable (Hastelloy C4)                                                                                           |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | Junta tórica: NBR <sup>3)</sup> (Viton o EPDM)                                                                            |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| ■ Carcasa                                                         |            | Acero inoxidable                                                                                                          |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Líquido interno de transmisión                                    |            | Aceite sintético,                                                                                                         |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | Solamente para rangos hasta 0 ... 25 bar o para S-11 (membrana afluente)                                                  |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | (Halocarbono para versiones de oxígeno) <sup>4)</sup>                                                                     |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | [Listado en FDA para industria alimenticia]                                                                               |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Energía auxiliar U <sub>B</sub>                                   | DC V       | 10 < U <sub>B</sub> ≤ 30 (14 ... 30 con señal de salida 0 ... 10 V)                                                       |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Señal de salida v                                                 |            | 4 ... 20 mA, 2-hilos R <sub>A</sub> ≤ (U <sub>B</sub> - 10 V) / 0.02 A con R <sub>A</sub> en Ohm y U <sub>B</sub> en Volt |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Carga máxima admisible R <sub>A</sub>                             |            | 0 ... 20 mA, 3-hilos R <sub>A</sub> ≤ (U <sub>B</sub> - 3 V) / 0.02 A con R <sub>A</sub> en Ohm y U <sub>B</sub> en Volt  |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | (0 ... 5 V, 3-hilos) R <sub>A</sub> > 5 kOhm                                                                              |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | (0 ... 10 V, 3-hilos) R <sub>A</sub> > 10 kOhm [otras señales de salida a petición]                                       |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Posibilidad de ajuste cero/span                                   | %          | ± 10 mediante potenciómetros dentro del equipo                                                                            |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Tiempo de respuesta <sup>5)</sup> (10 ... 90 %)                   | ms         | ≤ 1 (≤ 10 ms con temperaturas por debajo de -30 °C para rangos hasta 25 bar o con membrana afluente)                      |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Precisión <sup>5)</sup>                                           | % del span | ≤ 0.5 (0.25) <sup>6)</sup> (ajuste del punto límite)                                                                      |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   | % del span | ≤ 0.25 (0.125) <sup>6)</sup> (BFSI)                                                                                       |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Histéresis                                                        | % del span | ≤ 0.1                                                                                                                     |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Repetibilidad                                                     | % del span | ≤ 0.05                                                                                                                    |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Estabilidad al año                                                | % del span | ≤ 0.2 (con condiciones de referencia)                                                                                     |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Permissible temperature of                                        |            |                                                                                                                           |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| ■ Medio                                                           |            | -30 ... +100 °C [-40 ... +125 °C]                                                                                         |                                                         |      |     |     |      | -22 ... +212 °F [-40 ... +257 °F]          |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | S-11 elemento refrigeración -20 ... +150 °C                                                                               |                                                         |      |     |     |      | S-11 elemento refrigeración -4 ... +302 °F |                    |                    |                    |    |  |
| ■ Entorno                                                         |            | -20 ... +80 °C                                                                                                            |                                                         |      |     |     |      | -4 ... +176 °F                             |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | S-11 elemento refrigeración -20 ... +80 °C                                                                                |                                                         |      |     |     |      | S-11 elemento refrigeración -4 ... +176 °F |                    |                    |                    |    |  |
| ■ Almacenamiento                                                  |            | -40 ... +100 °C                                                                                                           |                                                         |      |     |     |      | -40 ... +212 °F                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | S-11 elemento refrigeración -20 ... +100 °C                                                                               |                                                         |      |     |     |      | S-11 elemento refrigeración -4 ... +212 °F |                    |                    |                    |    |  |
| Rango de temperatura compensado                                   |            | 0 ... +80 °C                                                                                                              |                                                         |      |     |     |      | 32 ... +176 °F                             |                    |                    |                    |    |  |
| Coeficientes de temperatura en el rango de temperatura compensado |            |                                                                                                                           |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| ■ CT medio del punto cero                                         |            | % del span                                                                                                                | ≤ 0.2 / 10 K (< 0.4 para rangos de medición < 250 mbar) |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| ■ CT medio del span                                               |            | % del span                                                                                                                | ≤ 0.2 / 10 K                                            |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| CE-Indicativo                                                     |            | 89/336/EEG emisión perturbaciones y resistencia a interferencias ver EN 61 326                                            |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   |            | 97/23/EG Directiva para aparatos de presión, (Módulo H)                                                                   |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Resistencia a choques                                             | α          | 1000 conforme a IEC 60068-2-27 (impacto mecánico)                                                                         |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Resistencia a vibraciones                                         | α          | 20 conforme a IEC 60068-2-6 (vibración con resonancia)                                                                    |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Protección eléctrica                                              |            | Protección contra polaridad inversa, sobretensión y cortocircuito                                                         |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Clase de protección                                               |            | Conforme a IEC 60529 / EN 60529, ver página 3                                                                             |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
| Peso                                                              |            | kg                                                                                                                        | Aprox. 0.2                                              |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |
|                                                                   | kg         | Aprox. 0.3 con opción precisión 0.25% del span debido a la carcasa más alta                                               |                                                         |      |     |     |      |                                            |                    |                    |                    |    |  |

Figura A.12: Ficha técnica sensor de presión Wika S10.

#### A.6.4. Sensor MBS 1750

|                                                               |                                          |         |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------|
| Precisión (incluye no linealidad, histéresis y repetibilidad) | $\leq \pm 0,5 \% \text{ FS (típ.)}$      |         |
|                                                               | $\leq \pm 1,0 \% \text{ FS (máx.)}$      |         |
| No linealidad, BFSL (conformidad)                             | $\leq \pm 0,2 \% \text{ FS}$             |         |
| Histéresis y repetibilidad                                    | $\leq \pm 0,1 \% \text{ FS}$             |         |
| Desplazamiento del punto cero térmico                         | $\leq \pm 0,1 \% \text{ FS/10 K (típ.)}$ |         |
|                                                               | $\leq \pm 0,2 \% \text{ FS/10 K (máx.)}$ |         |
| Desplazamiento de la sensibilidad térmica (intervalo térmico) | $\leq \pm 0,1 \% \text{ FS/10 K (típ.)}$ |         |
|                                                               | $\leq \pm 0,2 \% \text{ FS/10 K (máx.)}$ |         |
| Tiempo de respuesta                                           | < 4 ms                                   |         |
|                                                               | Aire y gases (MBS 1750)                  | < 35 ms |
| Presión de sobrecarga (estática)                              | 6 x FS (1500 bar, máx.)                  |         |
| Presión de rotura                                             | 6 x FS (2000 bar, máx.)                  |         |
| Durabilidad, P: 10 – 90 % FS                                  | > 10 x 10 <sup>6</sup> ciclos            |         |

##### Especificaciones eléctricas

|                                                                    |                                                               |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Señal de salida nom. (con protección contra cortocircuito)         | 4 – 20 mA                                                     |
| Tensión de alimentación [U <sub>B</sub> ], con polaridad protegida | 9 – 32 V c.c.                                                 |
| Alimentación (consumo de corriente)                                | –                                                             |
| Dependencia de la tensión de alimentación                          | $\leq \pm 0,1 \% \text{ FS/10 V}$                             |
| Límite de corriente                                                | 28 mA (típ.)                                                  |
| Impedancia de salida                                               | –                                                             |
| Carga [R <sub>L</sub> ] (conectada a 0 V)                          | $R_L \leq (U_B - 9 \text{ V})/0,02 \text{ A [}\Omega\text{]}$ |

Figura A.13: Ficha técnica sensor MBS 1750.

#### A.6.5. Tacómetro DT-2236

| Modo de Medición                          | Rango                                                                         | Resolución                                                             |                          |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Foto Tacómetro                            | 5 a 99.999 rpm                                                                | 0,1 RPM (0,5 a 999,9 rpm) y 1 rpm (sobre 1000 rpm)                     |                          |
| Tacómetro Contacto                        | 0,5 a 19.999 rpm                                                              | 0,1 RPM (0,5 a 999,9 rpm) y 1 rpm (sobre 1000 rpm)                     |                          |
| Velocidad Superficial                     | 0,05 a 1.999,9 m/min                                                          | 0,01 m/min (0,05 a 99,99 m/min) y 0,1 m/min (sobre 100 m/min)          |                          |
| Velocidad Superficial                     | 0,2 a 6.560 pies/min                                                          | 0,1 pies/min (0,1 a 999,9 pies/min) y 1 pies/min (sobre 1000 pies/min) |                          |
|                                           |                                                                               |                                                                        |                          |
|                                           |                                                                               |                                                                        |                          |
| Display                                   | Cristal líquido de 5 dígitos de 0,4" de alto, reversible.                     | Batería                                                                | 4 pilas tipo AA de 1,5 V |
|                                           |                                                                               | Temperatura de Operación                                               | 0 a 50° C                |
| Exactitud                                 | ±(0,05% + 1 dígito)                                                           | Dimensiones                                                            | 215 x 65 x 38 mm         |
| Tiempo de muestreo                        | Sin contacto: 1 segundo sobre 60 rpm.<br>Con contacto: 1 segundo sobre 6 rpm. | Memorias                                                               | Último valor leído       |
|                                           |                                                                               |                                                                        | Máximo valor leído       |
|                                           |                                                                               |                                                                        | Mínimo valor leído       |
| Foto Tacómetro:<br>Distancia de detección | 50 a 150 mm típico<br>Máximo 300 mm, según luminosidad ambiente               |                                                                        |                          |

Figura A.14: Ficha técnica tacómetro DT-2236

## A.6.6. Caudalímetro

|                        |                                                                |
|------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Precisión de medida    | 0,4 % ± 1 mm/s                                                 |
| Salidas                | 1 salida de intensidad<br>1 salida digital<br>1 salida de relé |
| Comunicación           | HART                                                           |
| Pantalla               | Retroiluminación con texto alfanumérico, 3 x 20 caracteres     |
| Grados de protección   | IP67 (NEMA 4x/5)<br>IP20 (NEMA 2)                              |
| Fuente de alimentación | 12-24 V AC/DC<br>115-230 V AC                                  |
| Temperatura ambiente   | De -20 a 50 °C (de -4 a 122 °F)                                |
| Homologaciones         | MI-001<br>Danak<br>PTB<br>OIML R49                             |
| Homologaciones Ex      | FM/CSA Class 1, Div 2                                          |

Figura A.15: Ficha técnica sensor y transmisor de caudal Sitrans F.M MAG 5000.

## A.6.7. PLC

| Datos técnicos                           |                                             |                                           |                                             |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                          | 6ES7 215-1BG31-0XB0<br>CPU 1215C AC/DC/relé | 6ES7 215-1AG31-0XB0<br>CPU 1215C DC/DC/DC | 6ES7 215-1HG31-0XB0<br>CPU 1215C DC/DC/relé |
| <b>Información general</b>               |                                             |                                           |                                             |
| Ingeniería con                           |                                             |                                           |                                             |
| • Paquete de programación                | STEP 7 V11.0 SP2 o superior                 | STEP 7 V11.0 SP2 o superior               | STEP 7 V11.0 SP2 o superior                 |
| <b>Tensión de alimentación</b>           |                                             |                                           |                                             |
| 24 V DC                                  |                                             | SI                                        | SI                                          |
| 120 V AC                                 | SI                                          |                                           |                                             |
| 230 V AC                                 | SI                                          |                                           |                                             |
| <b>Pérdidas</b>                          |                                             |                                           |                                             |
| Pérdidas, tip.                           | 12 W                                        | 12 W                                      | 12 W                                        |
| <b>Memoria</b>                           |                                             |                                           |                                             |
| Memoria de trabajo                       |                                             |                                           |                                             |
| • Integrada                              | 100 kbyte                                   | 100 kbyte                                 | 100 kbyte                                   |
| Memoria de carga                         |                                             |                                           |                                             |
| • Integrada                              | 4 Mbyte                                     | 4 Mbyte                                   | 4 Mbyte                                     |
| Respaldo                                 |                                             |                                           |                                             |
| • sin pila                               | SI                                          | SI                                        | SI                                          |
| <b>Tiempos de ejecución de la CPU</b>    |                                             |                                           |                                             |
| para operaciones de bits, tip.           | 0,085 µs; /instrucción                      | 0,085 µs; /instrucción                    | 0,085 µs; /instrucción                      |
| para operaciones de palabras, tip.       | 1,7 µs; /instrucción                        | 1,7 µs; /instrucción                      | 1,7 µs; /instrucción                        |
| para aritmética en coma flotante, tip.   | 2,5 µs; /instrucción                        | 2,5 µs; /instrucción                      | 2,5 µs; /instrucción                        |
| <b>Áreas de datos y su retención</b>     |                                             |                                           |                                             |
| Marcas                                   |                                             |                                           |                                             |
| • Cantidad, máx.                         | 8 kbyte; Tamaño del área de marcas          | 8 kbyte; Tamaño del área de marcas        | 8 kbyte; Tamaño del área de marcas          |
| <b>Área de direcciones</b>               |                                             |                                           |                                             |
| Imagen del proceso                       |                                             |                                           |                                             |
| • Entradas, configurables                | 1 kbyte                                     | 1 kbyte                                   | 1 kbyte                                     |
| • Salidas, configurables                 | 1 kbyte                                     | 1 kbyte                                   | 1 kbyte                                     |
| <b>Hora</b>                              |                                             |                                           |                                             |
| Reloj                                    |                                             |                                           |                                             |
| • Reloj por hardware (reloj tiempo real) | SI                                          | SI                                        | SI                                          |

Figura A.16: Ficha técnica PLC Siemens CPU 1215 DC/DC/relé.

## A.6.8. VDF

| Característica                                                 | Datos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alimentación de 24 V                                           | Existen dos posibilidades para la alimentación de 24 V: <ul style="list-style-type: none"> <li>• El convertidor genera su alimentación de 24 V a partir de la tensión de red</li> <li>• El convertidor recibe su alimentación de 24 V a través de los bornes 31 y 32 con 20,4 V ... 28,8 V DC.</li> </ul> Consumo típico: 0,5 A                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Tensiones de salida                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 V (máx. 100 mA)</li> <li>• 10 V <math>\pm</math> 0,5 V (máx. 10 mA)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Resolución de consigna                                         | 0,01 Hz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Entradas digitales                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 entradas digitales, DI 0 ... DI 5, con aislamiento galvánico</li> <li>• Tensión: <math>\leq</math> 30 V</li> <li>• Tensión para el estado "low": <math>&lt;</math> 5 V</li> <li>• Tensión para el estado "high": <math>&gt;</math> 11 V</li> <li>• Intensidad con tensión de entrada de 24 V: 2,7 mA ... 4,7 mA</li> <li>• Intensidad mínima para el estado "high": 1,8 mA ... 3,9 mA</li> <li>• Compatible con salidas SIMATIC</li> <li>• Tiempo de reacción con tiempo de inhibición de rebote p0724 = 0: 5,5 ms <math>\pm</math> 1 ms</li> </ul> |
| Entrada analógica (entrada diferencial, resolución de 12 bits) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• AI 0, conmutable: <ul style="list-style-type: none"> <li>– 0 V ... 10 V o -10 V ... +10 V: consumo típico: 0,1 mA, tensión máxima 35 V</li> <li>– 0 mA ... 20 mA: Tensión máxima 10 V, intensidad máxima 80 mA</li> </ul> </li> <li>• Tiempo de reacción: 10 ms <math>\pm</math> 2 ms</li> <li>• Si AI 0 está configurada como entrada digital adicional: Tensión máxima 35 V, low <math>&lt;</math> 1,6 V, high <math>&gt;</math> 4,0 V, tiempo de reacción 13 ms <math>\pm</math> 1 ms con tiempo de inhibición de rebote p0724 = 0.</li> </ul>     |
| Salidas digitales/salidas de relé                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DO 0: Salida de relé, 30 V DC/<math>\leq</math> 0,5 A con carga óhmica</li> <li>• DO 1: Salida de transistor, 30 V DC/<math>\leq</math> 0,5 A con carga óhmica, protección contra inversión de polaridad</li> <li>• Tensión de salida de DO1 con estado "low": <math>\leq</math> 0,5 mA</li> <li>• Tiempo de actualización de todas las DO: 2 ms</li> </ul>                                                                                                                                                                                           |
| Salida analógica                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• AO 0, conmutable: <ul style="list-style-type: none"> <li>– 0 V ... 10 V</li> <li>– 0 mA ... 20 mA</li> <li>– Resolución 16 bits</li> <li>– Tiempo de actualización: 4 ms</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Figura A.17: Ficha técnica Variador de frecuencia G120C.

## A.6.9. Módulos analógicos

|                                                                                          |                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Tensión de alimentación                                                                  |                                                               |
| 24 V DC                                                                                  | Sí                                                            |
| Intensidad de entrada                                                                    |                                                               |
| Consumo típ.                                                                             | 45 mA                                                         |
| De bus de fondo 5 V DC, típ.                                                             | 80 mA                                                         |
| Pérdidas                                                                                 |                                                               |
| Pérdidas, típ.                                                                           | 1,5 W                                                         |
| Entradas analógicas                                                                      |                                                               |
| Nº de entradas analógicas                                                                | 4 ; Entradas diferenciales tipo corriente o tensión           |
| Tensión de entrada admisible para entrada de intensidad (límite de destrucción), máx.    | $\pm 35$ V                                                    |
| Tensión de entrada admisible para entrada de tensión (límite de destrucción), máx.       | 35 V                                                          |
| Intensidad de entrada admisible para entrada de intensidad (límite de destrucción), máx. | 40 mA                                                         |
| Intensidad de entrada admisible para entrada de corriente (límite de destrucción), máx.  | 40 mA                                                         |
| Tiempo de ciclo (todos los canales), máx.                                                | 625 $\mu$ s                                                   |
| Rangos de entrada                                                                        |                                                               |
| Tensión                                                                                  | Sí ; $\pm 10$ V, $\pm 5$ V, $\pm 2,5$ V                       |
| Intensidad                                                                               | Sí ; 4 a 20 mA, 0 a 20 mA                                     |
| Termopar                                                                                 | No                                                            |
| Termorresistencias                                                                       | No                                                            |
| Resistencia                                                                              | Sí                                                            |
| Rangos de entrada (valores nominales), tensiones                                         |                                                               |
| -10 V a +10 V                                                                            | Sí                                                            |
| Resistencia de entrada (-10 V a +10 V)                                                   | $\geq 9$ M $\Omega$ hm                                        |
| -2,5 V a +2,5 V                                                                          | Sí                                                            |
| Resistencia de entrada (-2,5 V a +2,5 V)                                                 | $\geq 9$ M $\Omega$ hm                                        |
| -5 V a +5 V                                                                              | Sí                                                            |
| Resistencia de entrada (-5 V a +5 V)                                                     | $\geq 9$ M $\Omega$ hm                                        |
| Rangos de entrada (valores nominales), intensidades                                      |                                                               |
| 0 a 20 mA                                                                                | Sí                                                            |
| Resistencia de entrada (0 a 20 mA)                                                       | 280 $\Omega$                                                  |
| 4 a 20 mA                                                                                | Sí                                                            |
| Salidas analógicas                                                                       |                                                               |
| Nº de salidas analógicas                                                                 | 0                                                             |
| Formación de valores analógicos                                                          |                                                               |
| Tiempo de integración y conversión/resolución por canal                                  |                                                               |
| Resolución con rango de rebase (bits incl. signo), máx.                                  | 12 bit ; + signo                                              |
| Tiempo de integración parametrizable                                                     | Sí                                                            |
| Supresión de perturbaciones de tensión para frecuencia perturbadora f1 en Hz             | 40 dB, DC a 60 V para frecuencia de perturbación 50/60 Hz     |
| Filtrado de valores medidos                                                              |                                                               |
| parametrizable                                                                           | Sí                                                            |
| Nivel: ninguno                                                                           | Sí                                                            |
| Nivel: débil                                                                             | Sí                                                            |
| Nivel: medio                                                                             | Sí                                                            |
| Nivel: intenso                                                                           | Sí                                                            |
| Error/precisiones                                                                        |                                                               |
| Error de temperatura (referido al rango de entrada), (+/-)                               | 25 °C $\pm 0,1$ % a 55 °C $\pm 0,2$ % todo el rango de medida |
| Límite de error básico (límite de error práctico a 25 °C)                                |                                                               |
| Tensión, referido al rango de entrada, (+/-)                                             | 0,1 %                                                         |

## A.7. Código Python

```
1 import os, math
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 import tkinter as tk
5 from tkinter import filedialog
6
7 # ===== Constantes físicas y geométricas =====
8 g = 9.81
9 z1 = 0.43
10 A_succion = 0.0021631
11 A_descarga = 0.00132154
12 ADC_BITS = 12 # bits efectivos del ADC
13
14 # ===== Parámetros de estabilidad robusta =====
15 N_MIN = 30 # seg mínimos
16 K_CONSEC = 7 # pasos consecutivos
17 W_SLOPE = 10 # seg para tendencia
18 W_STD = 10 # seg para std local
19 ALPHA_STD = 0.8 # std_local <= ALPHA_STD *  $\epsilon_{cadena}$ 
20
21 ISO 9906: límites de amplitud
22 ISO_LIMITS = {
23     "Qg [m3/h]": {"type": "percent", "G1": 0.02, "G2": 0.03, "G3":
24         :0.06}, # Rate of flow
25     "Pa2[m]": {"type": "percent", "G1": 0.02, "G2": 0.03, "G3":
26         :0.06}, # Outlet head
27     "Pa1[m]": {"type": "percent", "G1": 0.02, "G2": 0.03, "G3":
28         :0.06}, # Inlet head
29     "Pb2[m]": {"type": "percent", "G1": 0.02, "G2": 0.03, "G3":
30         :0.06},
31     "Pb1[m]": {"type": "percent", "G1": 0.02, "G2": 0.03, "G3":
32         :0.06},
33     "H_bomba_1 [m]": {"type": "percent", "G1": 0.03, "G2": 0.04, "
34         G3": 0.10}, # Differential head
```

```

29     "H_bomba_2 [m]": {"type": "percent", "G1": 0.03, "G2": 0.04, "
        G3": 0.10},
30     "Pot_MB1[W]": {"type": "percent", "G1": 0.02, "G2": 0.03, "G3"
        : 0.06}, # Input power
31     "Pot_MB2[W]": {"type": "percent", "G1": 0.02, "G2": 0.03, "G3"
        : 0.06},
32     "Vm1 [rpm]": {"type": "percent", "G1": 0.005, "G2": 0.01, "G3"
        : 0.02}, # Speed of rotation
33     "Vm2[rpm]": {"type": "percent", "G1": 0.005, "G2": 0.01, "G3"
        : 0.02},
34     "Ta [C]": {"type": "absC", "G1": 0.3, "G2": 0.3, "G3": 0.3 },
        Temperature (0.3 °C)
35 }
36
37 # ===== Instrumentación (ajusta con tus fichas) =====
38 # tipo: "abs" (precisión absoluta), "FS" (fracción del span), "
        reading" (fracción de la lectura)
39 INSTRUMENTOS = {
40     # Presión en bar
41     "Pa2[bar]": {"rango": (0.0, 10.0), "tipo": "abs", "prec_abs":
        0.10}, # Danfoss ±0.10 bar
42     "Pa1[bar]": {"rango": (-1.0, 15.0), "tipo": "abs", "prec_abs"
        : 0.08}, # WIKA ±0.08 bar
43     "Pb2[bar]": {"rango": (0.0, 10.0), "tipo": "abs", "prec_abs":
        0.10},
44     "Pb1[bar]": {"rango": (-1.0, 15.0), "tipo": "abs", "prec_abs"
        : 0.08},
45
46     # Resto
47     "Qg [m3/h]": {"rango": (0.0, None), "tipo": "reading", "prec"
        : 0.005},
48     "Ta [C]": {"rango": (0.0, 80.0), "tipo": "abs", "prec_abs":
        0.15},
49     "Pot_MB1[W]": {"rango": (0.0, None), "tipo": "reading", "prec"
        : 0.01},
50     "Pot_MB2[W]": {"rango": (0.0, None), "tipo": "reading", "prec"
        : 0.01},

```

```

51     "Vm1 [rpm]": {"rango": (0.0, None), "tipo": "reading", "prec"
52                 : 0.005},
53     "Vm2 [rpm]": {"rango": (0.0, None), "tipo": "reading", "prec":
54                 0.005},
55 }
56 PRES_COLS = ["Pa1[bar]", "Pa2[bar]", "Pb1[bar]", "Pb2[bar]"]
57
58 # ----- utilidades -----
59 def densidad_agua(temp_c):
60     return 1000 * (1 - ((temp_c + 288.9414)*(temp_c - 3.9863)
61                       **2)/(508929.2*(temp_c + 68.12963)))
62
63 def leer_txt(path):
64     with open(path, encoding='utf-8', errors='ignore') as f:
65         lines = [ln.strip() for ln in f if ln.strip()]
66         headers = [h.strip() for h in lines[0].split(';') if h.strip()
67                   ()]
68         rows=[]
69         for ln in lines[1:]:
70             parts = [p.strip() for p in ln.split(';')]
71             parts += ['']*(len(headers)-len(parts))
72             rows.append(parts[:len(headers)])
73         df = pd.DataFrame(rows, columns=headers)
74         for c in df.columns:
75             df[c] = pd.to_numeric(df[c], errors='ignore')
76         return df
77
78 def columna_tiempo(df):
79     """Devuelve 'Seg' numérico si existe; de lo contrario 1..N
80     (1 Hz)."""
81     if "Seg" in df.columns:
82         t = pd.to_numeric(df["Seg"], errors="coerce")
83         if t.notna().any():
84             return t.reset_index(drop=True)
85     return pd.Series(np.arange(1, len(df)+1), name="Seg")
86
87 def precision_instrumento(col, valor):

```

```

83     info = INSTRUMENTOS.get(col)
84     if not info: return np.nan
85     tipo = info.get("tipo", "reading")
86     if tipo=="abs": return float(info.get("prec_abs", np.nan))
87     if tipo=="FS":
88         rmin, rmax = info.get("rango", (None, None))
89         return float(info.get("prec", np.nan)*(rmax-rmin)
90     if tipo=="reading":
91         return float(info.get("prec", np.nan))*abs(valor) if np.
            isfinite(valor) else np.nan
92     return np.nan
93
94 def resolucion_adc(col, serie=None):
95     info = INSTRUMENTOS.get(col)
96     if not info: return np.nan
97     rmin, rmax = info.get("rango", (None, None))
98     if rmax is None and serie is not None:
99         s = pd.to_numeric(serie, errors='coerce').dropna()
100        if s.empty: return np.nan
101        rmin, rmax = float(s.min()), float(s.max())
102    span = rmax - rmin if rmax is not None else np.nan
103    return span/(2**ADC_BITS - 1) if np.isfinite(span) and span
        >0 else np.nan
104
105 def epsilon_cadena(df, col):
106     # presión en bar (crudo)
107     if col in PRES_COLS:
108         mu = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce').dropna().
            mean()
109         return max(precision_instrumento(col, mu), resolucion_adc
            (col, df[col]))
110     # alturas [m] desde presión
111     if col in ["Pa1[m]", "Pa2[m]", "Pb1[m]", "Pb2[m]"]:
112         bar_col = col.replace("[m]", "[bar]")
113         mu_bar = pd.to_numeric(df[bar_col], errors='coerce').
            dropna().mean()
114         eps_bar = max(precision_instrumento(bar_col, mu_bar),

```

```

        resolucion_adc(bar_col, df[bar_col]))
115     rho = pd.to_numeric(df.get("Densidad [kg/m³]", np.nan),
        errors='coerce').dropna().mean()
116     return eps_bar*1e5/(rho*g) if np.isfinite(eps_bar) and np
        .isfinite(rho) else np.nan
117     # H_bomba
118     if col in ["H_bomba_1 [m]", "H_bomba_2 [m]"]:
119         a1,a2 = ("Pa1[m]", "Pa2[m]") if "1" in col else ("Pb1[m]",
        "Pb2[m]")
120         e1,e2 = epsilon_cadena(df,a1), epsilon_cadena(df,a2)
121         return math.sqrt(e1**2+e2**2) if np.isfinite(e1) and np.
        isfinite(e2) else np.nan
122     # otras variables
123     mu = pd.to_numeric(df.get(col, np.nan), errors='coerce').
        dropna().mean()
124     eps = precision_instrumento(col, mu)
125     step= resolucion_adc(col, df.get(col))
126     return max(eps, step) if np.isfinite(eps) and np.isfinite(
        step) else (eps if np.isfinite(eps) else step)
127
128     # ----- cálculos hidráulicos -----
129     def agregar_hidraulica(df):
130         pa1 = pd.to_numeric(df.get("Pa1[bar]", np.nan), errors="
        coerce")
131         pa2 = pd.to_numeric(df.get("Pa2[bar]", np.nan), errors="
        coerce")
132         pb1 = pd.to_numeric(df.get("Pb1[bar]", np.nan), errors="
        coerce")
133         pb2 = pd.to_numeric(df.get("Pb2[bar]", np.nan), errors="
        coerce")
134         qg = pd.to_numeric(df.get("Qg [m3/h]", np.nan), errors="
        coerce")/3600.0
135         rho = pd.to_numeric(df.get("Densidad [kg/m³]", np.nan),
        errors="coerce")
136         pot1= pd.to_numeric(df.get("Pot_MB1[W]", np.nan), errors="
        coerce")
137         pot2= pd.to_numeric(df.get("Pot_MB2[W]", np.nan), errors="

```

```

        coerce")
138
139     for col in PRES_COLS:
140         if col in df.columns:
141             p = pd.to_numeric(df[col], errors="coerce")*1e5
142             df[col.replace("[bar]","[m]")] = p/(rho*g)
143
144     h1 = (pa2*1e5)/(rho*g) - (pa1*1e5)/(rho*g) + (((qg/
        A_descarga)**2-(qg/A_succion)**2)/(2*g)) + z1
145     h2 = (pb2*1e5)/(rho*g) - (pb1*1e5)/(rho*g) + (((qg/
        A_descarga)**2-(qg/A_succion)**2)/(2*g))
146     p_hid1, p_hid2 = rho*g*qg*h1, rho*g*qg*h2
147     df["H_bomba_1 [m]", df["H_bomba_2 [m]"] = h1, h2
148     df["P_hidráulica_b1 [W]", df["P_hidráulica_b2 [W]"] =
        p_hid1, p_hid2
149     df["Eficiencia_b1 [%]", df["Eficiencia_b2 [%]"] = p_hid1/
        pot1, p_hid2/pot2
150     return df
151
152     # ----- estadística acumulada y normalización -----
153     def estadistica_acumulada(df, columnas):
154         rows=[]
155         t = columna_tiempo(df)
156         for i in range(1, len(df)+1):
157             sub = df.iloc[:i]
158             fila={"Seg": float(t.iloc[i-1])}
159             for col in columnas:
160                 if col not in sub.columns: continue
161                 s = pd.to_numeric(sub[col], errors='coerce').dropna()
162                 if s.empty:
163                     fila[f"{col} - último"]= np.nan
164                     fila[f"{col} - promedio"]= np.nan
165                     fila[f"{col} - std"]= np.nan
166                     fila[f"{col} - ISO amp rel (±)"]= np.nan
167                 continue
168                 m = s.mean(); sd = s.std(ddof=1)
169                 pp_rel = (s.max()-s.min())/abs(m) if m!=0 else np.nan

```

```

170         amp_rel= pp_rel/2 if np.isfinite(pp_rel) else np.nan
171         fila[f"{col} - último"]= sub[col].iloc[-1]
172         fila[f"{col} - promedio"]= m
173         fila[f"{col} - std"]= sd
174         fila[f"{col} - ISO amp rel (±)"]= amp_rel
175     rows.append(fila)
176     return pd.DataFrame(rows)
177
178 def normalizar_por_media(df, columnas):
179     out={}
180     for col in columnas:
181         s = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce') if col in df.
            columns else pd.Series(dtype=float)
182         mu = s.mean()
183         # Siempre crear la columna; si mu≈0 no definimos %Δ (
            quedan NaN)
184         if mu!=0 and np.isfinite(mu):
185             out[col+" [%Δ]" ] = (s-mu)/mu
186         else:
187             out[col+" [%Δ]" ] = pd.Series([np.nan]*len(df))
188     return pd.DataFrame(out)
189
190 # ----- estabilidad robusta -----
191 def t_estable_por_epsilon_robusto(df, col):
192     s = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce').dropna().
        reset_index(drop=True)
193     n = len(s)
194     if n < max(N_MIN, W_SLOPE, W_STD)+2:
195         return np.nan, np.nan
196     mu = s.expanding().mean().values
197     dmu = np.abs(mu[1:] - mu[:-1])
198     eps = epsilon_cadena(df, col)
199     if not np.isfinite(eps): return np.nan, np.nan
200     consec = 0
201     for t in range(1, n):
202         if t+1 < N_MIN:
203             consec = 0

```

```

204         continue
205     c_delta = (dmu[t-1] <= eps)
206     c_slope = (abs(mu[t]-mu[t-W_SLOPE]) <= eps) if t+1>=
        W_SLOPE+1 else False
207     if t+1>=W_STD+1:
208         std_loc = s.iloc[t-W_STD+1:t+1].std(ddof=1)
209         c_std = (std_loc <= ALPHA_STD*eps) if np.isfinite(
            std_loc) else False
210     else:
211         c_std = False
212     if c_delta and c_slope and c_std:
213         consec += 1
214     else:
215         consec = 0
216     if consec >= K_CONSEC:
217         N_est = t+1
218         if "Seg" in df.columns:
219             try: t_real = float(pd.to_numeric(df.loc[N_est-1, "
                Seg"], errors='coerce'))
220             except: t_real = float(N_est)
221         else:
222             t_real = float(N_est)
223         return N_est, t_real
224     return np.nan, np.nan
225
226 def recomendar_tiempo_adquisicion(df, columnas):
227     out=[]
228     for col in columnas:
229         if col not in df.columns: continue
230         n_est, t_est = t_estable_por_epsilon_robusto(df, col)
231         s = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce').dropna()
232         mu = s.mean()
233         pp_rel = (s.max()-s.min())/abs(mu) if mu!=0 else np.nan
234         out.append({
235             "Variable": col,
236             "Media": mu,
237             "ISO amp rel total ( $\pm$ )": (pp_rel/2 if np.isfinite(

```

```

        pp_rel) else np.nan),
238         "N_estable": n_est, # cantidad de mediciones hasta t*
239         "epsilon_cadena (unid)": epsilon_cadena(df, col)
240     })
241     df_out = pd.DataFrame(out)
242
243     # valores globales (peor caso) por archivo
244     t_list=[]
245     for col in columnas:
246         if col in df.columns:
247             _, t_est = t_estable_por_epsilon_robusto(df, col)
248             t_list.append(t_est)
249     t_global = np.nanmax(t_list) if t_list else np.nan
250     n_global = np.nanmax(df_out["N_estable"].values) if not
        df_out.empty else np.nan
251     return df_out, t_global, n_global
252
253     # ----- ISO check -----
254     def iso_amplitudes(df, col):
255         s = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce').dropna()
256         if s.size<2: return np.nan, np.nan
257         m = s.mean(); amp_abs=(s.max()-s.min())/2
258         amp_rel=(amp_abs/abs(m)) if m!=0 else np.nan
259         return amp_rel, amp_abs
260
261     def check_iso(df, columnas):
262         rows=[]
263         for col in columnas:
264             if col not in df.columns or col not in ISO_LIMITS:
                continue
265             spec=ISO_LIMITS[col]
266             amp_rel,amp_abs=iso_amplitudes(df,col)
267             for grado in ["G1","G2","G3"]:
268                 lim=spec[grado]
269                 if spec["type"]=="percent":
270                     cumple=(amp_rel<=lim) if np.isfinite(amp_rel) else
                        np.nan

```

```

271         rows.append({"Variable":col,"Grado":grado,"Tipo":
                        %,"Amp_total(±)":amp_rel,"Límite":lim,"Cumple"
                        :cumple})
272     else:
273         cumple=(amp_abs<=lim) if np.isfinite(amp_abs) else
            np.nan
274         rows.append({"Variable":col,"Grado":grado,"Tipo":"°
                        C","Amp_total(±)":amp_abs,"Límite":lim,"Cumple"
                        :cumple})
275     return pd.DataFrame(rows)
276
277     # ----- resumen por archivo -----
278     def fila_resumen(df):
279         num = lambda c: pd.to_numeric(df[c], errors='coerce') if c
            in df.columns else pd.Series(dtype=float)
280         ev1 = (num("EV1 [%]").dropna().iloc[-1] if "EV1 [%]" in df.
            columns and not num("EV1 [%]").dropna().empty else np.
            nan)
281         qh = num("Qg [m3/h]").mean()
282         palb,pa2b,pb1b,pb2b = num("Pa1[bar]").mean(), num("Pa2[bar]"
            ).mean(), num("Pb1[bar]").mean(), num("Pb2[bar]").mean()
283         ta = num("Ta [C]").mean()
284         vm1, vm2 = num("Vm1 [rpm]").mean(), num("Vm2 [rpm]").mean()
285         pot1,pot2= num("Pot_MB1[W]").mean(), num("Pot_MB2[W]").mean
            ()
286         rho = num("Densidad [kg/m3]").mean()
287         q = qh/3600.0 if pd.notna(qh) else np.nan
288         pa1,pa2,pb1,pb2 = palb*1e5, pa2b*1e5, pb1b*1e5, pb2b*1e5
289         h1 = (pa2/(rho*g) - pa1/(rho*g) + (((q/A_descarga)**2-(q/
            A_succion)**2)/(2*g)) + z1) if all(pd.notna(x) for x in [
            pa1,pa2,q,rho]) else np.nan
290         h2 = (pb2/(rho*g) - pb1/(rho*g) + (((q/A_descarga)**2-(q/
            A_succion)**2)/(2*g))) if all(pd.notna(x) for x in [pb1,
            pb2,q,rho]) else np.nan
291         p1 = (rho*g*q*h1) if all(pd.notna(x) for x in [rho,q,h1])
            else np.nan
292         p2 = (rho*g*q*h2) if all(pd.notna(x) for x in [rho,q,h2])

```

```

        else np.nan
293     e1 = (p1/pot1) if (pd.notna(p1) and pd.notna(pot1) and pot1
        !=0) else np.nan
294     e2 = (p2/pot2) if (pd.notna(p2) and pd.notna(pot2) and pot2
        !=0) else np.nan
295     return {"EV1 [%]":ev1,"Qg [m3/h]":qh,"Pa1[bar]":pa1b,"Pa2[
        bar]":pa2b,"Pb1[bar]":pb1b,"Pb2[bar]":pb2b,
296         "Ta [C]":ta,"Vm1 [rpm]":vm1,"Vm2[rpm]":vm2,"Pot_MB1[W]
        ":pot1,"Pot_MB2[W]":pot2,"Densidad [kg/m³]":rho,
297         "Qg [m3/s]":q,"Altura B1 [m]":h1,"Altura B2 [m]":h2,"
        Potencia Hidraulica B1 [W]":p1,"Potencia Hidraulica
        B2 [W]":p2,
298         "Eficiencia B1":e1,"Eficiencia B2":e2}
299
300 # ----- main -----
301 def main():
302     root=tk.Tk(); root.withdraw()
303     files=filedialog.askopenfilenames(title="Selecciona .txt",
        filetypes=[("txt","*.txt")])
304     if not files: return
305     out=filedialog.asksaveasfilename(defaultextension=".xlsx",
        filetypes=[("xlsx","*.xlsx")],title="Guardar Excel")
306     if not out: return
307
308     resumen_rows=[]; est_global=[]; iso_global=[]
309     with pd.ExcelWriter(out,engine='openpyxl') as writer:
310         for f in files:
311             hoja=os.path.splitext(os.path.basename(f))[0]
312             df=leer_txt(f)
313
314             # densidad si falta
315             if 'Ta [C]' in df.columns and 'Densidad [kg/m³]' not
                in df.columns:
316                 df["Densidad [kg/m³]"]=pd.to_numeric(df["Ta [C]"],
                    errors='coerce').apply(densidad_agua)
317
318             # hidráulica (para ISO y cálculos derivados)

```

```

319     df=agregar_hidraulica(df)
320
321     # estadísticas acumuladas (con Seg 1 col)
322     cols_stats=[c for c in [
323         "Qg [m3/h]", "Pa1[bar]", "Pa2[bar]", "Pb1[bar]", "Pb2[
324             bar]",
325         "Pa1[m]", "Pa2[m]", "Pb1[m]", "Pb2[m]",
326         "H_bomba_1 [m]", "H_bomba_2 [m]",
327         "P_hidráulica_b1 [W]", "P_hidráulica_b2 [W]",
328         "Eficiencia_b1 [%]", "Eficiencia_b2 [%]",
329         "Pot_MB1[W]", "Pot_MB2[W]", "Vm1 [rpm]", "Vm2[rpm]", "
330             Ta [C]"
331     ] if c in df.columns]
332     df_acum = estadistica_acumulada(df, cols_stats)
333     # poner Seg primero (ya viene primero, pero aseguramos
334     )
335     cols = ["Seg"] + [c for c in df_acum.columns if c!="
336         Seg"]
337     df_acum = df_acum[cols]
338     df_acum.to_excel(writer, sheet_name=(hoja[:28]+"_Acum"
339         ), index=False)
340
341     # normalizado ( $\Delta\%$  respecto a su media) usando
342     VARIABLES CRUDAS del PLC
343     # (bar para presiones, no metros) + Seg como primera
344     columna
345     cols_norm = [c for c in [
346         "Qg [m3/h]",
347         "Pa1[bar]", "Pa2[bar]", "Pb1[bar]", "Pb2[bar]", # <--
348             bar (no [m])
349         "Pot_MB1[W]", "Pot_MB2[W]",
350         "Vm1 [rpm]", "Vm2[rpm]",
351         "Ta [C]"
352     ] if c in df.columns]
353
354     df_norm = normalizar_por_media(df, cols_norm)
355     df_norm.insert(0, "Seg", columna_tiempo(df).values)

```

```

348 df_norm.to_excel(writer, sheet_name=(hoja[:28]+"_Norm"
    ), index=False)
349
350 # ESTABILIDAD (variables CRUDAS del PLC)
351 cols_estab = [c for c in [
352     "Qg [m3/h]",
353     "Pa1[bar]", "Pa2[bar]", "Pb1[bar]", "Pb2[bar]",
354     "Pot_MB1[W]", "Pot_MB2[W]",
355     "Vm1 [rpm]", "Vm2[rpm]",
356     "Ta [C]"
357 ] if c in df.columns]
358 df_est, t_glob, n_glob = recomendar_tiempo_adquisicion
    (df, cols_estab)
359 df_est.to_excel(writer, sheet_name=(hoja[:28]+"_Estab"
    ), index=False)
360
361 est_global.append({"Archivo":hoja,
362                  "N_estable_global":n_glob, # peor caso
    (máximo N_estable entre variables)
363                  "t_estable_global [s]":t_glob}) # peor
    caso (máximo t* entre variables)
364
365 # ISO 9906 (aparte)
366 cols_iso=[c for c in ISO_LIMITS.keys() if c in df.
    columns]
367 df_iso=check_iso(df,cols_iso)
368 df_iso.to_excel(writer,sheet_name=(hoja[:26]+"
    _ISOcheck"),index=False)
369 if not df_iso.empty:
370     # % de variables que cumplen por grado en este
    archivo
371     pct = df_iso.groupby("Grado")["Cumple"].mean()
    *100.0
372     for g,val in pct.items():
373         iso_global.append({"Archivo":hoja,"Grado":g,"%
    _vars_cumplen_total":float(val)})
374

```

```

375         # datos crudos/calculados (Seg primero si existe)
376         datos = df.copy()
377         if "Seg" in datos.columns:
378             datos = datos[["Seg"] + [c for c in datos.columns
379                                     if c!="Seg"]]
380
381         datos.to_excel(writer, sheet_name=(hoja[:28]+"_Datos")
382                             , index=False)
383
384         # resumen por archivo
385         resumen_rows.append(fila_resumen(df.copy()))
386
387     # hojas globales
388     df_resumen = pd.DataFrame(resumen_rows)
389     orden = ["EV1 [%]", "Qg [m3/h]", "Pa1[bar]", "Pa2[bar]", "
390             Pb1[bar]", "Pb2[bar]",
391             "Ta [C]", "Vm1 [rpm]", "Vm2[rpm]", "Pot_MB1[W]", "
392             Pot_MB2[W]", "Densidad [kg/m³]",
393             "Qg [m3/s]", "Altura B1 [m]", "Altura B2 [m]",
394             "Potencia Hidraulica B1 [W]", "Potencia Hidraulica
395             B2 [W]", "Eficiencia B1", "Eficiencia B2"]
396     df_resumen = df_resumen[[c for c in orden if c in
397                             df_resumen.columns]]
398     if "EV1 [%]" in df_resumen.columns and df_resumen["EV1
399         [%]"].notna().any():
400         df_resumen = df_resumen.sort_values(by="EV1 [%]")
401     df_resumen.to_excel(writer, sheet_name="Resumen", index=
402         False)
403
404     pd.DataFrame(est_global).to_excel(writer, sheet_name="
405         Estabilidad_global", index=False)
406     pd.DataFrame(iso_global).to_excel(writer, sheet_name="
407         ISO_resumen_global", index=False)
408
409     print(" Excel generado:", out)
410     print(" Bits ADC usados:", ADC_BITS)
411     print(" Estabilidad: N_MIN=%d, K_CONSEC=%d, W_SLOPE=%d,
412           W_STD=%d, ALPHA_STD=%.2f"

```

```
401         % (N_MIN, K_CONSEC, W_SLOPE, W_STD, ALPHA_STD))
402
403 if __name__ == "__main__":
404     main()
```