UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE

“Rediseño de banco de ensayos para bomba centrifuga del Laboratorio de Termofluidos, con monitoreo externo de variables”

ANDRÉS IGNACIO BLAAUBOER PINTO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: **MG. ING. JAIME ESPINOZA S.**

PROFESOR CORREFERENTE: **DR. ING. ROMAIN GERS**

Septiembre 2016

DEDICATORIA

"Tú no vales por tener un título.

Tu vales por lo que eres capaz de hacer con lo que sabes."

A mi familia

Por creer, por confiar, por levantarme cada vez que caí.
Por su apoyo incondicional y concejos que brindaron durante todos estos años.

A mis amigos y compañeros

Porque son la familia que elegí para acompañarme en esta experiencia
y sin ustedes todo hubiese sido más difícil.

RESUMEN

En este trabajo de título se diseña un laboratorio de prueba de bombas centrifugas para ser implementado en dependencias del laboratorio de termofluidos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

El laboratorio ha sido configurado para testear dos bombas, con capacidad para conectarse en serie, paralelo. La instalación cuenta con accesorios que permiten el rápido cambio de bomba a testear.

Se analiza la base teórica y funcionamiento de las bombas, considerando las normas internacionales que regulan los bancos de ensayos de bombas hidráulicas. Para cumplir con la norma ISO 9906, se detallan las partes, componentes y geometrías críticas de este laboratorio y se incluyen planos para fabricar las piezas.

Los sistemas de control y automatización facilitan la ejecución de las pruebas a las bombas. Se hace un estudio sobre los costos y capacidades de los sistemas de control tradicional, específicamente sistemas SCADA, y se propone un modelo de control basado en la placa Arduino, con sus limitaciones.

ABSTRACT

In this title work, a centrifugal water pump test laboratory is designed in order to be implemented in the thermofluids laboratory of the mechanical engineering departament of the Federico Santa María Technical University, Valparaiso, Chile.

The laboratory has been set up to test pumps, with capacity to be connected in serial or parallel. Also has accessories that make faster the pump interchange.

The theoretical basis and operation of the pumps is analyzed, considering international standards that regulate hydraulic pumps test banks. In order to comply with ISO 9906 standard; parts, components and critical geometries of this laboratory are detailed and drawings are included to manufacture the parts.

The control and automation systems facilitate the execution of the pump's tests. A study about the cost and capabilities of the traditional control systems, specifically SCADA systems, and a control model is proposed, based on the Arduino Board, with its limitations.

SIMBOLOGÍA

Símbolo		Definición	Unidad
ν	:	Viscosidad cinemática del fluido	[m²/s]
A	:	Área de la tubería	[m^2]
D	:	diámetro interno de la tubería	[m]
f	:	factor de fricción de Darcy- Weisbach	[-]
g	:	aceleración de la gravedad	[m/s^2]
h_L	:	pérdida de carga	[m]
K	:	factor K de cada accesorio.	[-]
L	:	longitud de la tubería.	[m]
Q	:	Caudal	[m^3/s]
Re	:	Número de Reynolds	[-]
V	:	Velocidad media del flujo	[m/s]
h_i	:	perdidas características de la tubería	[m.c.a.]

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA ..... **I**

RESUMEN ..... **II**

ABSTRACT ..... **III**

SIMBOLOGÍA ..... **IV**

ÍNDICE GENERAL ..... **V**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **VIII**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **X**

INTRODUCCIÓN **2**

OBJETIVOS DEL TRABAJO **3**

Objetivo general. *3*

Objetivos específicos. *3*

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y BASE TEÓRICA **4**

1.1 BASE TEÓRICA DE LAS BOMBAS HIDRÁULICAS. 4

1.1.1 Definición y tipos de bombas. *4*

1.1.2 Fallas en bombas. *7*

1.1.3 Curvas características. *10*

1.1.4 Conexión de múltiples bombas *13*

1.1.5 Leyes de semejanza *15*

1.2 BASE TEÓRICA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN. 17

1.2.1 Conceptos de Control y automatización *17*

1.2.1 Tipos de controladores *19*

1.2.2 Microcontrolador Arduino *21*

1.2.3 Sistemas SCADA *22*

1.3 BANCOS DE PRUEBA EXISTENTES EN LA INDUSTRIA 24

1.4 NORMATIVA APLICABLE A BANCOS DE PRUEBAS DE BOMBAS 26

1.4.1 Características de la Norma ISO 9906:2012 ..... *26*
1.4.2 Ubicación de sensores..... *27*
1.5 ESTADO ACTUAL DEL BANCO DE PRUEBAS. 28
1.5.1 La Bomba y su motor. *30*
1.5.2 Estanque de acumulación *31*
1.5.3 Sistema de tuberías y válvulas *32*
1.5.4 Sensores y captadores de datos. *32*
CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE INGENIERÍA 35
2.1 SELECCIÓN DE ELEMENTOS DEL SISTEMA 35
2.1.1 Bombas centrifugas..... *35*
2.1.2 Piping *35*
2.1.3 Válvulas..... *36*
2.1.4 Sensores e instrumentación...... *38*
2.1.5 Tablero de potencia y control. *39*
2.2 GEOMETRÍA DE PARTES Y COMPONENTES CRÍTICOS 39
2.2.1 Secciones de medición de presión..... *39*
2.3 CÁLCULOS QUE AVALAN EL DISEÑO 41
2.3.1 Determinación de pérdidas en accesorios. *41*
2.3.2 Determinación de pérdidas en tuberías. *41*
CAPÍTULO 3. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA 45
3.1 CONTROL PROPUESTO. 45
3.1.1 Diagrama de flujo del proceso...... *45*
3.1.2 Elementos de compatibilidad *47*
CAPÍTULO 4. COSTOS DEL SISTEMA..... 49
4.1 COSTOS DE SISTEMAS DE CONTROL TRADICIONAL..... 49
4.2 COSTOS DEL SISTEMA DE CONTROL PROPUESTO. 49
ANÁLISIS Y CONCLUSIONES. 50
ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 50

CONCLUSIONES. 50

REFERENCIAS 52

ANEXO A: TABLAS 54

A1: REFERENTES A NORMA ISO 9906 55

A2: REFERENTES A TUBERÍAS Y ACCESORIOS. 56

ANEXO B: ILUSTRACIONES Y DIAGRAMAS 65

ANEXO C: PLANOS DE LABORATORIO 70

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1-1 Sistema alternativo de bombeo 4
Ilustración 1-2 Esquema de bombas proporcionales 5
Ilustración 1-3 Esquema bomba centrífuga 6
Ilustración 1-4 Esquema bomba periférica 6
Ilustración 1-5 Esquema bomba axial. 6
Ilustración 1-6 Destrucción de burbujas en cavitación. 7
Ilustración 1-7 Curva de presión de vapor agua 8
Ilustración 1-8 Curva Característica Q-H 10
Ilustración 1-9 Esquema de instalación de una bomba 12
Ilustración 1-10 Curva del sistema 12
Ilustración 1-11 Curva de bombas en serie. 14
Ilustración 1-12 Curva de bombas en paralelo. 15
Ilustración 1-13 Esquema de control 18
Ilustración 1-14 Ejemplos de PLC 20
Ilustración 1-15 Diagrama laader 20
Ilustración 1-16 Arduino UNO 21
Ilustración 1-17 Industruino 22
Ilustración 1-18 Banco de prueba de bombas serie/paralelo, modelo PS73 ... 24
Ilustración 1-19 Banco de pruebas KSB 25
Ilustración 1-20 Distribución sensores de presión 27
Ilustración 1-21 Geometría tomas de presión/vacío 28
Ilustración 1-22 Laboratorio actual 29
Ilustración 1-23 Bomba Vogt N626 30
Ilustración 1-24 Motor Conts 30
Ilustración 1-25 Reóstato control RPM 31
Ilustración 1-26 Estanque de acumulación 31
Ilustración 1-27 Sistema de tuberías actual 32
Ilustración 1-28 Válvula L.Bernard 32

Ilustración 1-29 Vacuómetro actual 33
Ilustración 1-30 Totalizador de Flujo 33
Ilustración 1-31 Transmisor de presión. 33
Ilustración 1-32 transductor de vacío 33
Ilustración 1-33 Transductor de presión 33
Ilustración 1-34 Voltimetro y amperimetro usado actualmente 34
Ilustración 2-1 Válvula de pie marca RASTELLI, de 3” 36
Ilustración 2-2 Válvula mariposa, marca Tyson, PN16, 3pulg. 37
Ilustración 2-3 Válvula automática y manual DynaFly 90 37
Ilustración 2-4 Flujometro 3" 38
Ilustración 2-5 Dimensiones toma de presión 40
Ilustración 2-6 Toma de vacío 41
Ilustración 2-7 Toma de presión 41
Ilustración B-1 Curva bomba Vogt N40-160 66
Ilustración B-2 Diagrama unilineal 67
Ilustración B-3 Diagrama PID 68
Ilustración B-4 Ubicación sensores de presión 69
Ilustración C-1 Esquema de Tuberías 71
Ilustración C-2 Esquema de Tuberías Isométrico 72
Ilustración C-3 Plano sección vacío 73
Ilustración C-4 Plano sección presión 74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Rango de trabajo laboratorio 35
Tabla 2-2 Pérdida de carga h_i por ML en función del caudal en m.c.a. 43
Tabla A-1 Valores permisibles de incertidumbres sistemáticas 55
Tabla A-2 Fluctuaciones permisibles 55
Tabla A-3 Norma ASTM A-795 dimensiones, pesos y presión SCH10 56
Tabla A-4 Norma NCh 399-2011: Requisitos para tubos de PVC rígido. 56
Tabla A-5 Coeficiente K de elementos (Ingersoll-Rand, 1984) 57
Tabla A-6 Pérdida de carga en válvulas [m.c.a] 57
Tabla A-7 Pérdida de carga en curvas [m.c.a] 58
Tabla A-8 Pérdida de carga en tee y reducciones[m.c.a] 58
Tabla A-9 Pérdidas en tubería PVC 3” 59
Tabla A-10 Pérdidas en tubería acero 1 ½”. 59
Tabla A-11 Pérdidas en tubería acero 2”. 60
Tabla A-12 Pérdidas en tubería acero 2 ½”. 60
Tabla A-13 Pérdidas en tubería acero 3”. 61
Tabla A--14 Pérdida de carga total succión bomba 1 en paralelo [m.c.a.] 61
Tabla A-15 Pérdida de carga total en descarga bomba 1en paralelo [m.c.a.] . 62
Tabla A-16 Pérdida de carga en succión bomba 2 en paralelo [m.c.a.] 62
Tabla A-17 Pérdida de carga en descarga bomba 2 en paralelo [m.c.a.] 62
Tabla A-18 Pérdida de carga total en succión bomba 1 en serie [m.c.a.] 63
Tabla A-19 Pérdida de carga total en descarga bomba 1 en serie [m.c.a.] 63
Tabla A-20 Pérdida de carga total en Interconexión [m.c.a.] 63
Tabla A-21 Pérdida de carga total en succión bomba 2 en serie [m.c.a.] 63
Tabla A-22 Pérdida de carga total en descarga bomba 2 en serie [m.c.a.] 64

INTRODUCCIÓN

Durante el transcurso de la carrera de ingeniería mecánica, los estudiantes deben realizar un sinnúmero de experiencias de laboratorio dentro de la Universidad. Uno de ellos es el laboratorio de bombas hidráulicas. Muchos procesos productivos requieren bombear fluidos, por lo que es de suma importancia que se comprenda el funcionamiento de estos componentes, requerimientos de instalación y curvas características, entre otros factores.

En la actualidad, el laboratorio de termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María, cuenta con un banco de pruebas de bombas centrifugas con capacidad para una única bomba que es controlada manualmente. Los instrumentos de medición con que se cuenta son análogos. Se rescata que la instalación cuenta con un estanque de acumulación de volumen conocido, siendo el método más exacto para medir indirectamente el caudal desplazado por las bombas. A modo general, el diseño no cumple con la norma actual para este tipo de instalaciones.

Como consecuencia de lo anterior, se podría incurrir en mediciones con error no determinado, no pudiendo usarse este banco de ensayos para prestar el servicio de certificación de bombas

El presente trabajo de título, plantea un nuevo diseño para el banco de ensayos de bombas centrífugas, incorporando sensores y control semiautomático de los sistemas.

El nuevo banco de pruebas contará con las siguientes características

- Dos bombas centrifugas, con capacidad de conexión en serie o paralelo.
- Dos variadores de frecuencia.
- Sensores de presión y caudal digitales.
- Amperímetro de efecto hall.

OBJETIVOS DEL TRABAJO.

Objetivo general.

Rediseñar y automatizar un banco de prueba de bombas centrifugas del laboratorio de termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Objetivos específicos.

- Diseñar un sistema de bombeo trifásico, dimensionando sus elementos mecánicos y eléctricos.
- Incorporar flujómetros y manómetros en las líneas de admisión y descarga de la bomba.
- Incorporar amperímetro, voltímetro y vatímetro en la línea de energía de la bomba.
- Obtener datos para determinar la curva de trabajo de la bomba.
- Comparar costos entre el sistema de control propuesto y un sistema de control industrial basado en PLC y SCADA.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y BASE TEÓRICA

En este capítulo se expone la información introductoria del trabajo realizado, junto con la base teórica y normativa que lo respalda.

1.1 Base Teórica de las bombas hidráulicas.

1.1.1 Definición y tipos de bombas.

Una bomba hidráulica aporta la energía mecánica, proveniente desde un motor eléctrico, térmico u otro, y se la entrega a un fluido. Las bombas se clasifican, entre otras categorías, según su principio de funcionamiento, el cual puede ser:

1. Bombas volumétricas: El aumento de presión ocurre por el empuje que generan cámaras de volumen variable. Un aumento del volumen en la cámara produce la succión y la reducción en el volumen genera la impulsión. Las bombas volumétricas, se clasifican a su vez según el origen del cambio de volumen:
    a. Bombas de émbolo alternativo: Un émbolo o membrana se mueve de forma alternativa, variando así el volumen de una cámara fija. Estas bombas requieren de válvulas que se abren y cierran para controlar el paso del fluido, el cual se caracteriza por tener un flujo discontinuo.

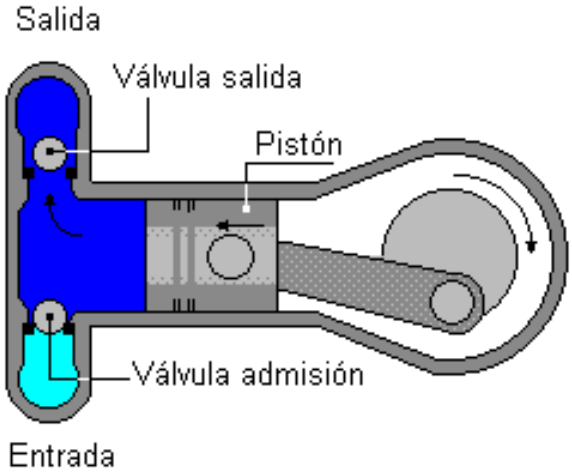


Ilustración 1-1 Sistema alternativo de bombeo

b. Bombas volumétricas rotativas: La bomba rotativa volumétrica es de desplazamiento positivo. Las piezas principales son una pieza rotativa o rotor y una pieza fija o estator. El rotor puede ser uno o varios husillos, paletas o lóbulos que giran en forma excéntrica. Esto permite que entre el estator y el rotor queden cavidades vacías que se aprovechan para el acarreo o transporte. Cuando el rotor gira dentro del estator, estas cavidades se desplazan continuamente del lado de la entrada al de salida. El caudal generado por estas bombas es proporcional al número de revoluciones.

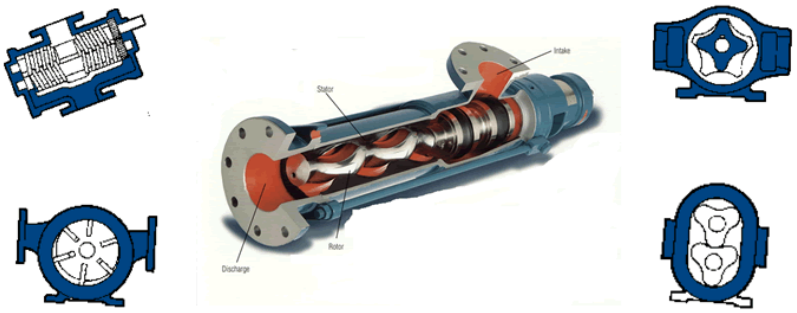


Ilustración 1-2 Esquema de bombas proporcionales

2. Bombas dinámicas: Este tipo de bombas aumentan la presión del sistema por el intercambio de energía entre el impulsor y el fluido. El fluido entra por el centro del impulsor, rodete o hélice, el cual, al estar girando impulsa el agua. Este empuje puede ser hacia el exterior del impulsor en el caso del rodete, o en dirección de las aspas en el caso de la hélice. Se clasifican en:
    a. Bombas centrífugas: El rodete añade energía cinética al agua, la cual es transformada en presión mediante un difusor, por conservación de la ecuación de Euler. Al entrar el líquido en el cuerpo de la bomba, el rodete proyecta el fluido hacia el exterior debido a la fuerza centrífuga generada al girar. Las bombas centrifugas pueden tener uno o más rodetes según los requerimientos de la instalación.

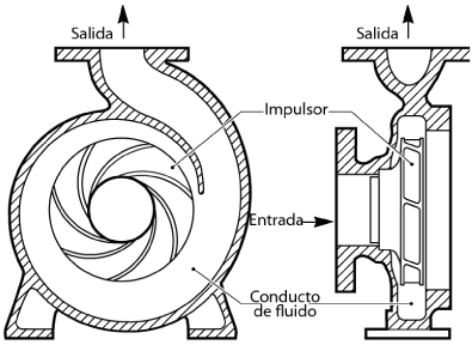


Ilustración 1-3 Esquema bomba centrífuga

b. <u>Periféricas:</u> Las bombas periféricas son similares a la centrifugas en su exterior. El rodete en este caso es macizo, con su superficie dentada radialmente. El agua circula por la superficie y no a través de él. Se utilizan para bajos caudales y altas presiones.

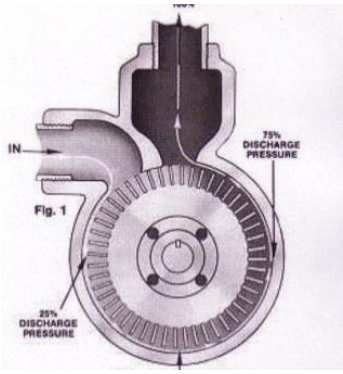


Ilustración 1-4 Esquema bomba periférica

c. <u>Axiales:</u> Las bombas axiales permiten bombear un gran caudal a baja presión. Normalmente se utilizan para bombear desde tomas abiertas como océanos, ríos, lagos, estanques de enfriamiento, tanques y pozos.

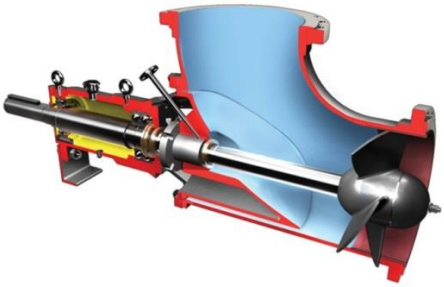


Ilustración 1-5 Esquema bomba axial.

1.1.2 **Fallas en bombas.**

1.1.2.1 **Rotura de sellos.**

Los sellos que evitan que el agua salga de la bomba a través del eje, deberían ser de larga duración, pero son muy sensibles a la alta temperatura. En general, los sellos se rompen cuando la bomba funciona en seco, sobrecalentando y debilitando el material.

1.1.2.2 **Cavitación.**

La cavitación es un problema que ocurre en bombas y válvulas de control. Este fenómeno puede causar una serie de problemas para el sistema de bombeo, incluyendo el exceso de ruido y el sobreconsumo de energía, además de efectos graves para la propia bomba. La cavitación se caracteriza por la formación de burbujas dentro del fluido que se está transportando, producto de una disminución de presión repentino y no permanente hasta el punto de alcanzar la presión de vapor del fluido.

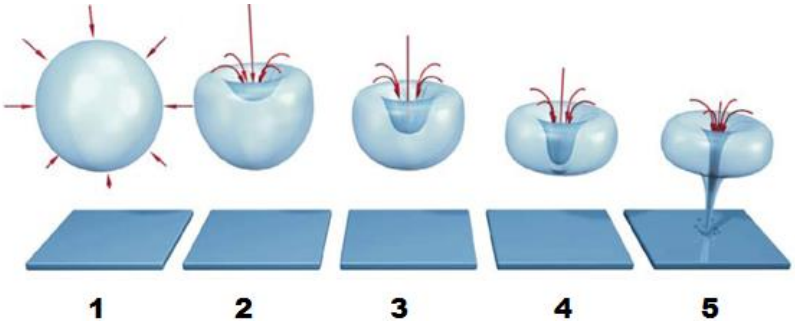


Ilustración 1-6 Destrucción de burbujas en cavitación.

Cuando comienza el aumento de presión, la burbuja ya formada comienza a comprimirse [1]. Luego, se inicia la formación de una perforación en el centro de la burbuja formando un toroide [2-4] Finalmente, el toroide completo disminuye su tamaño, forzando al fluido que se encuentra en el centro a desplazarse a gran velocidad [5].

Este fenómeno es extensible a cualquier proceso en que cambie drásticamente la velocidad del fluido, incluyendo álabes de turbina, hélices de barcos, estrangulamientos, válvulas, etc.

La Ilustración 1-7 relaciona la presión absoluta y la temperatura del agua e indica la curva donde el agua líquida se evapora. Por ejemplo, una bomba va a cavitar si bombea agua a 50 grados y se alcanza una presión de 0,1 Bar absoluto.

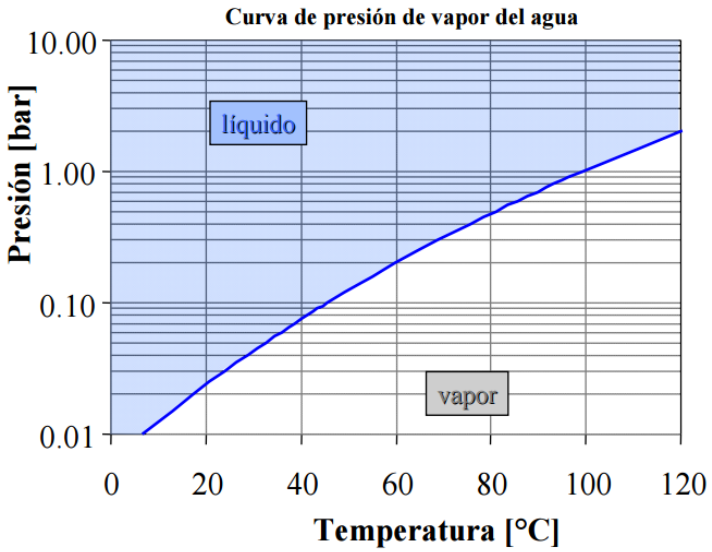


Ilustración 1-7 Curva de presión de vapor agua

El fenómeno de cavitación produce los siguientes problemas de operación:

- Fallas y desgaste en la carcasa de la bomba.
- Destrucción de impulsor.
- La vibración excesiva.
- Sobreconsumo de energía.
- Disminución del caudal y presión.

En las bombas, la cavitación ocurre tanto en la succión como en la descarga, dependiendo de la geometría del sistema de tuberías.

a) <u>La cavitación de succión:</u> Cuando la bomba opera con presiones de succión muy bajas, la cavitación ocurre en la succión. La baja presión se debe a altura de succión muy alta, operación de la bomba a gran altura geográfica o

alguna restricción del flujo paso en la línea de succión (válvula de paso a medio abrir, filtro tapado, etc).

Con la restricción del flujo las burbujas o cavidades se forman en el centro del impulsor. Como las burbujas se traspasan al lado de descarga de la bomba, es decir, se pasa de una baja a una alta presión, se comprime la burbuja haciendo que implosione contra la cara del impulsor. Un impulsor que ha sufrido cavitación de succión, tendrá pequeños pedazos faltantes.

Las posibles causas de cavitación de succión:

- Filtros o coladores obstruidos
- Obstrucción en la tubería
- La bomba está funcionando con gran caudal.
- Mal diseño de tuberías.
- Alta temperatura del fluido.
- Baja presión atmosférica (gran altura sobre nivel del mar).
- Condiciones de succión pobre (requisitos de NPSH).

b) La cavitación de descarga: Cuando la presión de descarga de una bomba es extremadamente alta se produce cavitación en la descarga. La alta presión dificulta que el fluido fluya fuera de la bomba, por lo que circula dentro de la bomba. El líquido fluye entre el impulsor y la carcasa a muy alta velocidad, causando vacío en la pared de la carcasa y por ende la formación de burbujas. En este caso de cavitación, las burbujas destruyen el exterior de los álabes del impulsor y la carcasa de la bomba. En casos extremos, se puede incluso romper el eje del impulsor.

Las posibles causas de cavitación en la descarga son:

- Obstrucción en la tubería en el lado de descarga.
- Filtros o coladores tapados.
- Trabajar bombeando bajo caudal.
- Mal diseño de tuberías.

Prevención de la cavitación.

Realizar las siguientes acciones previene la cavitación en instalaciones correctamente diseñadas:

- Revisar los filtros y coladores. Obstrucciones en la succión o la descarga puede causar un desequilibrio de la presión dentro de la bomba.
- Revisar el punto de funcionamiento de la bomba. Asegurarse de que se está trabajando en su mejor punto de eficiencia.
- Evaluar el diseño del piping.

1.1.3 Curvas características.

1.1.3.1 Curvas de la bomba.

La curva característica de una bomba es una representación gráfica de la relación entre la altura y caudal que entrega una bomba a una RPM determinada (Ilustración 1-8). Del mismo modo, se pueden construir curvas que relacionan la potencia requerida y el $NPSH_R$ con las RPM. Muchas veces dentro del mismo gráfico existen varias curvas que dependen del tamaño del impulsor.

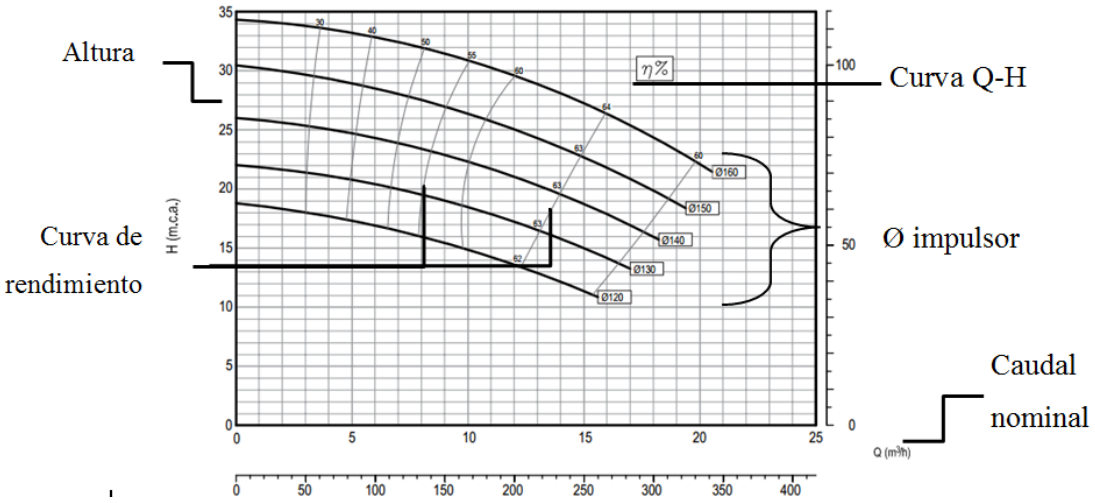


Ilustración 1-8 Curva Característica Q-H

Si se tienen los parámetros de operación, se puede seleccionar la bomba adecuada gracias a la curva que entrega el fabricante. La curva debe indicar:

- Punto de máxima eficiencia.
- Curvas de iso-eficiencia.
- Una curva para cada diámetro de impulsor admisible por el modelo de la bomba.
- Altura neta de succión positiva.

Una bomba centrífuga que funciona a velocidad constante, proporciona un caudal variable entre cero a un máximo determinado, dependiendo de las condiciones de altura de columna de descarga, de diseño del piping y de la altura de succión. El rendimiento de la bomba se muestra comúnmente por medio de curvas, que son una representación gráfica de la relación entre (a) la potencia requerida para bombear un caudal determinado, o (b) la presión de descarga para un caudal específico.

Para sistemas de bombeo pequeños, sólo el relevante la relación entre la presión de salida y el caudal, pero para sistemas de bombeo más grandes, es de suma importancia económica contar con datos como eficiencia, potencia requerida, entre otros parámetros característicos de la bomba.

1.1.3.2 **Curva del sistema**

La curva del sistema es inversa al de la bomba, es decir, a mayor caudal, mayor presión. Esto se explica porque a mayor caudal, las pérdidas por roce aumentan. Si se analiza el comportamiento de una bomba dentro de un sistema, se deben tener en consideración algunos parámetros claves:

Del fluido a transportar	De las tuberías:	De los accesorios:
○ Densidad (ρ) ○ Viscosidad cinemática (ν) ○ Peso específico (ϒ) ○ Temperatura (T°) ○ Presión de vapor. (p_v)	○ Longitud de la tubería (L) ○ Diámetro de tuberías (D) ○ Rugosidad (k_s)	○ Número de válvulas, codos, filtros, etc

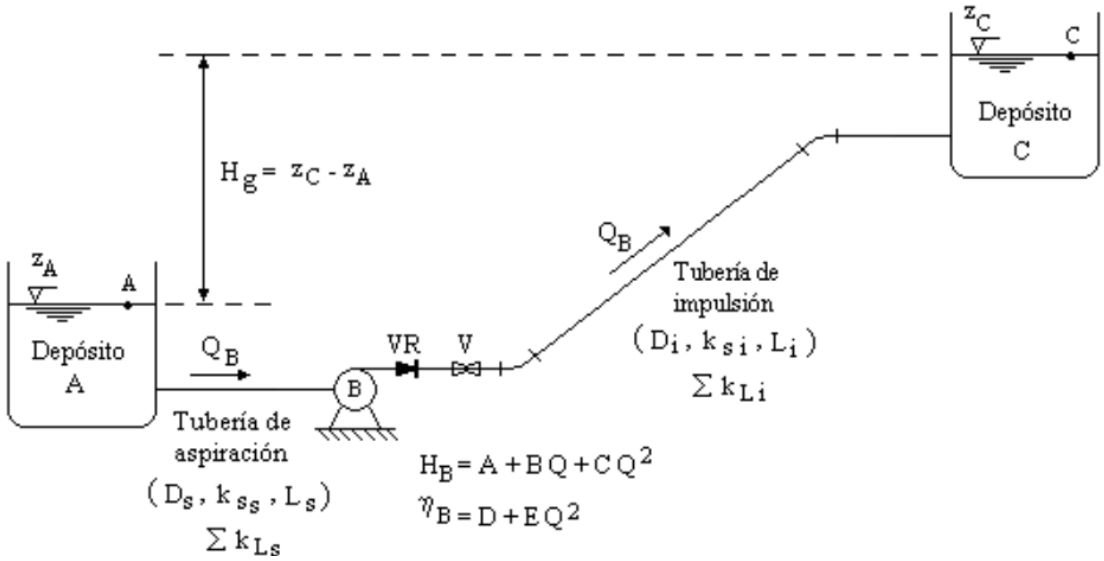


Ilustración 1-9 Esquema de instalación de una bomba

La influencia de todos los factores se ve reflejada en la curva del sistema. Los factores del fluido incluyen directamente en el $NPSH_D$ y la cavitación. Los factores referentes a la tubería y los accesorios tienen relación con las pérdidas de carga del sistema. Es de suma importancia dimensionar la bomba adecuada para cada curva del sistema.

Por ejemplo, en el sistema de la Ilustración 1-9 la curva sería la siguiente.

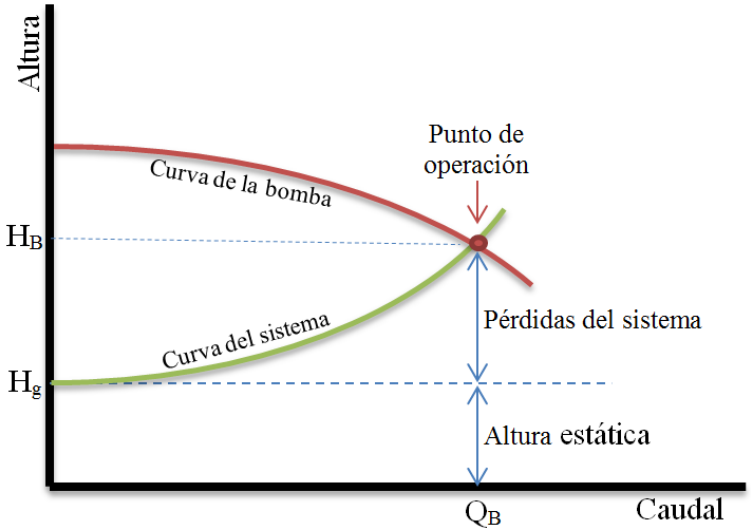


Ilustración 1-10 Curva del sistema

1.1.4 **Conexión de múltiples bombas**

Las bombas se utilizan para desplazar fluidos en un sistema, ya sea a la misma altura o a una altura mayor, no obstante, bajo ciertas condiciones se utiliza para bombear a alturas menores. El caudal de bombeo depende de la altura a la que se descarga el fluido. Cada bomba tiene una relación altura-caudal que es inversamente proporcional. Es decir, a mayor altura de bombeo menor será el caudal y viceversa.

Existen muchos casos en que una sola bomba no puede entregar el caudal o la presión necesaria para un sistema en particular. En dichas situaciones se pueden conectar dos o más bombas en serie o paralelo según la necesidad. Para aumentar la presión de descarga, manteniendo el caudal constante, se debe conectar dos o más bombas en serie. Por otro lado, manteniendo la altura o presión de descarga constante, conectar dos o más bombas en paralelo aumentaría el caudal

La lógica indicaría que si se combinan dos bombas en serie, el sistema de bombeo producirá el doble de presión para un caudal dado. Del mismo modo, si dos bombas se combinan en paralelo, se espera que el sistema de bombeo entregue el doble caudal. Sin embargo, en la realidad esto no ocurre, porque al aumentar la velocidad del flujo aumentan las pérdidas de carga. Según la ecuación de Darcy-Weisbach, la perdida aumenta al cuadrado respecto al caudal.

$$h_f = \left(f \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}\right) \cdot L \cdot Q^2 \tag{1-1}$$

Dónde

h_f	=	pérdida de carga debida a la fricción.	[m]
f	=	factor de fricción de Darcy.	[-]
L	=	longitud de la tubería.	[m]
D	=	diámetro de la tubería.	[m]
V	=	velocidad media del fluido.	[m/s]
g	=	aceleración de la gravedad ≈ 9,80665	[m/s².]

1.1.4.1 **Sistemas con bombas en serie.**

Instalar más de una bomba centrífuga y conectarlas en serie, o conectarlas a lo largo de una sola línea, permite aumentar la altura de descarga o presión de salida, manteniendo el caudal. Es el mismo principio de las bombas multietapa.

En la Ilustración 1-11, la bomba 2 tiene mayor capacidad que la bomba 1. Para determinar la presión de descarga de ambas bombas se suman las presiones generadas por cada bomba al mismo caudal Q_a. De ahí se deriva que cuando se alcanza el caudal máximo de la bomba 1 Q_b se encuentra el punto crítico de funcionamiento (I_s). Cualquier caudal superior a ese, hará que la bomba 1 produzca energía a partir del exceso consumo de la bomba 2, disminuyendo el rendimiento de la instalación (curva roja)

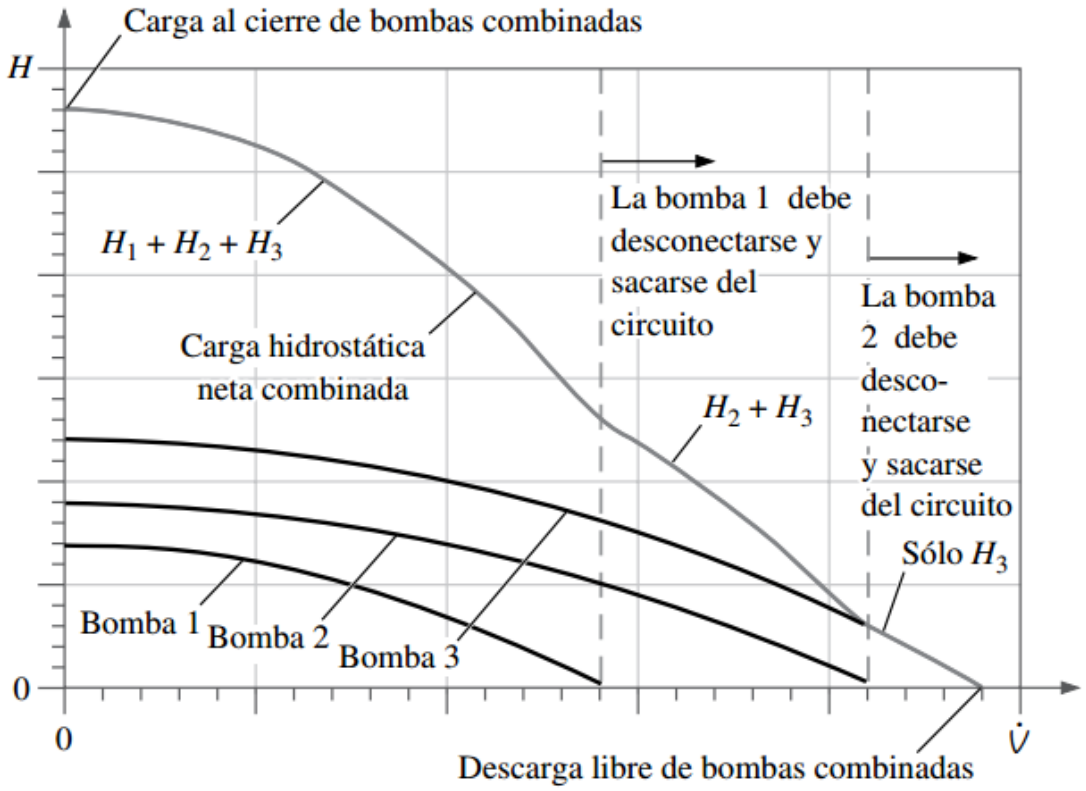


Ilustración 1-11 Curva de bombas en serie.

1.1.4.2 **Sistemas con bombas en paralelo.**

Como ya se ha mencionado, dos bombas en paralelo aumentan el caudal. Al conectar dos bombas de distinta capacidad, se debe operar a la presión máxima de la bomba de menor capacidad. La resistencia al interior de la tubería aumenta al aumentar la velocidad del flujo (fórmula de Darcy-Weisbach), por lo que poner dos bombas no aumentará al doble el caudal (Ilustración 1-12).

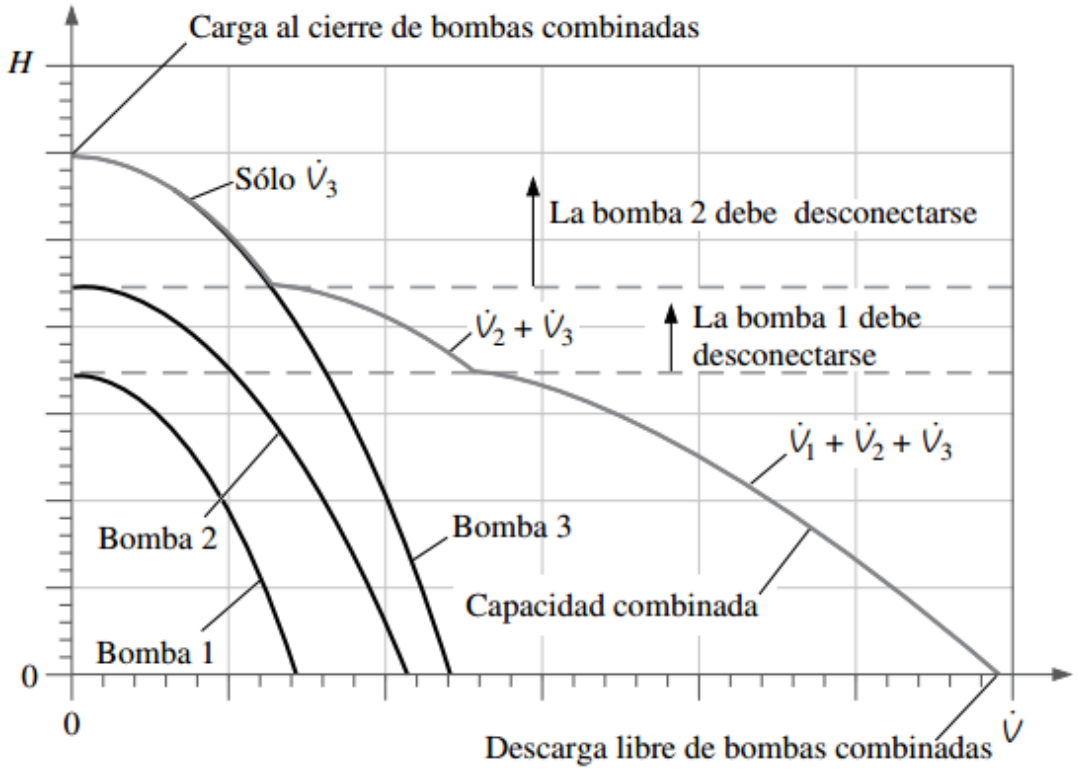


Ilustración 1-12 Curva de bombas en paralelo.

1.1.5 **Leyes de semejanza**

Ya se mencionaron las curvas características de las bombas. El fabricante, a un número n_1 de revoluciones garantiza un caudal q_1, una presión h_1 y una potencia P_1. Muchas veces se desea trabajar en otro punto de operación. Si fuese necesario, por ejemplo, un menor caudal, existen tres soluciones.

1. *Restringir el paso con una válvula de flujo*. Esta solución es poco eficiente, pues se sigue utilizando la misma energía para bombear menos agua.
2. *Disminuir el diámetro del impulsor*. Solución útil, siempre y cuando la necesidad de caudal haya disminuido por un tiempo indefinido, no solo puntualmente.
3. *Disminuir las revoluciones de la bomba*. Es la mejor forma de controlar un caudal que debe variar en el tiempo.

El ejercicio anterior puede ser analizado desde el punto de vista de la presión de descarga. ¿Cómo varia la presión en función de las RPM? Es aquí, donde toman relevancia las leyes de semejanza.

1.1.5.1 **Leyes aplicables variando RPM**

Los variadores de frecuencia son sistemas de control de motores de corriente alterna que permiten regular la velocidad de giro. Así, utilizando las leyes de semejanza, los parámetros entregados por el fabricante y un variador de frecuencia, se puede encontrar la velocidad de giro óptima para las necesidades de la instalación, minimizando el consumo de energía eléctrica al optimizar la potencia teórica de la bomba.

Las ecuaciones (1-1),(1-2) y (1-3) indican la relación entre las revoluciones y el caudal, presión y potencia consumida por una bomba respectivamente.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \qquad (1\text{-}1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \qquad (1\text{-}2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \qquad (1\text{-}3)$$

1.1.5.2 Leyes en función del diámetro de impulsor.

Los fabricantes de bombas entregan curvas características con distintos diámetros. Si las necesidades de la instalación cambian de forma permanente, y no existe un variador de frecuencia, otra opción para optimizar el funcionamiento de la bomba es cambiar el diámetro del impulsor. Esta opción solo debe ser considerada si las necesidades de flujo de la instalación disminuyen de forma permanente. Por ejemplo, se elimina una parte del proceso, disminuyendo el requerimiento de agua. Las ecuaciones (1-4), (1-5) y (1-6) describen la relación entre el diámetro del impulsor y el caudal, presión y potencia respectivamente.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \qquad (1\text{-}4)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \qquad (1\text{-}5)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \qquad (1\text{-}6)$$

En la práctica, la aplicación de las leyes de semejanza permite bajar los costos de operación y mantención, adecuando los parámetros de la bomba a los requerimientos de la instalación. Las ecuaciones de semejanza entregan un valor teórico, pues todo depende del rendimiento de la bomba hidráulica. Independiente de lo anterior, si la instalación lo permite, una reducción de un 20% en las RPM de la bomba, permite ahorrar casi un 50% de energía.

1.2 Base teórica de control y automatización.

1.2.1 Conceptos de Control y automatización

El principio de todo sistema de control automático es la aplicación del concepto de realimentación o feedback, cuya característica principal es la de mantener al controlador central informado del estado de las variables para generar acciones correctivas cuando así sea necesario.

Un controlador, cualquiera sea su tipo, tiene entradas para sensores y salidas para actuadores. Las señales de entrada se procesan para crear una respuesta y por ende, una señal de salida. El control del proceso busca que las variables de interés tengan error cero respecto a un valor de referencia o Set Point.

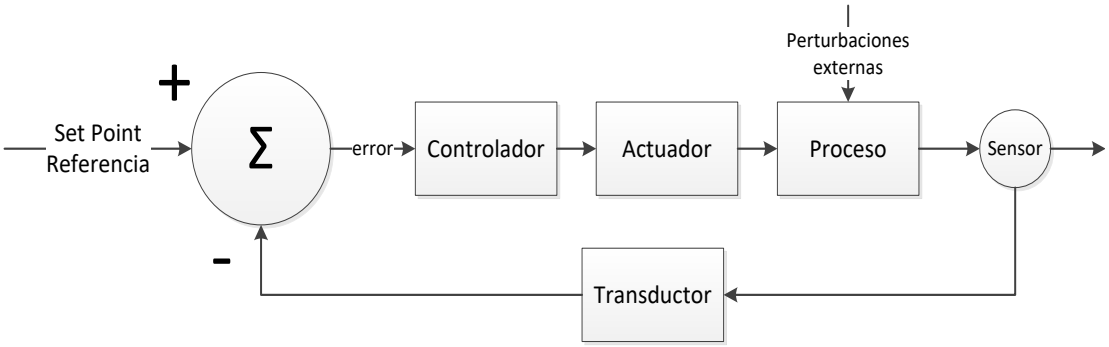


Ilustración 1-13 Esquema de control

Automatizar un proceso no necesariamente implica controlar dicho proceso. Automatizar implica sistematizar procesos y subprocesos, de modo que se hagan de forma automática, sin interacción directa del hombre, pero no se asegura que necesariamente se obtengan los resultados esperados. A modo de ejemplo, se puede automatizar un sistema de regadío que riegue un litro de agua al día, pero eso no asegura que las plantas reciban ese litro de agua en sus raíces (se puede romper la tubería, cortar el suministro de agua, etc). Si se deseara controlar el mismo proceso, se debería incorporar un sensor de humedad, definir un valor de humedad deseado y el controlador tendría la retroalimentación necesaria para liberar la cantidad precisa de agua de modo que las raíces reciban la cantidad deseada.

1.2.1.1 **Modos de control**

Un controlador es un dispositivo cuya función principal comparar el valor de una variable con un valor de referencia establecido. El dispositivo genera señales de respuesta en función de la diferencia entre los dos valores. Los modos de control utilizados para generar la respuesta o acción de control pueden ser:

Modo de control	Característica
De dos posiciones u ON-OFF.	Normalmente son interruptores, de bajo costo. La señal enciende o apaga un proceso. Por ejemplo, llenar un estanque cuando llega a un mínimo y detener el llenado cuando llegue a un máximo.
Proporcionales	Un cambio en la entrada produce inmediatamente una respuesta proporcional de salida. En el ejemplo del estanque, este modo de control iguala el caudal de salida con el de entrada. De ese modo, mientras más agua sale, más agua entra al estanque.
Integrales	La acción de control depende de la desviación de la variable y del tiempo que se mantiene esta desviación. Es un modo de reacción lenta, pues necesita que se acumule error para generar una acción de control.
Proporcionales-integrales	El control proporcional actúa de forma instantánea, mientras que la parte integral actúa durante un instante de tiempo, hasta que se anule el error. Se utiliza cuando el error varía lentamente en el tiempo.
Proporcionales-derivativos	El control derivativo siempre opera en conjunto a un control proporcional. La respuesta es proporcional a la rapidez con la que varía la señal de entrada.
Proporcionales-integrales-derivativos	Es la unión de los dos controles anteriores. Ofrece una respuesta rápida e inmediata a errores, pero es propenso a oscilar y es difícil ajustar los parámetros de control.

1.2.1 Tipos de controladores

1.2.1.1 Controlador Lógico Programable (PLC)

Un PLC es un dispositivo programable que guarda instrucciones lógicas para automatizar y/o controlar un proceso. Es capaz de ejecutar funciones de conteo,

comparación, aritméticas, sincronización, entre otras. Son dispositivos muy robustos, diseñados para operar en ambientes industriales, sometidos a ruido eléctrico, vibraciones, altas temperaturas, etc.

Ilustración 1-14 Ejemplos de PLC

Para ingresar la información a la memoria del PLC se utilizan software, generalmente de la misma marca del PLC, en donde en un entorno gráfico de combinan contactos, bobinas y funciones especiales para dar vida al programa.

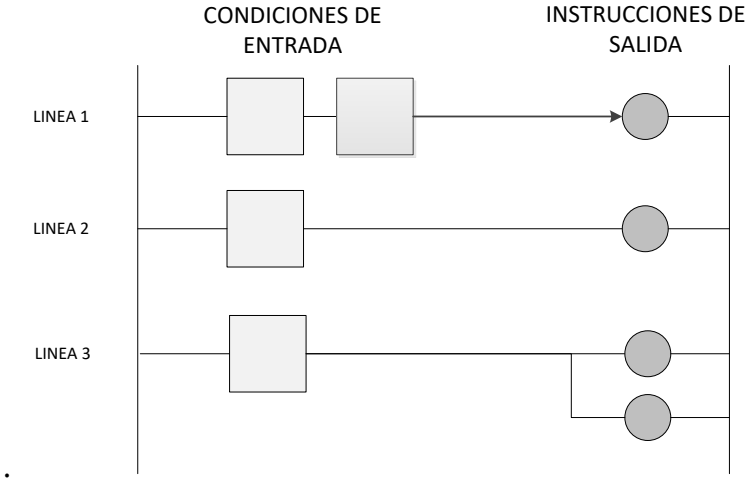


Ilustración 1-15 Diagrama laader

Volviendo al ejemplo del sistema de regadío, una condición de entrada sería “bajo nivel de humedad”. Si se cumple, se cierra el contacto y activa el relé que enciende la bomba de agua. Cuando se alcanza el nivel deseado, se abre el contacto y por lo tanto se desactiva el relé, apagando la bomba.

1.2.2 **Microcontrolador Arduino**

Arduino es un conjunto de hardware y software de código abierto, utilizado para controlar diferentes sistemas y al igual que un PLC, tiene entradas, salidas y un microprocesador. Actualmente es empleado ampliamente a nivel estudiantil, pero en menor grado a nivel industrial por la inestabilidad y poca compatibilidad con sistemas y protocolos industriales (Ver Ilustración 1-16 Arduino UNO).

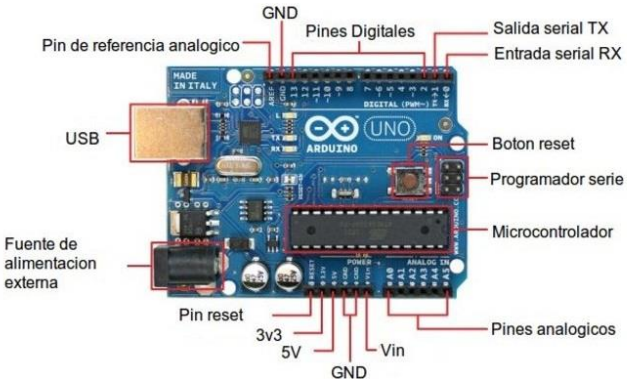


Ilustración 1-16 Arduino UNO

La placa Arduino, modelo UNO, tiene 14 entradas o salidas, en las que se puede conectar cualquier señal digital entre 0 y 5 volt. Dispone también de 6 entradas analógicas que trabajan en el mismo voltaje. Para la comunicación con otros dispositivos se pueden usar los pines RX – TX, SPI o utilizar el protocolo I^2C de Phillips

La mayor parte de los sensores y actuadores industriales trabajan con señales de a 24V y/o 4-20mA. Para hacer compatibles las señales entre arduino y los equipos industriales, se deben convertir las señales, mediante conversores específicos.

Existe también una versión industrial de Arduino. Esta versión tiene incorporados los conversores necesarios para ser compatible con equipos industriales. Además tiene un módulo Ethernet para comunicaciones vía internet.

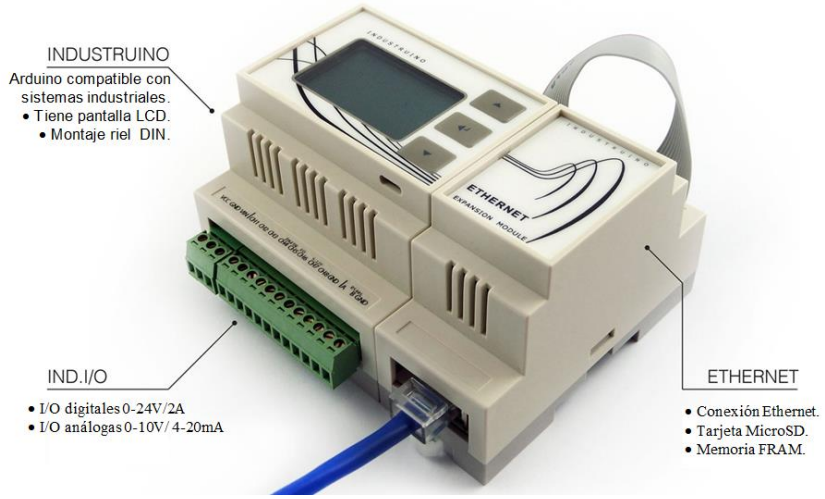


Ilustración 1-17 Industruino

Entre las ventajas de utilizar esta plataforma destacan:

- Bajo costo: En comparación a otro sistema de control por microcontrolador, Arduino y sus accesorios son de muy bajo costo. Existen módulos con valor menor a USD50
- Entorno simple de programación: El entorno es simple y claro. Si bien no tiene relación con esta memoria, bastará decir que la programación se realiza a un alto nivel, es decir, existen partes críticas del código que ya están predefinidas.
- Código abierto: Existen muchas librerías y partes de códigos disponibles en la web bajo licencia open-source, listas para ser implementadas.
- Multiplataforma: El software arduino puede ser ejecutado desde distintos sistemas operativos (Win, Linux, OSX).

1.2.3 Sistemas SCADA

SCADA, o del inglés supervisión, control y adquisición de datos, es un software por el cual es posible controlar y supervisar de forma remota procesos industriales. El software se puede implementar en computadores o pantallas HMI, utilizando un entorno especialmente diseñado para cada aplicación.

1.2.3.1 **Proceso de adquisición datos con SCADA**

La finalidad de un sistema SCADA es poder controlar variables dentro de un proceso. Para obtener la variable a controlar, se deben convertir las magnitudes físicas en magnitudes eléctricas y referenciarlas para que el sistema pueda interpretarlas. Para ello se utilizan transductores, los cuales transforman las variaciones de un fenómeno físico (presión, temperatura, flujo, etc) en una señal eléctrica. Las señales más utilizadas son de voltaje, corriente, resistencia y capacitancia. Además, la señal debe ser acondicionada, es decir referenciada, aislada y filtrada. Referenciada se refiere a que la señal eléctrica se asocia a una escala que representa la magnitud física (por ejemplo 0V es 0 bar y 10V es 1bar). Los datos que transmite esta señal, son almacenados en un computador para su posterior análisis y mostrados por pantalla mediante una aplicación gráfica. Sobre la base de ésta información, el operario puede intervenir el proceso o dejar que el sistema actúe según una rutina programada.

1.2.3.2 **Ventajas de SCADA**

Muchas son las ventajas de un sistema SCADA correctamente implementado, entre las que destacan:

- Tener retroalimentación del proceso en tiempo real.
- Automatización del control en procesos críticos.
- Almacenamiento virtualmente ilimitado de datos del proceso.
- Detección temprana de fallas y errores.
- Tomar acciones de control a distancia.
- Telemetría de variables.
- Integración de sistemas de control, pudiendo controlar complejos procesos desde un solo punto.

1.3 Bancos de prueba existentes en la industria.

Existen principalmente dos tipos de bancos de prueba: industriales y experimentales. Los primeros permiten caracterizar la bomba hidráulica ensayada, bajo los parámetros determinados en la norma ISO 9906. Por otra parte, los bancos de prueba experimentales no necesariamente deben cumplir con la norma a cabalidad, pero su flexibilidad hace posible estudiar las bombas en serie o paralelo, estudiar la influencia de la altura de aspiración o determinar la relación de flujo-presión, entre otros parámetros de interés.

La Ilustración 1-18, muestra el banco de prueba de bombas de la empresa francesa DELTALAB-SMT. Permite realizar pruebas hasta 6bar de presión. Es un banco de tipo experimental, diseñado para la instrucción de estudiantes, y por lo mismo no está diseñado para un rápido intercambio de bombas.

Ilustración 1-18 Banco de prueba de bombas serie/paralelo, modelo PS73

KSB Chile es una empresa que importa y comercializa, entre otros productos, bombas centrifugas. El año 2009 diseñó e implementó un moderno laboratorio para probar bombas de diversos tipos, con capacidad para bombear 100 [lts/s] y alcanzar presiones de hasta 40 [bar]. Este es un claro ejemplo de un laboratorio industrial, diseñado especialmente para disminuir los tiempos de intercambio de bomba hidráulica.

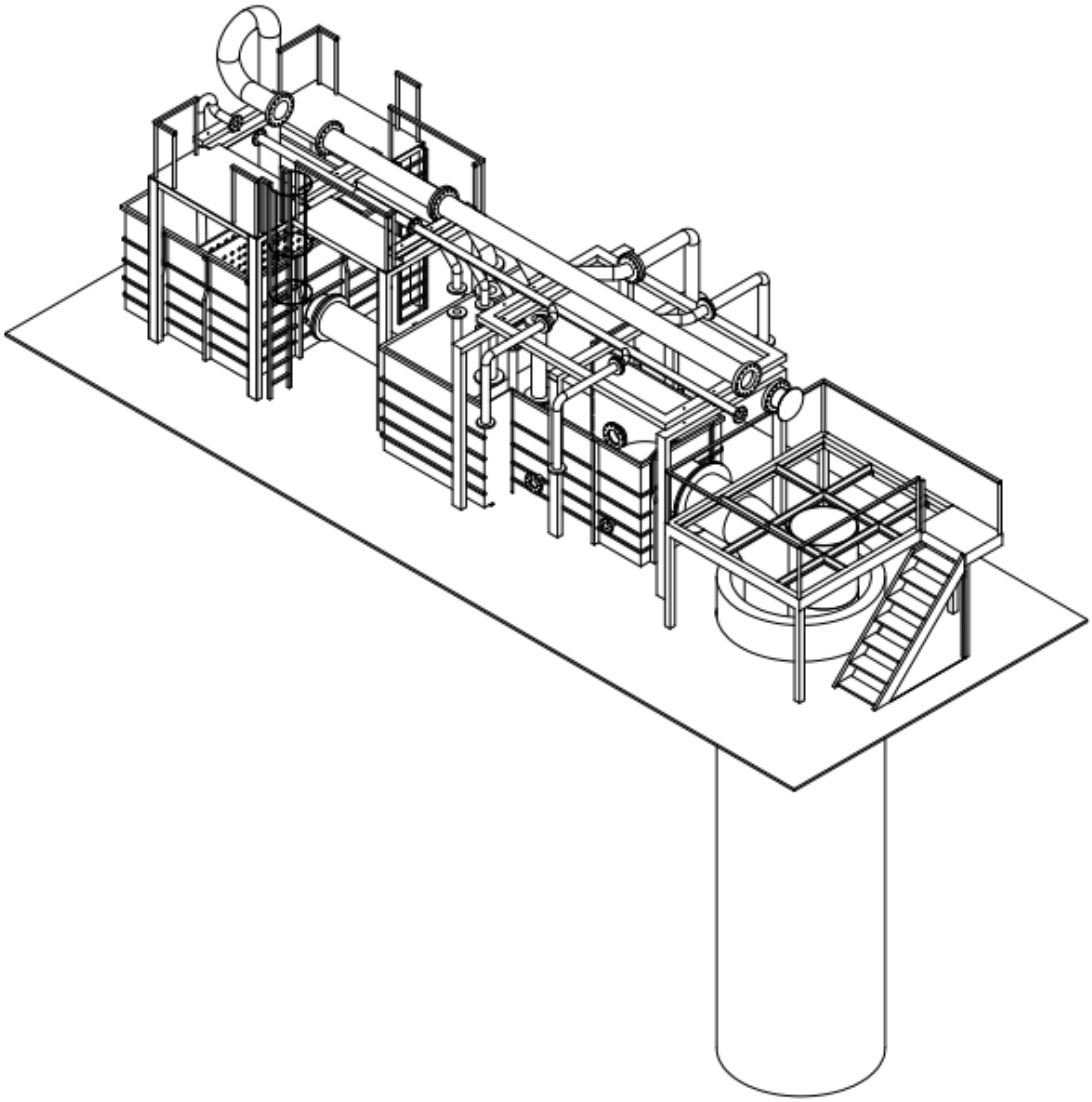


Ilustración 1-19 Banco de pruebas KSB

1.4 Normativa aplicable a bancos de pruebas de bombas

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

- DIN 1944:1968 Acceptance tests on centrifugal pumps. Antigua norma alemana, que establece las pruebas a realizar en bombas centrifugas. Fue reemplazada por la norma ISO 9906.
- ASME PTC 8.2:1990 Centrifugal Pumps. Esta norma de la asociación americana de ingenieros mecánicos da las directrices para la realización y presentación de ensayos en bombas de agua de flujo axial. Describe los mecanismos para determinar: (a) presión máxima de descarga; (b) caudal; (c) potencia; (d) eficiencia y (e) los requisitos de altura de succión positiva neta de la bomba.
- ANSI/HI 14.6 Rotodynamic Pumps for Hydraulic Performance Acceptance Tests. Esta normativa es solo para aplicar en laboratorios y no en terreno y no contempla ningún accesorio incorporado en la bomba.
- ISO 9906:2012 Rotodynamic pumps -- Hydraulic performance acceptance tests -- Grades 1, 2 and 3. Esta norma específica las pruebas de rendimiento que deben realizar los fabricantes para garantizar sus bombas rotodinamicas. Debe ser aplicada en instalaciones o laboratorios donde se prueben bombas de agua de cualquier tamaño, que transporten agua limpia y fría. El Instituto Nacional de Normalización homologó esta norma, creando la NCh686-2011. Por lo mismo, esta será la norma directriz de este trabajo de título.

1.4.1 Características de la Norma ISO 9906:2012

Esta norma considera tres grados de precisión en los ensayos. En cada grado se admite mayor porcentaje de fluctuación de factores tales como incertidumbre de

medición, fluctuación permisible y factores de tolerancia. Grado 1 para alta precisión, grado 2 para media precisión y grado 3 para baja precisión . Cada grado es descrito en el anexo A, Tabla A-1 Valores permisibles de incertidumbres sistemáticas. La norma puede ser aplicada para una bomba aislada, así como para una bomba dentro de un circuito de piping, con accesorios aguas arriba y/o abajo.

1.4.1.1 **Condiciones de medición**

La norma exige que el flujo circulante en las secciones de medición cumpla con:

- Distribución simétrica de velocidad axial.
- Distribución de presión estática uniforme.
- La instalación y sus accesorios no deben producir remolinos al interior de las tuberías.

Estas exigencias aseguran una fluctuación controlada en las variables de interés. El rango de estas variables se describe en la Tabla A-2 Fluctuaciones permisibles.

1.4.2 **Ubicación de sensores**

Para realizar la prueba con Grado 1, se debe contar con un arreglo de sensores, como el que a continuación aparece.

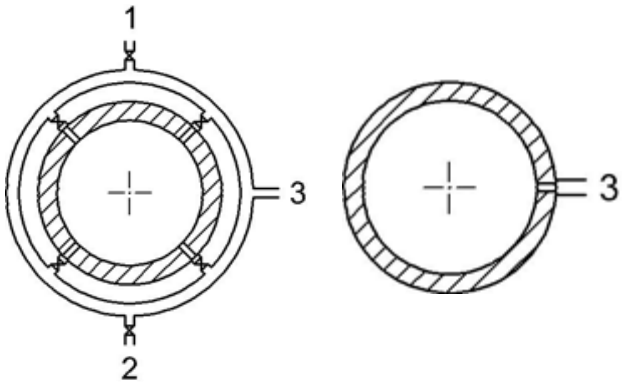


Ilustración 1-20 Distribución sensores de presión

El arreglo de sensores tanto en la succión como en la descarga, deben estar a una distancia de 2 veces el diámetro de la tubería de cualquier cambio de diámetro y/o fitting. La geometría de la perforación para insertar el manómetro o vacuometro debe cumplir con la geometría descrita en el Anexo B, Ilustración B-4. Se puede desglosar en los siguientes puntos:

- *Alineación:* En la descarga, la toma de presión debe ubicarse en un plano perpendicular al de la voluta o cualquier curva que tenga la bomba.
- *Ubicación:* Estar ubicadas a una distancia de 2 veces el diámetro de la tubería.
- *Geometría de las tomas de presión/vacío:* El orificio donde se acoplan los instrumentos de medición debe tener las siguientes dimensiones referente a la Ilustración 1-21:

$$l \geq 2{,}5\, d \qquad r \leq d/10$$

donde d = min{3 a 6mm, 1/10 del diámetro de la tubería}

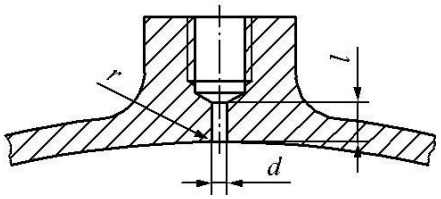


Ilustración 1-21 Geometría tomas de presión/vacío

1.5 Estado actual del banco de pruebas.

Se realiza un levantamiento de los equipos y componentes instalados, analizando el estado y funcionamiento de cada elemento. La Ilustración 1-22 muestra los equipos disponibles actualmente, que serán descritos ampliamente en el siguiente punto.

Ilustración 1-22 Laboratorio actual

El actual banco de prueba de bombas cuenta con un motor de corriente continua que mueve una única bomba centrifuga. Tiene válvulas manuales y automáticas, encontrándose las últimas no operativas.

Al comparar el diseño de las tuberías, codos y accesorios con la norma que rige este tipo de instalaciones (ISO9006:2012) se advierten numerosas discordancias. Muchas de ellas afectan directamente al proceso de medición y obtención de datos. Otras, ciertamente ponen en riesgo la integridad de los operadores y deben ser mejoradas con suma urgencia.

Las principales deficiencias encontradas son:

- El control de velocidad de la bomba se realiza mediante un reóstato que no está protegido contra contactos directos de líneas de tensión.
- Los manómetros y vacuometros análogos están instalados en lugares de difícil acceso y visualización, facilitando errores de lectura por parte del operador.
- Los instrumentos digitales no están conectados a ningún indicador. Además, su ubicación física no cumple con la normativa actual.
- No hay base captadora de fluidos, pudiendo las múltiples fugas de fluido en codos y bridas causar caídas de las personas que circulan.
- Válvulas de paso en posiciones no ergonómicas.

- Las líneas de tensión no tienen voltímetro ni amperímetro incorporado.
- Existen tuberías, válvulas, cables y accesorios sin utilidad aparente.

1.5.1 La Bomba y su motor.

El laboratorio utiliza una bomba centrifuga de una etapa, marca Vogt, serie N, modelo 626, con un rodete de Ø180 [mm]. El diámetro de entrada de la tubería es de 3´´ y el de salida es de 2 ½´´

Ilustración 1-23 Bomba Vogt N626

El motor que impulsa la bomba es de marca Conts, de corriente continua, entregando 11kW de potencia, con un máximo de 3000RPM.

Ilustración 1-24 Motor Conts

Marca	Conts
Alimentación	VCC
Voltaje	400 V
Corriente	39,5 A
Potencia	11 kW
RPM	3000 RPM

Con esa configuración, el conjunto alcanza una presión de descarga de 42 m.c.a. y 105 m^3/h (Catálogo Vogt Serie N, pág. 19).

Las revoluciones del motor se controlan de forma manual, mediante un reóstato lineal. La manipulación de este componente implica un Riesco para su operario.

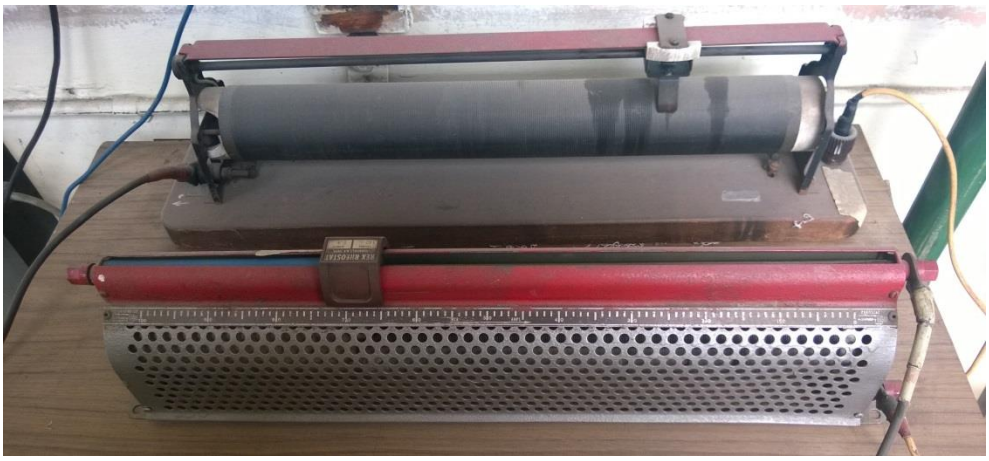


Ilustración 1-25 Reóstato control RPM

1.5.2 **Estanque de acumulación**

El estanque de acumulación se utiliza para determinar fielmente el caudal desplazado por la bomba. Se mide el tiempo en llenar el estanque hasta alcanzar un volumen conocido.

Ilustración 1-26 Estanque de acumulación

1.5.3 **Sistema de tuberías y válvulas**

Las tuberías son de acero al carbono de 3 pulgadas en la succión y variados diámetros en la descarga. Existen sistemas de tuberías instaladas que no son utilizadas y solo generan perturbaciones en las mediciones y turbulencia en la red.

La línea de descarga del sistema tiene instalada una válvula de mariposa, con accionamiento automático (eléctrico) y manual. Durante la ejecución de la experiencia de laboratorio, un operario mueve manualmente la válvula para restringir la descarga de la bomba.

Ilustración 1-27 Sistema de tuberías actual

Ilustración 1-28 Válvula L.Bernard

1.5.4 **Sensores y captadores de datos.**

Los indicadores de presión análogos, siendo calibrados periódicamente por personal de la Universidad. El vacuómetro análogo se ha instalado en la posición recomendada por la norma ISO9906, pero no se puede decir lo mismo respecto al presostato de descarga. Sobre la ubicación donde debería estar instalado el presostato, existe una Tee que deriva el flujo hacia una tubería sin salida. Asimismo existen transductores electrónicos, los que no se encuentran conectados a sus respectivos indicadores. Los instrumentos digitales instalados son:

- Totalizador de caudal marca TRIMEC.
- Vacuometro marca Bailey Fischer & Porter.
- Transmisor de presión marca Veto.
- Transmisor de presión marca Nuova Fima.

Ilustración 1-29 Vacuómetro actual

Ilustración 1-30 Totalizador de Flujo

Ilustración 1-31 Transmisor de presión.

Ilustración 1-32 transductor de vacío

Ilustración 1-33 Transductor de presión

Ilustración 1-34 Voltímetro y amperímetro usado actualmente

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE INGENIERÍA

El banco de pruebas se diseña para operar con dos bombas independientes que pueden operar en serie o en paralelo. Cada una es independiente de la otra, gracias a la integración de dos circuidos de control independiente. El rango de trabajo que define los materiales, accesorios e instrumentos es el descrito en la Tabla 2-1.

Característica	Rango	
Voltaje trifásico	380	V
Potencia máxima de bomba	5 – 15	kW
Presión máx.	150	m.c.a.
Caudal máx.	5 – 150	m^3/h
	1,4 – 42	lts/s

Tabla 2-1 Rango de trabajo laboratorio

La bomba 1 no tiene uniones flexibles ya que no se contempla el intercambio de ella. Por ser un laboratorio para probar bombas y equipos, se consideran uniones flexibles para facilitar el eventual cambio de bomba 2.

2.1 Selección de elementos del sistema

Los elementos a utilizar en este banco de prueba son descritos a continuación. Se debe tener presente que muchos elementos se pensaron para funcionar con y sin control automático.

2.1.1 Bombas centrifugas

Se diseña el laboratorio para operar con dos bombas VOGT NM40-160. Este modelo es el que reemplaza a la descontinuada bomba VOGT N626. Esta bomba alcanza un máximo de 46 [m.c.a.] y 60 [m^3/h]. Las curvas se encuentran en el Anexo B, Ilustración B-1.

2.1.2 Piping

El piping del laboratorio se diseña para cumplir con las siguientes presiones máximas:

Tramo	Presión
Succión bomba 1 y 2	-0,7 Bar
Interconexión bomba 1-2	10 Bar
Descarga bomba 1 y 2	15 Bar

Las presiones de diseño de este laboratorio permiten el uso de tuberías de PVC PN10 en la succión y en algunas partes de la descarga. Será de acero al carbono Schedule 10, según la norma ASTM A-795, el tramo comprendido entre la reducción de succión de la bomba y la válvula de paso ubicada en la descarga. Las características de las tuberías de utilizadas aparecen en Tabla A-3 y Tabla A-4.

En la bomba N°2 existen tramos de tubería de goma, utilizados para facilitar el intercambio de la bomba original por alguna otra que se desee someter a ensayo. En la succión se utiliza manguera de EPDM de 3 pulgadas de diámetro con refuerzo múltiple espiral y textil, con alambre helicoidal, serie 4450. Esta manguera está diseñada para succión en bombas. Por otra parte, en la descargar se utiliza manguera de goma sintética serie Baldrill 300PSI de la empresa Balflex, diseñada para trabajar a 20 bar de presión.

El diagrama unilineal se puede ver en Ilustración B-2 Diagrama unilineal del anexo B

2.1.3 **Válvulas**

2.1.3.1 **Válvula de pie**

La válvula de pie va ubicada al comienzo de la línea de succión y su función es impedir que se vacíe la tubería cuando no se utiliza el laboratorio. De ese modo la bomba se mantiene siempre cebada. El modelo propuesto el de la Ilustración 2-1.

Ilustración 2-1 Válvula de pie marca RASTELLI, de 3"

2.1.3.2 **Válvula de mariposa con control manual.**

Este tipo de válvulas se utilizan en todo el sistema de tuberias del laboratorio, salvo en la descarga de la bomba N°2. Está fabricada en fierro fundido y es compatible con flanges de norma DIN y ANSI. El sello es de material elastomérico.

Ilustración 2-2 Válvula mariposa, marca Tyson, PN16, 3pulg.

2.1.3.3 **Válvula de mariposa con control eléctrico y manual.**

Se encuentra solo en la descarga de la bomba N°2. Es una válvula de accionamiento eléctrico y manual, con paso variable. Los usuarios del laboratorio podrán interactuar directamente, cerrando el paso de agua de forma manual o teleoperarlo con el control eléctrico ubicado en el tablero de control.

Ilustración 2-3 Válvula automática y manual DynaFly 90

2.1.4 **Sensores e instrumentación.**

Los sensores e instrumentos deben poder conectarse a algún sistema de control automático. El requerimiento mínimo para los sensores es que tengan señal de salida de 4-20mA y funcionen con 24V o 220V

2.1.4.1 **Flujometro.**

Por continuidad, el caudal de entrada y salida son iguales. Se decide instalar el flujómetro a la salida de la bomba, pues el diámetro es menor y por ende el costo del instrumento será menor.

Instrumento	:	Flujometro electromagnético digital.
Rango	:	5 – 150 m^3
Material	:	Acero al carbono.
Conexión	:	Flange conexión 3”.

Ilustración 2-4 Flujometro 3"

2.1.4.2 **Transductor de presión.**

Se proponen dos modelos.

	Succión	*Descarga*
Modelo	Veto C9000121	Veto C9020211
Rango	-1 – 0 bar	1 – 10 bar
Exactitud	+ 0,5% rango total	
Salida	4-20 mA	
Conexión	½ HE NPT	
Material	Acero Inox. 316	

2.1.5 **Tablero de potencia y control.**

El tablero de potencia alberga todos los componentes de seguridad propios de este tipo de instalación, así como dos variadores de frecuencia de 15kW

El tablero de control incluye potenciómetros de control de válvulas y variador de frecuencia de las bombas. También incluye indicadores de las variables de control.

Los indicadores mínimos que debe tener el tablero incluyen:

- 2 voltímetro
- 1 amperímetro por fase.
- 1 indicador de vacío por bomba.
- 1 indicador de presión por bomba.
- 1 indicador de flujo por bomba.
- 1 horometro por bomba.

El esquema de control y el diagrama PID se encuentran en la Ilustración B-3 Diagrama PID, del anexo B

2.2 **Geometría de partes y componentes críticos**

Las dimensiones, cotas y geometrías propuestas en esta memoria son en su mayoría referenciales. Sin embargo, existen componentes cuyas dimensiones y geometrías deben respetarse para cumplir con la norma que rige este tipo de instalaciones. Las partes críticas fueron descritas en la sección 1.4.

2.2.1 **Secciones de medición de presión**

Las secciones donde se mide presión o vacío, deben cumplir con la geometría descrita en el Anexo B, Ilustración B-4. Se puede desglosar en los siguientes puntos:

- *Alineación:* En la descarga, la toma de presión debe ubicarse en un plano perpendicular al de la voluta o cualquier curva que tenga la bomba.
- *Ubicación:* Estar ubicadas a una distancia de 2 veces el diámetro de la tubería. Es decir, el vacuómetro se ubica a 152[mm] de la bomba, flange incluido. Por

otra parte, el manómetro se debe ubicar a 127[mm] de la bomba, perpendicular al plano de la voluta.

- *Geometría de las tomas de presión/vacío:* El orificio donde se acoplan los instrumentos de medición debe tener las dimensiones indicadas en la Ilustración 2-5.

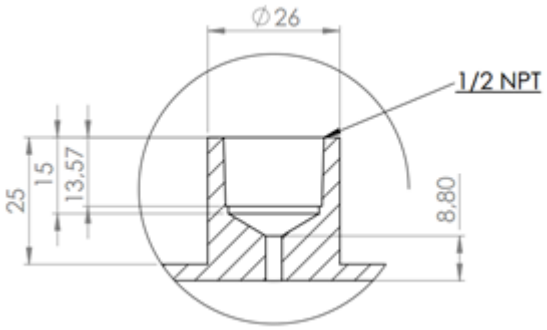
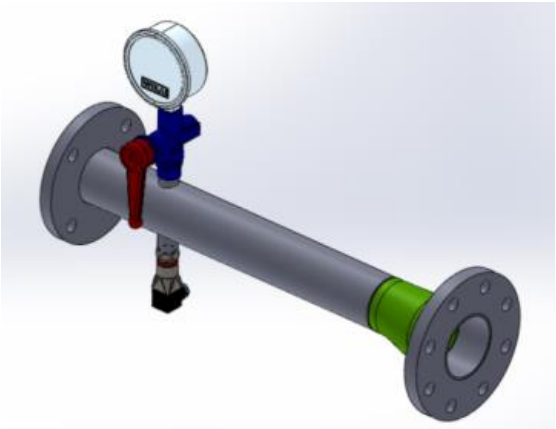


Ilustración 2-5 Dimensiones toma de presión

Solo con un fin pedagógico, se contempla el uso de un manómetro/vacuometro de reloj y un transductor para el control del sistema, ubicados a 180° uno de respecto a otro, indicados en la

Ilustración 2-6 e

Ilustración 2-7



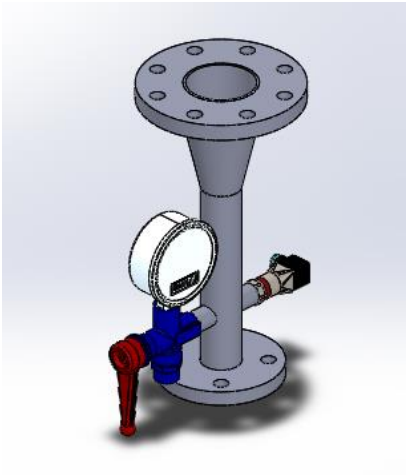


Ilustración 2-6 Toma de vacío *Ilustración 2-7 Toma de presión*

2.3 Cálculos que avalan el diseño

2.3.1 Determinación de pérdidas en accesorios.

Existen numerosos métodos empíricos para calcular la perdida de carga que ocurre en tuberías y accesorios. Esta pérdida se debe calcular para determinar correctamente la presión producida por la bomba.

Para determinar la pérdida de carga en accesorios se utiliza el método del coeficiente K, dónde la pérdida depende de la velocidad del flujo (Ingersoll-Rand, 1984)

$$h_L = \mathrm{K} \cdot \frac{V^2}{2g} \qquad (2\text{-}1)$$

Dónde

h_L	:	pérdida de carga	[m]
K	:	coeficiente empírico	[-]
V	:	velocidad media del flujo	[m/s]
g	:	aceleración de gravedad	[m/s^2]

Se confeccionan tablas, desarrollando la ecuación (2-1), obteniendo la perdida de carga de los accesorios proyectados en el laboratorio. Las tablas creadas son:

- Tabla A-6 Pérdida de carga en válvulas [m.c.a]
- Tabla A-7 Pérdida de carga en curvas [m.c.a]
- Tabla A-8 Pérdida de carga en tee y reducciones[m.c.a]

2.3.2 Determinación de pérdidas en tuberías.

Para determinar la pérdida de carga en tuberías, se utiliza la fórmula de Darcy-Weisbach, una de las formas más exactas. Inicialmente se deben calcular las siguientes funciones, necesarias para los pasos posteriores.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \qquad (2\text{-}2)$$

$$V = \frac{Q}{A} \qquad (2\text{-}3)$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \qquad (2\text{-}4)$$

Dónde

A	:	Área de la tubería	[m^2]
D	:	Diámetro.	[m]
Q	:	Caudal	[m^3/s]
V	:	Velocidad media del flujo	[m/s]
Re	:	Número de Reynolds	[-]
ν	:	Viscosidad cinemática del fluido	[m^2/s]

Para la siguiente etapa, se requieren los siguientes datos y constantes:

Viscosidad cinemática agua @20°C	ν =	$1{,}004 \times 10^{-6}$	m^2/s
Rugosidad PVC	ε =	$1{,}5 \times 10^{-6}$	m
Rugosidad Acero	ε =	9×10^{-5}	m

La pérdida de carga en tuberías está determinada por la pérdida característica h_i y la pérdida generada en cada accesorio. Se utiliza el método de Darcy-Weisbach para determinar las perdidas en tuberías definido por,

$$h_L = h_i \cdot L + \frac{V^2}{2g} \cdot \sum K_i \qquad (2\text{-}5)$$

dónde

h_i	:	perdidas características de la tubería	[m.c.a.]
L	:	longitud de tubería	[m]
K_i	:	factor K de cada accesorio.	[-]

La pérdida característica está definida según la ecuación (2-6)

$$h_i = f \cdot \frac{V^2}{2g \cdot D} \cdot L \qquad (2\text{-}6)$$

f	:	factor de fricción de Darcy- Weisbach	[-]
D	:	diámetro interno de la tubería	[m]
V	:	velocidad media.	[m/s]
g	:	aceleración de la gravedad	[m/s^2]
Q	:	caudal.	[m^3/s]
L	:	longitud	[m]

Para determinar el factor de fricción, se utiliza la ecuación (2-7) de Swamee-Jain. Esta ecuación requiere que el número de Reynolds y la relación ε/D estén dentro de ciertos rangos, con el fin de minimizar el error (<1%) respecto a la ecuación no explicita de Colebrook-White.

$$f = \frac{0{,}25}{\left[log\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 \cdot D} + \frac{5{,}74}{Re^{0{,}9}}\right)\right]^2} \qquad (2\text{-}7)$$

En el anexo B, en las tablas A10, A11, A12 y A13 se detallan los resultados al aplicar las fórmulas para tuberías de PVC y acero, en todos los diámetros y caudales que este laboratorio requiere. La

Tabla 2-2 resume las perdidas en cada caso

Tabla 2-2 Pérdida de carga h_i por ML en función del caudal en m.c.a.

m3/h	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
m3/s	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
PVC 3"	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,13	0,16	0,20	0,24	0,29	0,34	0,40	0,45	0,52
Acero 1 1/2"	0,12	0,45	0,99	1,74	2,71	3,89	5,28	6,88	8,70	10,72	12,96	15,41	18,07	20,95	24,03
Acero 2"	0,03	0,12	0,27	0,48	0,75	1,07	1,45	1,89	2,38	2,94	3,55	4,22	4,94	5,73	6,57
Acero 2 1/2"	0,01	0,04	0,10	0,17	0,26	0,38	0,51	0,66	0,84	1,03	1,25	1,48	1,74	2,01	2,31
Acero 3"	0,01	0,02	0,05	0,08	0,12	0,17	0,23	0,29	0,36	0,44	0,52	0,61	0,71	0,81	0,92

Los valores de la

Tabla 2-2 son por metro lineal. Se deben multiplicar por la longitud total de cada tubería y sumar las pérdidas en todos los accesorios. Estos cálculos se muestran según la configuración de las bombas:

- Trabajando en paralelo: Tabla A--14, Tabla A-15, Tabla A-16 y Tabla A-17.

- Trabajando en serie: Tabla A-18, Tabla A-19, Tabla A-20, Tabla A-21 y Tabla A-22

2.3.2.1 **Determinación de NPSH disponible.**

Para que una bomba experimente cavitación, el $NPSH_d$ debe ser menor que el $NPSH_R$. El valor del $NPSH_D$ disminuye a medida que aumenta el caudal a causa del aumento de pérdidas en tuberías y accesorios.

La ecuación (2-8) resulta de aplicar la ecuación de Bernoulli entre el estanque de acumulación y la entrada de la bomba.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{{V_1}^2}{2g} + z_1 + h_B = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{{V_2}^2}{2g} + z_2 + h_T + h_L \qquad (2\text{-}8)$$

Ordenando la ecuación anterior, se desprende que el $NPSH_d$ se calcula con la ecuación (2-9)

$$\mathrm{NPSH}_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho \cdot g} - \frac{{V_2}^2}{2g} + (z_2 - z_1) + h_B - h_T - h_L \qquad (2\text{-}9)$$

No existen bombas ni turbinas entre los puntos de estudio, y las pérdidas h_L fueron calculadas en el ítem 2.3.1

El valor de $NPSH_d$ se calcula en el caso más desfavorable, es decir, a máximo caudal de la bomba ($60m^3/h$). La geometría de las tuberías del laboratorio hace necesario calcular 3 casos:

- Bomba 1, en paralelo

$$\mathrm{NPSH}_d = \frac{101.325-2334}{998{,}2\cdot 9{,}81} - \frac{3{,}1^2}{2\cdot 9{,}81} + (3-0) - 2{,}18 = 4{,}47\ [\text{m.c.a}] \qquad (2\text{-}10)$$

- Bomba 2, en paralelo

$$\mathrm{NPSH}_d = \frac{101.325 - 2334}{998{,}2 \cdot 9{,}81} - \frac{3{,}1^2}{2 \cdot 9{,}81} + (3-0) - 2{,}83 = 3{,}82\ [\mathrm{m.c.a}] \qquad (2\text{-}11)$$

- Bomba 2, en serie con bomba 1.

$$\mathrm{NPSH}_d = \frac{101.325 - 2334}{998{,}2 \cdot 9{,}81} - \frac{3{,}1^2}{2 \cdot 9{,}81} + (3 - 0) - 6{,}4 + 37 = 37{,}25\ [\mathrm{m.c.a}] \quad (2\text{-}12)$$

En todos los casos la instalación cumple con la ecuación

$$\mathrm{NPSH}_d > \mathrm{NPSH}_r = 3{,}6\ [\mathrm{m.c.a.}] \quad (2\text{-}13)$$

CAPÍTULO 3. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se propone una automatización basada en la plataforma Arduino, abaratando así los costos de un capturador de datos industrial SCADA y los correspondientes PLC.

A continuación se describen ambos sistemas y se detallan los componentes.

3.1 Control propuesto.

Se propone un control basado en plataforma Industruino.

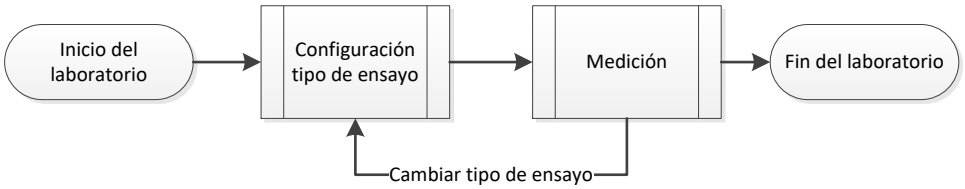
3.1.1 Diagrama de flujo del proceso.

Para determinar la curva de una bomba se debe seguir un protocolo de ensayo. Este protocolo está dividido en dos etapas. En la primera, la bomba se acelera hasta su velocidad nominal y se va cerrando la válvula de descarga, procediendo a medir en cada ocasión. En la segunda etapa se cierra la válvula de descarga hasta un 60% y se hace fluctuar la velocidad de rotación de la bomba entre un 50% y 100% de su velocidad nominal.

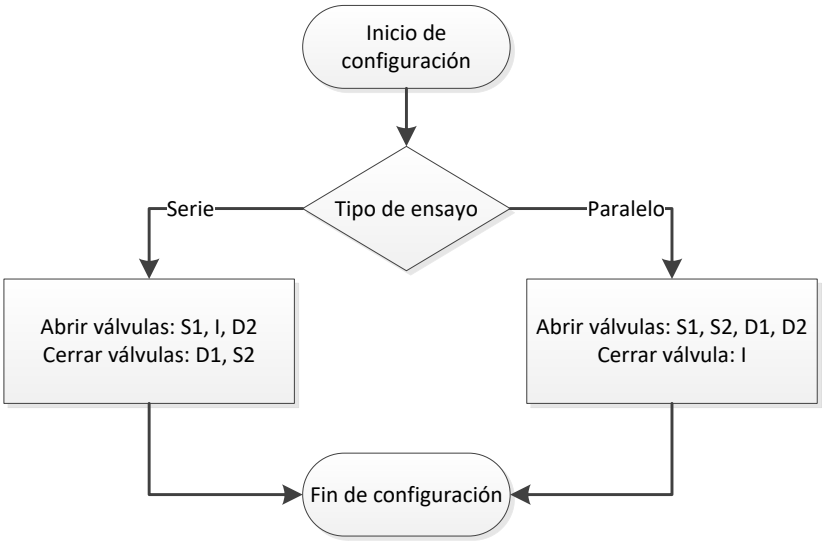
El proceso que se debe automatizar contempla 2 etapas:

a. Configuración del ensayo.

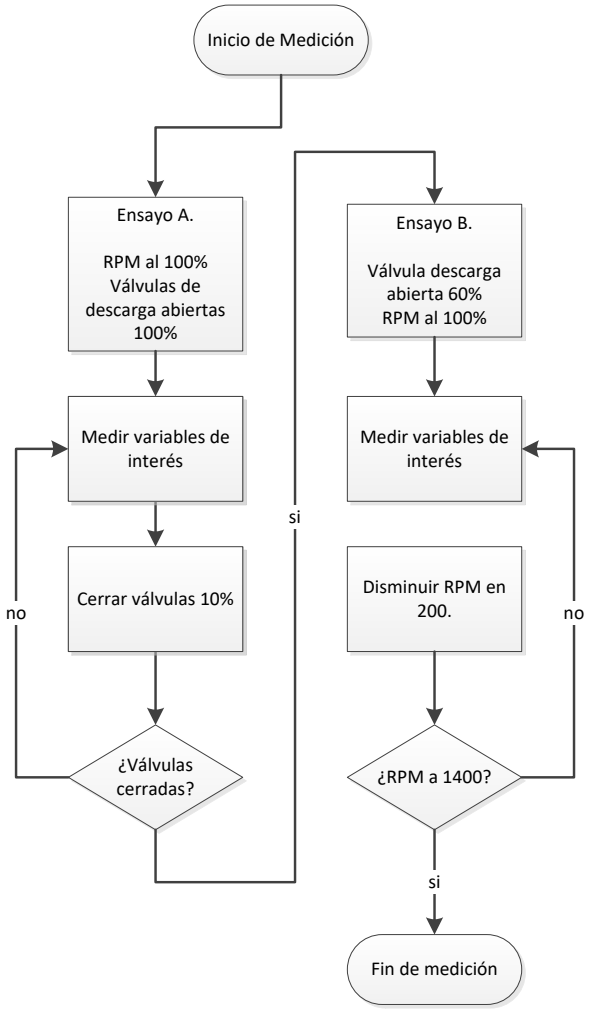
En esta etapa lo que realmente se necesita es un equipo que automatice la ejecución del proceso, sin necesariamente controlarlo. El proceso se esquematiza del siguiente modo:



La función del subproceso de configuración de tipo de ensayo es preparar el laboratorio para operar las bombas en serie o paralelo. Para ello, se deben abrir y cerrar las válvulas de control del proceso.



El subproceso de medición es:



3.1.2 **Elementos de compatibilidad**

Para implementar un control mediante arduino, se deben incorporar dispositivos de conversión de señales, para comunicar el controlador con los sensores y actuadores industriales.

Elemento	**Función**

Convertidor De Protocolo Rs232 a Rs485.	Permite la comunicación entre Arduino y VARIADOR DE FRECUENCIA para controlar RPM de bomba.	
Convertidor VDC a IDC	Convierte las señales de corriente de sensores industriales a señales de voltaje	

CAPÍTULO 4. COSTOS DEL SISTEMA.

En este capítulo se comparan los costos del sistema de control. No se incluyen los sensores ni los actuadores. Se incluyen los accesorios necesarios para comunicar el sistema de control con los sensores y actuadores respectivos.

4.1 Costos de sistemas de control tradicional.

Ítem	Valor (M$)
Tablero de fuerza y control	$ 3.850
Software comunicación SCADA	$ 2.000
Panel de operación HMI	$ 400
Desarrollo aplicación SCADA	$ 900
Desarrollo aplicación HMI	$ 900
Total Neto	**$ 8.050**
IVA	$ 1.530
TOTAL Bruto	**$ 9.580**

4.2 Costos del sistema de control propuesto.

Ítem	Valor (M$)
Tablero de fuerza y control	$ 3.850
Arduino y accesorios	$ 500
Panel TFT touch	$ 20
Desarrollo aplicación Arduino	$ 300
Desarrollo aplicación Panel TFT	$ 300
Total Neto	**$ 4.970**
IVA	$ 944
TOTAL Bruto	**$ 5.914**

Descontando los costos del tablero de fuerza y control y comparando el resto de costos, implementar un sistema basado en arduino, ahorra 73% de los costos, principalmente por dos factores:

- Es de código abierto y no debe pagar licencias por su uso.
- La programación de un arduino es más económica.

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.

Análisis de resultados.

En primera instancia se determina que la implementación de un sistema SCADA no es económicamente viable. Un sistema basado en Arduino puede cumplir con los requerimientos de esta instalación. Sin embargo, analizando la implementación necesaria, podría ser poco confiable. Existen sistemas intermedios, como la implementación de pantallas de interfaz hombre máquina, con capacidad para almacenar y procesar datos provenientes de sensores. La pantalla HMI de la serie GOT2000, de Mitsubishi, tiene conexión USB y permite almacenar datos en tarjetas SD, cumpliendo los requerimientos que el banco de ensayos exige.

Conclusiones.

Mejorar y modernizar el laboratorio era un proyecto deseado por el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad. Era necesario diseñar e implementar un laboratorio acorde a las normas actuales, asegurando calidad y seguridad en el proceso de certificación de bombas de agua y otros equipos afines. El laboratorio construido se diseñó pensando en la versatilidad de sus instalaciones y fácil intercambio de bombas, permitiendo no solo testear bombas, sino también instrumentos de medición. Un aspecto de suma importancia es el registro y procesamiento de datos gracias a instrumentos, procedimientos y geometrías acorde a la norma ISO 9906.

El departamento de ingeniería mecánica de la USM, al poseer un laboratorio de esta envergadura, podrá entregar una ventaja competitiva a sus estudiantes en formación, quienes podrán a conocer a cabalidad el funcionamiento de una bomba centrifuga.

Analizando los costos de las dos tecnologías comparadas, claramente el sistema arduino tiene un costo mucho menor en hardware y cero en software. El sistema tradicional utilizando un sistema SCADA tiene un elevado costo (así como grandes

prestaciones), que podría gradualmente ser implementado. Sin perjuicio de lo anterior, se concluye que los sistemas arduino no son tan robustos como otros sistemas industriales y tienen la desventaja que pocos técnicos industriales pueden programarlos. Son una potente alternativa para pequeños procesos de automatización, donde el riesgo de falla por interrupción de rutina o *crash* sea reducido.

Como Universidad líder en ciencia y tecnología, las instalaciones deben estar a la vanguardia de la tecnología, mostrando a los estudiantes la mayor cantidad de equipos y procedimientos utilizados en la industria. El nuevo banco de pruebas de bombas hidráulicas, lo alumnos podrán probar bombas de mejor manera, además de interactuar con un proceso automatizado.

Finalmente, este laboratorio permite realizar las siguientes pruebas:

1. Estudio de bombas solas, en serie y en paralelo.
2. Determinar curva característica.
3. Determinar NPSH y punto de cavitación.
4. Determinar potencia eléctrica.
5. Determinar potencia mecánica.
6. Determinar rendimiento.

REFERENCIAS

(1) Abarca, P. (s.f.). *El ABC de la automatización: sistemas de control automatico.* Obtenido de http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sistemas-de-control-automatico.pdf

(2) American Society for Testing Materials. (2013). *ASTM A795 Standard Specification for Black and Hot-Dipped Zinc-Coated (Galvanized) Welded and Seamless Steel Pipe for Fire Protection Use.*

(3) Arduino LLC. (2016). *arduino.cc*. Obtenido de www.arduino.cc

(4) Cosmoplas. (2014). Datos útiles. *Lista de precios 2014-2015*.

(5) Duractec-Vinilit S.A. (s.f.). *Boletín Técnico Línea Presion.*

(6) DynaQuip Controls Inc. (2015). *Dynaquip*. Obtenido de http://www.dynaquip.com/index.html

(7) GARCÍA Hernandez, H. A., & SUAREZ Rincon, J. A. (2010). *Diseño, construcción y puesta a prueba de un banco de bombas centrifugas en serie, paralelo y mixto.* Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de ingenieriia y administración. Bucaramanga: Tesis.(Ing. mecánico).

(8) Hoffens. (2015). Lista de Precio.

(9) Industria Mecánica Vogt S.A. (s.f.). *Catálogo Vogt Serie N.*

(10) Ingersoll-Rand. (1984). Friction of Water Head Losses Through Valves and Fittings. En Ingersoll-Rand, *Cameron Hydraulic Data, A handy reference on the subject of hydraulics.* (págs. 110-121). Woodcliff Lake, EEUU: C.R. Westaway & A.W. Loomis.

(11) Instituto Nacional de Normalización. (2011). *NCh399-2011: Sistema de tuberías plásticas para suministros de agua bajo presión, enterrado o superficial – Tuberías de poli (cloruro devinilo) no plastificado (PVC-U) – Requisitos.*

(12) International Organization of Standardization. (2012). *ISO9906: Rotodynamic pumps — Hydraulic performance acceptance tests — Grades 1, 2 and 3.*

(13) JHG Ingeniería. (25 de Abril de 2006). *Manual para la identificación y selección de flanges.* Santiago. Obtenido de http://www.aguapedia.org/.

(14) Mitsubishi Electric. (2005). *Catálogo Técnico FR-F740 EC/E1*.

(15) Rastelli Rubinetterie S.p.A. (2013). *Rastelli*. Obtenido de http://rastelli.it/

(16) SALAS Orellana, G. A. (2009). *Diseño e implementación de un banco de prueba de bombas centrifugas utilizando criterios de la norma ISO 9906.* UTFSM, Departamento de Mecánica. Valparaíso: Tesis (Ing. civil mecánico mensión producción).

ANEXO A: TABLAS

A1: Referentes a norma ISO 9906

Tabla A-1 Valores permisibles de incertidumbres sistemáticas

Valor medido	**Valores permisibles de incertidumbres sistemáticas (en el punto de garantía)**	
	Grado 1 %	**Grados 2 y 3** %
Flujo	±1,5	±2,5
Altura total de la bomba	±1,0	±2,5
Altura de descarga	±1,0	±2,5
Altura de succión	±1,0	±2,5
Altura de succión para pruebas de NPSH	±0,5	±1,0
Potencia de entrada	±1,0	±2,0
Velocidad de rotación	±0,35	±1,4
Torque	±0,9	±2,0

Tabla A-2 Fluctuaciones permisibles

Valor medido	**Amplitud de fluctuaciones permisibles**		
	Grado 1 %	**Grado 2** %	**Grado 3** %
Flujo	±2	±3	±6
Altura total de la bomba	±3	±4	±10
Altura de descarga	±2	±3	±6
Altura de succión	±2	±3	±6
Potencia de entrada	±2	±3	±6
Velocidad de rotación	±0,5	±1	±2
Torque	±2	±3	±6
Temperatura	0,3 °C	0,3 °C	0,3 °C

A2: Referentes a tuberías y accesorios.

Tabla A-3 Norma ASTM A-795 dimensiones, pesos y presión SCH10

Diámetro Nominal [pulgadas]	Espesor [mm]	Diámetro Externo [mm]	Peso Teórico [kg/mt]	Prueba de Presión [kg/cm²]
¾	2,11	26,7	1,28	49,2
1	2,77	33,4	2,1	49,2
1 ¼	2,77	42,1	2,72	70,3
1 ½	2,77	48,3	3,12	70,3
2	2,77	60,3	3,96	70,3
2 ½	3,05	73	5,3	70,3
3	3,05	88,9	6,5	70,3
4	3,05	114,3	8,36	84,4
6	3,4	168,3	13,84	70,3
8	4,8	219,1	25,41	56,3
10	4,8	273	31,82	49,2

Tabla A-4 Norma NCh 399-2011: Requisitos para tubos de PVC rígido.

Tubería PVC			
Diámetro exterior		Clase 10	
Nominal [mm]	Nominal [pulg]	Espesor mínimo [mm]	Peso Tira [kg]
20	1/2	-	-
25	3/4	1,5	1,05
32	1	1,8	1,59
40	1 1/4	2	2,2
50	1 1/2	2,4	3,32
63	2	3	5,24
75	2 1/2	3,6	7,49
90	3	4,3	10,73
110	4	5,3	16,1
125	4 1/2	6	20,57
140	5	6,7	25,78

Tabla A-5 Coeficiente K de elementos (Ingersoll-Rand, 1984)

Ítem	K
Válvula de pie 3"	1,4
Válvula mariposa 3"	0,81
Curva PVC 3"	0,29
Codo PVC 45°	0,29
Codo PVC 90mm	0,54
Tee 3" (flujo directo)	0,36
Tee PVC 3" (flujo lateral)	1,08
Reducción excéntrica 3 - 2 1/2	0,01
Ampliación concéntrica 1 1/2 - 3	0,23

Tabla A-6 Pérdida de carga en válvulas [m.c.a]

Caudal		Velocidad	Válvula de pie 3"	Válvula mariposa 3"
Q		V	K	
m3/h	m3/s	m/s	1,4	0,81
10	0,003	0,53	0,020	0,012
20	0,006	1,07	0,081	0,047
30	0,008	1,60	0,183	0,106
40	0,011	2,14	0,325	0,188
50	0,014	2,67	0,508	0,294
60	0,017	3,20	0,732	0,423
70	0,019	3,74	0,996	0,576
80	0,022	4,27	1,301	0,753
90	0,025	4,80	1,647	0,953
100	0,028	5,34	2,033	1,176
110	0,031	5,87	2,460	1,423
120	0,033	6,41	2,928	1,694
130	0,036	6,94	3,436	1,988
140	0,039	7,47	3,985	2,305
150	0,042	8,01	4,574	2,647

Tabla A-7 Pérdida de carga en curvas [m.c.a]

Caudal		Velocidad	Curva PVC 3"	Codo PVC 45°	Codo PVC 90mm
Q		V	K		
m3/h	m3/s	m/s	0,29	0,29	0,54
10	0,003	0,53	0,004	0,004	0,008
20	0,006	1,07	0,017	0,017	0,031
30	0,008	1,60	0,038	0,038	0,071
40	0,011	2,14	0,067	0,067	0,125
50	0,014	2,67	0,105	0,105	0,196
60	0,017	3,20	0,152	0,152	0,282
70	0,019	3,74	0,206	0,206	0,384
80	0,022	4,27	0,270	0,270	0,502
90	0,025	4,80	0,341	0,341	0,635
100	0,028	5,34	0,421	0,421	0,784
110	0,031	5,87	0,510	0,510	0,949
120	0,033	6,41	0,606	0,606	1,129
130	0,036	6,94	0,712	0,712	1,325
140	0,039	7,47	0,825	0,825	1,537
150	0,042	8,01	0,948	0,948	1,764

Tabla A-8 Pérdida de carga en tee y reducciones[m.c.a]

Caudal		Velocidad	Tee 3" (flujo directo)	Tee PVC 3" (flujo lateral)	Reducción excéntrica 3-2½	Ampliación concéntrica 1½-3
Q		V	K			
m3/h	m3/s	m/s	0,36	1,08	0,01	0,23
10	0,003	0,53	0,005	0,016	0,000	0,003
20	0,006	1,07	0,021	0,063	0,001	0,013
30	0,008	1,60	0,047	0,141	0,001	0,030
40	0,011	2,14	0,084	0,251	0,002	0,053
50	0,014	2,67	0,131	0,392	0,004	0,083
60	0,017	3,20	0,188	0,565	0,005	0,120
70	0,019	3,74	0,256	0,768	0,007	0,164
80	0,022	4,27	0,335	1,004	0,009	0,214
90	0,025	4,80	0,423	1,270	0,012	0,271
100	0,028	5,34	0,523	1,568	0,015	0,334
110	0,031	5,87	0,633	1,898	0,018	0,404
120	0,033	6,41	0,753	2,258	0,021	0,481
130	0,036	6,94	0,884	2,651	0,025	0,564
140	0,039	7,47	1,025	3,074	0,028	0,655
150	0,042	8,01	1,176	3,529	0,033	0,751

Tabla A-9 Pérdidas en tubería PVC 3”

Caudal		Velocidad	Número de reynolds	Coeficiente de fricción	Pérdida por metro lineal
Q		V	Re	f	H_f
$[m^3/h]$	$[m^3/s]$	$[m/s]$	[-]	[-]	$[m.c.a./ml]$
10	0,003	0,53	43.276	0,02152	0,004
20	0,006	1,07	86.552	0,01852	0,013
30	0,008	1,60	129.829	0,01706	0,027
40	0,011	2,14	173.105	0,01613	0,046
50	0,014	2,67	216.381	0,01547	0,069
60	0,017	3,20	259.657	0,01497	0,096
70	0,019	3,74	302.934	0,01456	0,127
80	0,022	4,27	346.210	0,01423	0,162
90	0,025	4,80	389.486	0,01395	0,202
100	0,028	5,34	432.762	0,01370	0,244
110	0,031	5,87	476.039	0,01349	0,291
120	0,033	6,41	519.315	0,01330	0,342
130	0,036	6,94	562.591	0,01313	0,396
140	0,039	7,47	605.867	0,01298	0,454
150	0,042	8,01	649.144	0,01284	0,515

Tabla A-10 Pérdidas en tubería acero 1 ½”.

Caudal		Velocidad	Número de reynolds	Coeficiente de fricción	Pérdida por metro lineal
Q		V	Re	f	Hf
$[m^3/h]$	$[m^3/s]$	$[m/s]$	[-]	[-]	$[m.c.a./ml]$
10	0,003	1,93	82.383	0,02593	0,116
20	0,006	3,87	164.765	0,02496	0,445
30	0,008	5,80	247.148	0,02460	0,988
40	0,011	7,74	329.531	0,02441	1,742
50	0,014	9,67	411.914	0,02429	2,709
60	0,017	11,61	494.296	0,02421	3,888
70	0,019	13,54	576.679	0,02415	5,278
80	0,022	15,47	659.062	0,02411	6,881
90	0,025	17,41	741.445	0,02407	8,696
100	0,028	19,34	823.827	0,02404	10,722
110	0,031	21,28	906.210	0,02402	12,961
120	0,033	23,21	988.593	0,02400	15,411
130	0,036	25,15	1.070.976	0,02398	18,074
140	0,039	27,08	1.153.358	0,02396	20,948
150	0,042	29,02	1.235.741	0,02395	24,034

Tabla A-11 Pérdidas en tubería acero 2”.

Caudal		Velocidad	Número de reynolds	Coeficiente de fricción	Pérdida por metro lineal
Q		V	Re	f	Hf
$[m^3/h]$	$[m^3/s]$	$[m/s]$	[-]	[-]	$[m.c.a./ml]$
10	0,003	1,18	64.330	0,02526	0,033
20	0,006	2,36	128.659	0,02396	0,124
30	0,008	3,54	192.989	0,02347	0,273
40	0,011	4,72	257.318	0,02320	0,481
50	0,014	5,90	321.648	0,02303	0,746
60	0,017	7,08	385.977	0,02292	1,068
70	0,019	8,26	450.307	0,02283	1,449
80	0,022	9,44	514.636	0,02277	1,887
90	0,025	10,62	578.966	0,02272	2,383
100	0,028	11,79	643.295	0,02268	2,936
110	0,031	12,97	707.625	0,02264	3,547
120	0,033	14,15	771.955	0,02261	4,216
130	0,036	15,33	836.284	0,02259	4,942
140	0,039	16,51	900.614	0,02256	5,726
150	0,042	17,69	964.943	0,02255	6,568

Tabla A-12 Pérdidas en tubería acero 2 ½”.

Caudal		Velocidad	Número de reynolds	Coeficiente de fricción	Pérdida por metro lineal
Q		V	Re	f	Hf
$[m^3/h]$	$[m^3/s]$	$[m/s]$	[-]	[-]	$[m.c.a./ml]$
10	0,003	0,79	52.656	0,02499	0,012
20	0,006	1,58	105.312	0,02338	0,044
30	0,008	2,37	157.968	0,02275	0,097
40	0,011	3,16	210.624	0,02240	0,171
50	0,014	3,95	263.280	0,02218	0,264
60	0,017	4,74	315.936	0,02203	0,377
70	0,019	5,53	368.592	0,02192	0,511
80	0,022	6,32	421.248	0,02184	0,665
90	0,025	7,11	473.904	0,02177	0,839
100	0,028	7,90	526.560	0,02171	1,033
110	0,031	8,69	579.216	0,02167	1,247
120	0,033	9,48	631.872	0,02163	1,482
130	0,036	10,27	684.528	0,02159	1,736
140	0,039	11,06	737.184	0,02156	2,011
150	0,042	11,85	789.840	0,02154	2,306

Tabla A-13 Pérdidas en tubería acero 3”.

Caudal		Velocidad	Número de reynolds	Coeficiente de fricción	Pérdida por metro lineal
Q		V	Re	f	Hf
$[m^3/h]$	$[m^3/s]$	$[m/s]$	[-]	[-]	$[m.c.a./ml]$
10	0,003	0,52	2.767	0,04677	0,008
20	0,006	1,03	5.533	0,03813	0,025
30	0,008	1,55	8.300	0,03431	0,051
40	0,011	2,06	11.067	0,03204	0,084
50	0,014	2,58	13.834	0,03050	0,125
60	0,017	3,10	16.600	0,02936	0,173
70	0,019	3,61	19.367	0,02848	0,229
80	0,022	4,13	22.134	0,02777	0,291
90	0,025	4,64	24.900	0,02719	0,361
100	0,028	5,16	27.667	0,02670	0,437
110	0,031	5,67	30.434	0,02628	0,521
120	0,033	6,19	33.201	0,02591	0,611
130	0,036	6,71	35.967	0,02560	0,709
140	0,039	7,22	38.734	0,02531	0,813
150	0,042	7,74	41.501	0,02506	0,924

Tabla A--14 Pérdida de carga total succión bomba 1 en paralelo [m.c.a.]

				m3/h	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,003**	**0,006**	**0,008**	**0,011**	**0,014**	**0,017**
Valvula Pie	acero	3	-		0,02	0,08	0,18	0,33	0,51	0,73
TUBO	PVC	3	3		0,01	0,04	0,08	0,14	0,21	0,29
Curva 90°	PVC	3	-		0,00	0,02	0,04	0,07	0,11	0,15
Tubo	PVC	3	2,5		0,01	0,03	0,07	0,12	0,17	0,24
Tubo	acero	3	0,4		0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07
Valvula mariposa	acero	3	-		0,01	0,05	0,11	0,19	0,29	0,42
Tubo	acero	3	0,4		0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07
Reducción Excentrica	acero	3 x2 1/2	-		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
tubo	acero	2,5	0,5		0,01	0,02	0,05	0,09	0,13	0,19
			TOTAL		**0,07**	**0,26**	**0,57**	**0,99**	**1,52**	**2,17**

Tabla A-15 Pérdida de carga total en descarga bomba 1en paralelo [m.c.a.]

				m3/h	10	20	30	40	50	60
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,003**	**0,006**	**0,008**	**0,011**	**0,014**	**0,017**
tubo	acero	1,5	0,25		0,03	0,11	0,25	0,44	0,68	0,97
reducción concentrica	acero	1 1/2 x 3	-		0,00	0,01	0,03	0,05	0,08	0,12
tubo	acero	3	0,428		0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,07
TEE Flujo lateral	acero	3	-		0,02	0,06	0,14	0,25	0,39	0,56
Tubo	acero	3	0,3		0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
codo 90	acero	3	-		0,01	0,03	0,07	0,13	0,20	0,28
tubo	acero	3	0,4		0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07
tubo	acero	3	1,5		0,01	0,04	0,08	0,13	0,19	0,26
tee flujo continuo	acero	3	-		0,01	0,02	0,05	0,08	0,13	0,19
valvula mariposa	acero	3	-		0,02	0,08	0,18	0,33	0,51	0,73
			TOTAL		**0,10**	**0,39**	**0,85**	**1,50**	**2,32**	**3,31**

Tabla A-16 Pérdida de carga en succión bomba 2 en paralelo [m.c.a.]

				m3/h	10	20	30	40	50	60
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,003**	**0,006**	**0,008**	**0,011**	**0,014**	**0,017**
Valvula Pie	acero	3	-		0,02	0,08	0,18	0,33	0,51	0,73
TUBO	PVC	3	3		0,01	0,04	0,08	0,14	0,21	0,29
Curva 90°	PVC	3	-		0,00	0,02	0,04	0,07	0,11	0,15
tubo	PVC	3	2,5		0,01	0,03	0,07	0,12	0,17	0,24
Tubo	acero	3	0,4		0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07
Valvula mariposa	acero	3	-		0,02	0,08	0,18	0,33	0,51	0,73
Tubo	acero	3	0,35		0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06
Tee flujo continuo	acero	3	-		0,01	0,02	0,05	0,08	0,13	0,19
Tubo	acero	3	0,4		0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07
Tubo	goma	3	0,5		0,00	0,01	0,03	0,04	0,06	0,09
Reducción Excentrica	acero	3 x2 1/2	-		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
tubo	acero	2,5	0,5		0,01	0,02	0,05	0,09	0,13	0,19
			TOTAL		**0,09**	**0,34**	**0,74**	**1,28**	**1,97**	**2,81**

Tabla A-17 Pérdida de carga en descarga bomba 2 en paralelo [m.c.a.]

				m3/h	10	20	30	40	50	60
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,003**	**0,006**	**0,008**	**0,011**	**0,014**	**0,017**
tubo	acero	1,5	0,25		0,03	0,11	0,25	0,44	0,68	0,97
reducción concentrica	acero	1 1/2 x 3	-		0,00	0,01	0,03	0,05	0,08	0,12
tubo	goma	3	1,15		0,01	0,03	0,06	0,10	0,14	0,20
tubo	acero	3	0,25		0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
codo 45	acero	3	-		0,00	0,02	0,04	0,07	0,11	0,15
Tee flujo continuo	acero	3	-		0,01	0,02	0,05	0,08	0,13	0,19
tubo	acero	3	0,278		0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05
Valvula mariposa	acero	3	-		0,02	0,08	0,18	0,33	0,51	0,73
			TOTAL		**0,07**	**0,29**	**0,63**	**1,11**	**1,71**	**2,45**

Tabla A-18 Pérdida de carga total en succión bomba 1 en serie [m.c.a.]

				m3/h	10	20	30	40	50	60
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,003**	**0,006**	**0,008**	**0,011**	**0,014**	**0,017**
Valvula Pie	acero	3	-		0,02	0,08	0,18	0,33	0,51	0,73
TUBO	PVC	3	3		0,01	0,04	0,08	0,14	0,21	0,29
Curva 90°	PVC	3	-		0,00	0,02	0,04	0,07	0,11	0,15
Tubo	PVC	3	2,5		0,01	0,03	0,07	0,12	0,17	0,24
Tubo	acero	3	0,4		0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07
Valvula mariposa	acero	3	-		0,01	0,05	0,11	0,19	0,29	0,42
Tubo	acero	3	0,4		0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07
Reducción Excentrica	acero	3 x2 1/2	-		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
tubo	acero	2,5	0,5		0,01	0,02	0,05	0,09	0,13	0,19
		TOTAL			**0,07**	**0,26**	**0,57**	**0,99**	**1,52**	**2,17**

Tabla A-19 Pérdida de carga total en descarga bomba 1 en serie [m.c.a.]

				m3/h	10	20	30	40	50	60
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,00**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,02**
tubo	acero	1,5	0,25		0,03	0,11	0,25	0,44	0,68	0,97
reducción concentrica	acero	1 1/2 x 3	-		0,00	0,01	0,03	0,05	0,08	0,12
tubo	acero	3	0,43		0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,07
		TOTAL			**0,04**	**0,14**	**0,30**	**0,52**	**0,81**	**1,17**

Tabla A-20 Pérdida de carga total en Interconexión [m.c.a.]

				m3/h	10	20	30	40	50	60
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,00**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,02**
Tee flujo lateral	acero	3	-		0,02	0,06	0,14	0,25	0,39	0,56
tubo	acero	3	0,30		0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
codo	acero	3	-		0,01	0,03	0,07	0,13	0,20	0,28
tubo	acero	3	0,53		0,00	0,01	0,03	0,04	0,07	0,09
codo	acero	3	-		0,01	0,03	0,07	0,13	0,20	0,28
tubo	acero	3	0,71		0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12
Valvula mariposa	acero	3	-		0,02	0,08	0,18	0,33	0,51	0,73
Tubo	acero	3	0,15		0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03
Tee flujo lateral	acero	3	-		0,02	0,06	0,14	0,25	0,39	0,56

Tabla A-21 Pérdida de carga total en succión bomba 2 en serie [m.c.a.]

				m3/h	10	20	30	40	50	60
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,00**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,02**
Tubo	acero	3	0,4		0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07
Tubo	goma	3	0,5		0,00	0,01	0,03	0,04	0,06	0,09
Reducción Excentrica	acero	3 x2 1/2	-		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
tubo	acero	2,5	0,5		0,01	0,02	0,05	0,09	0,13	0,19
		TOTAL			**0,01**	**0,05**	**0,10**	**0,16**	**0,25**	**0,35**

Tabla A-22 Pérdida de carga total en descarga bomba 2 en serie [m.c.a.]

				m3/h	10	20	30	40	50	60
Elemento	**Material**	**DN**	**L [m]**	**m3/s**	**0,00**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,01**	**0,02**
tubo	acero	1,5	0,25		0,03	0,11	0,25	0,44	0,68	0,97
reducción concentrica	acero	1 1/2 x 3	-		0,00	0,01	0,03	0,05	0,08	0,12
tubo	goma	3	1,15		0,01	0,03	0,06	0,10	0,14	0,20
tubo	acero	3	0,25		0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
codo 45	acero	3	-		0,00	0,02	0,04	0,07	0,11	0,15
Tee flujo continuo	acero	3	-		0,01	0,02	0,05	0,08	0,13	0,19
tubo	acero	3	0,28		0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05
Valvula mariposa	acero	3	-		0,02	0,08	0,18	0,33	0,51	0,73
		TOTAL			**0,07**	**0,29**	**0,63**	**1,11**	**1,71**	**2,45**

ANEXO B: ILUSTRACIONES Y DIAGRAMAS

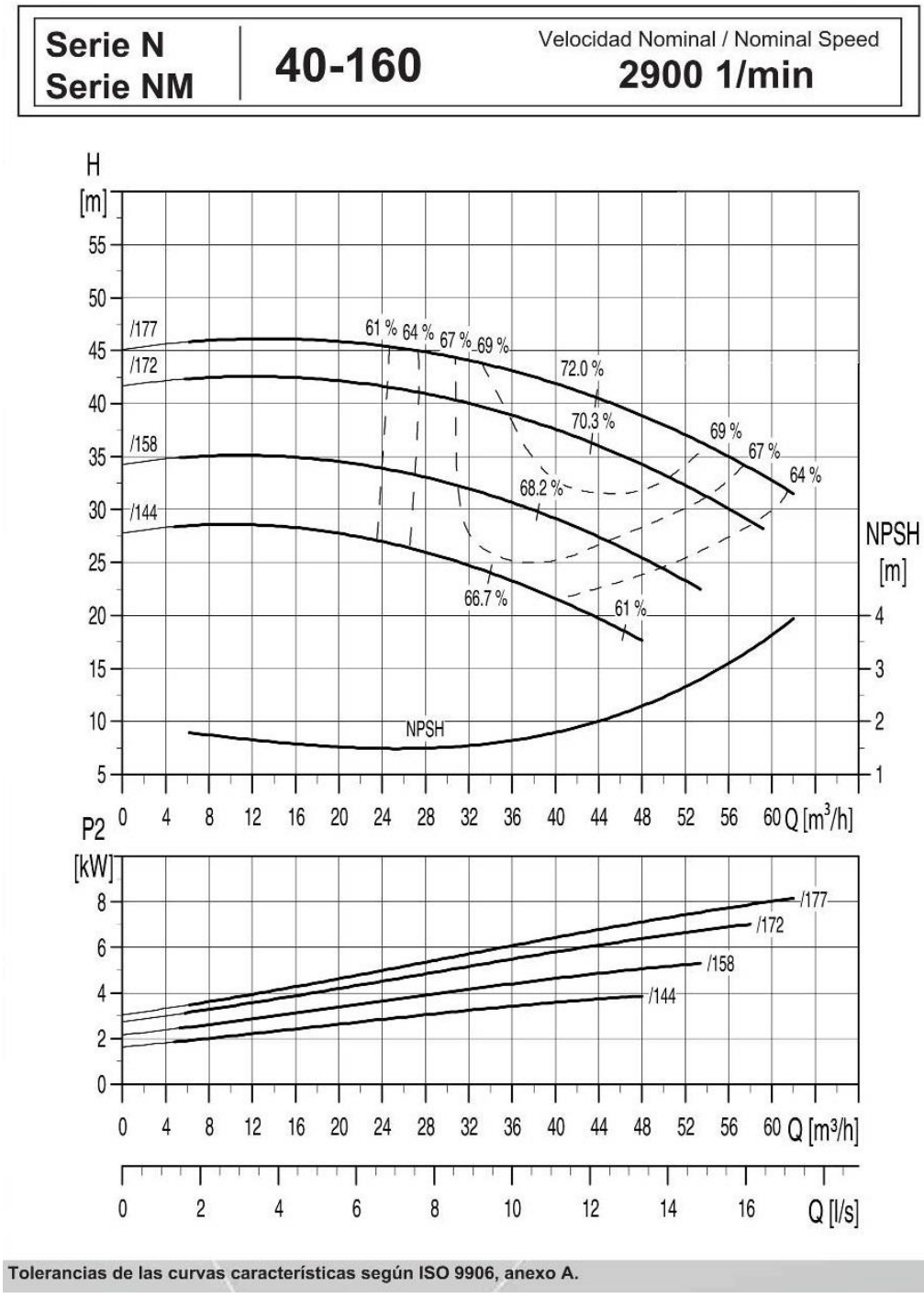


Ilustración B-1 Curva bomba Vogt N40-160

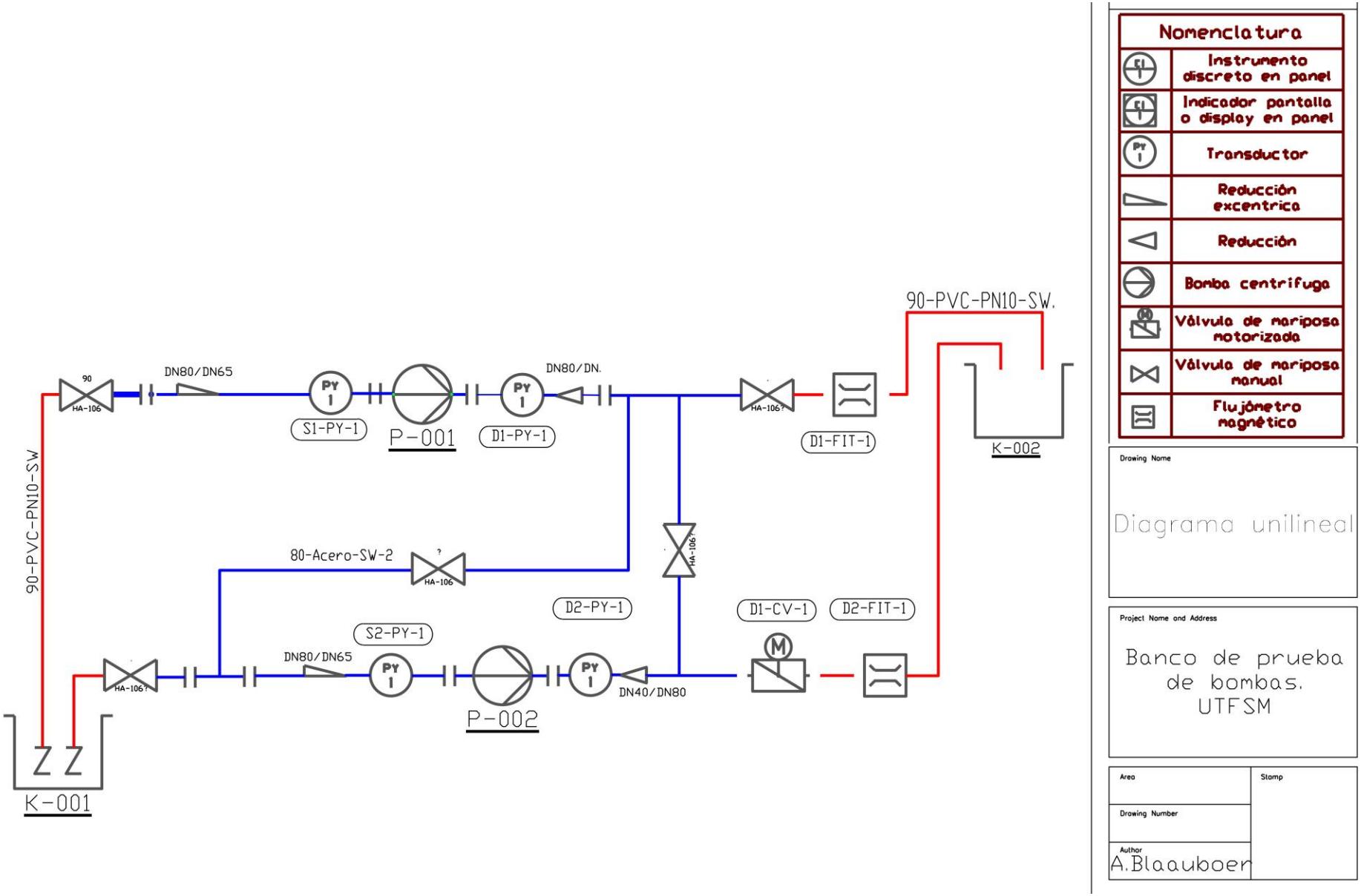


Ilustración B-2 Diagrama unilineal

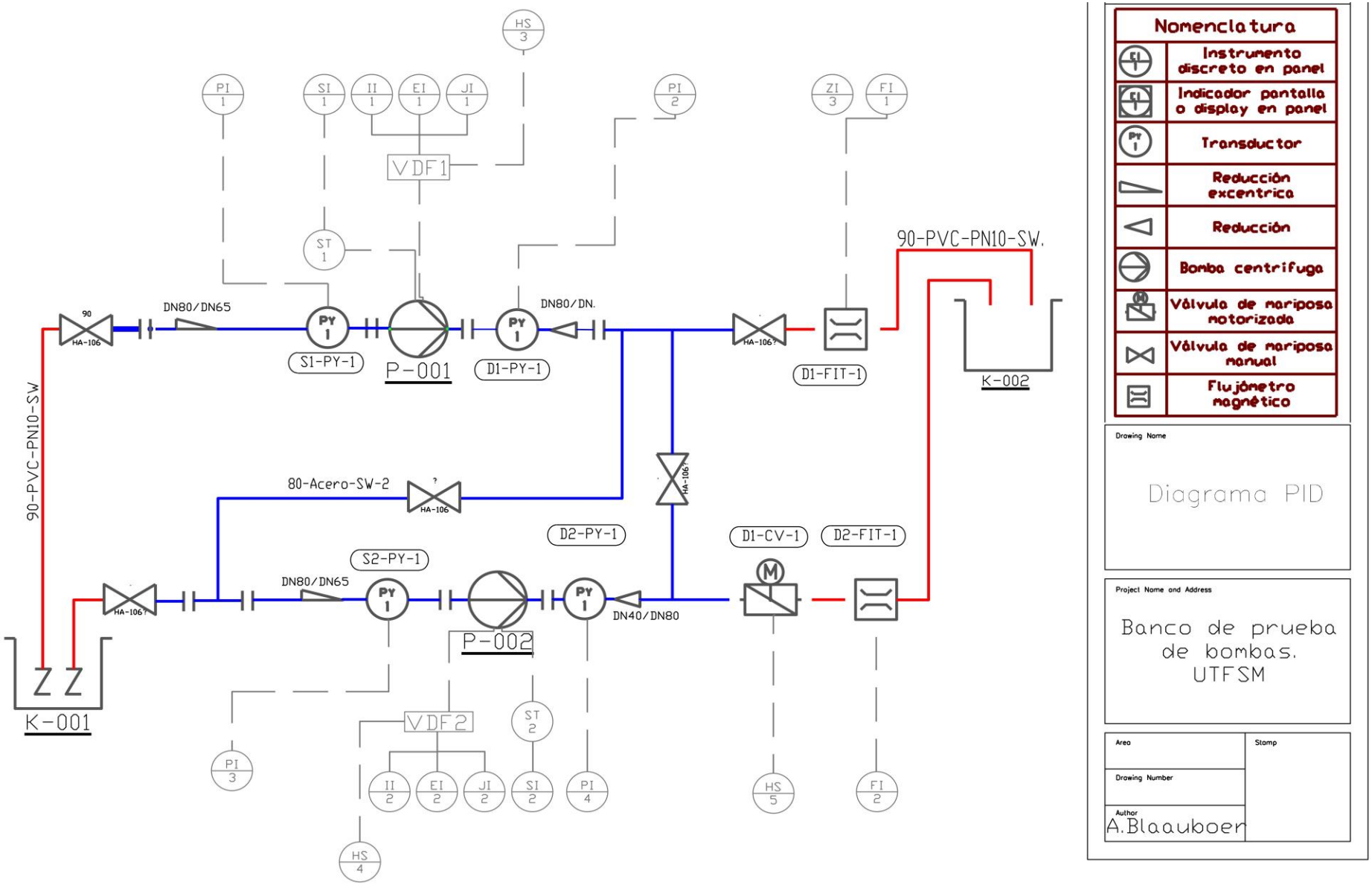


Ilustración B-3 Diagrama PID

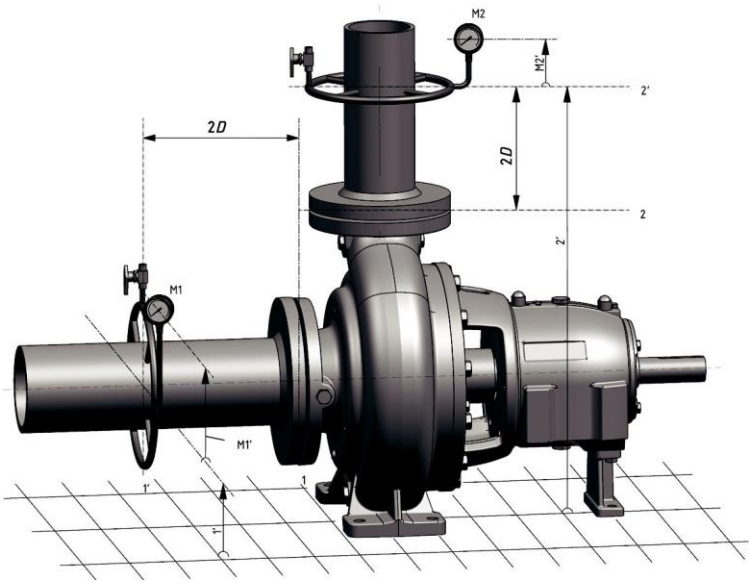


Ilustración B-4 Ubicación sensores de presión

ANEXO C: PLANOS DE LABORATORIO

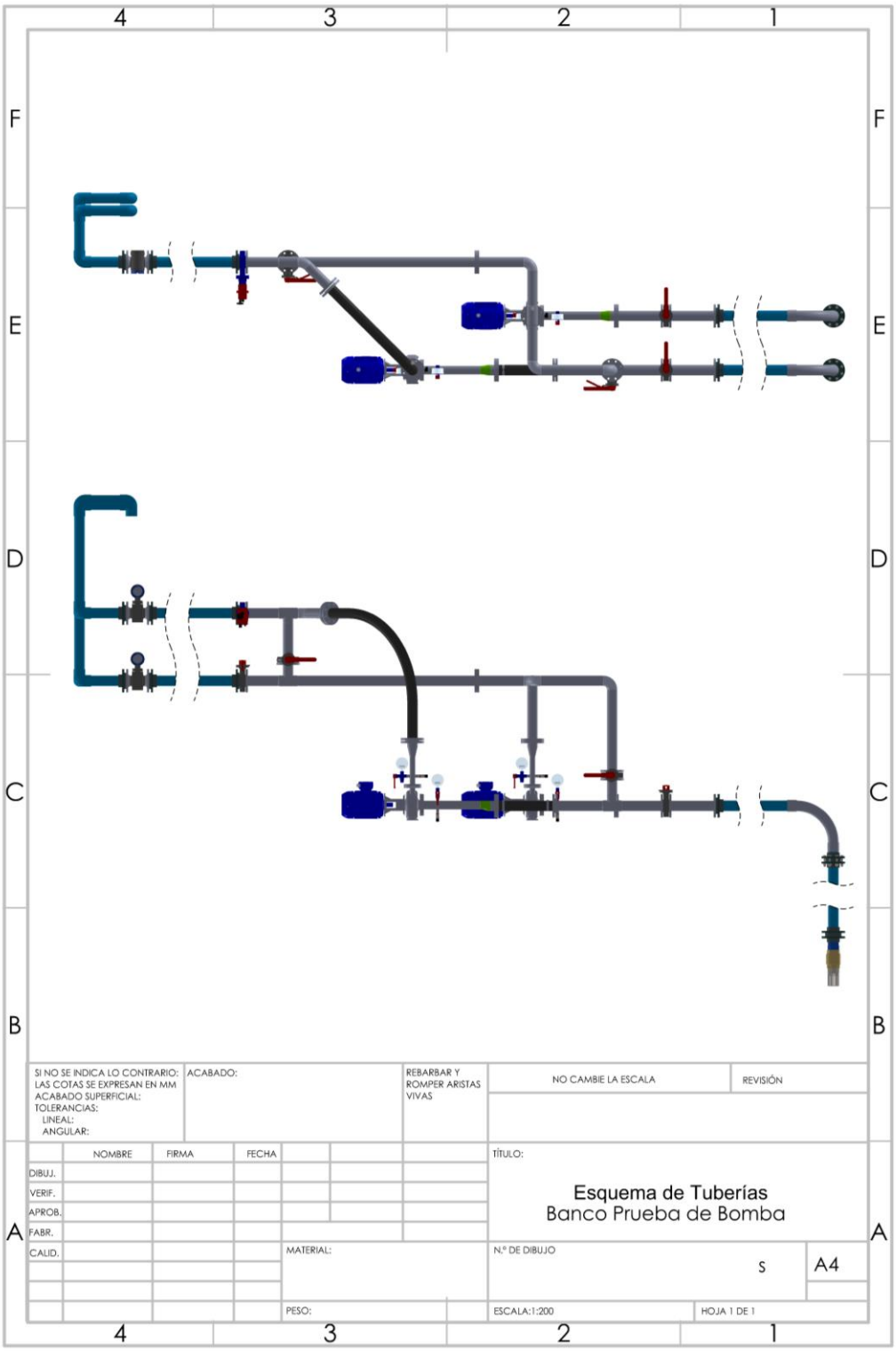


Ilustración C-1 Esquema de Tuberías

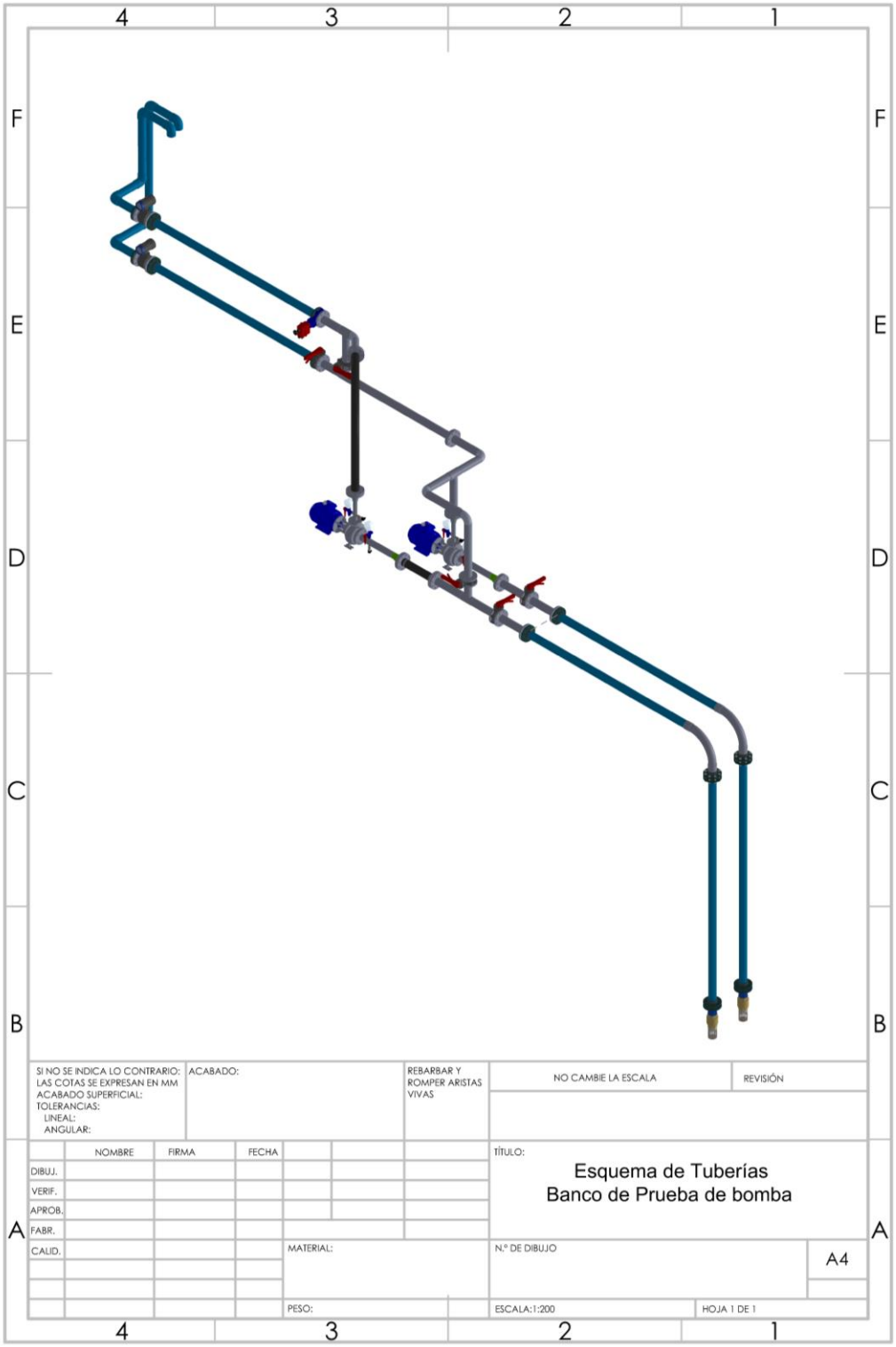


Ilustración C-2 Esquema de Tuberías Isométrico

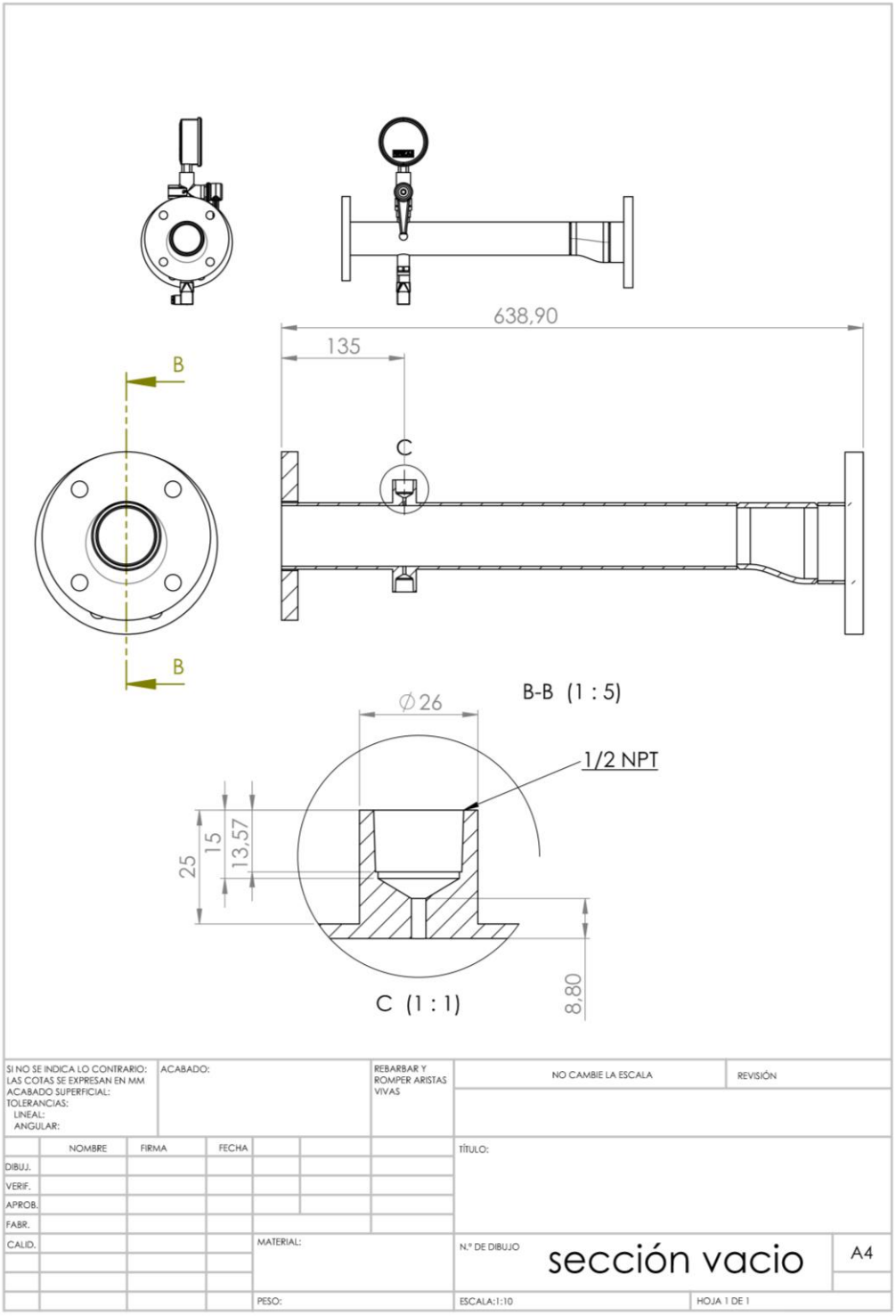


Ilustración C-3 Plano sección vacío

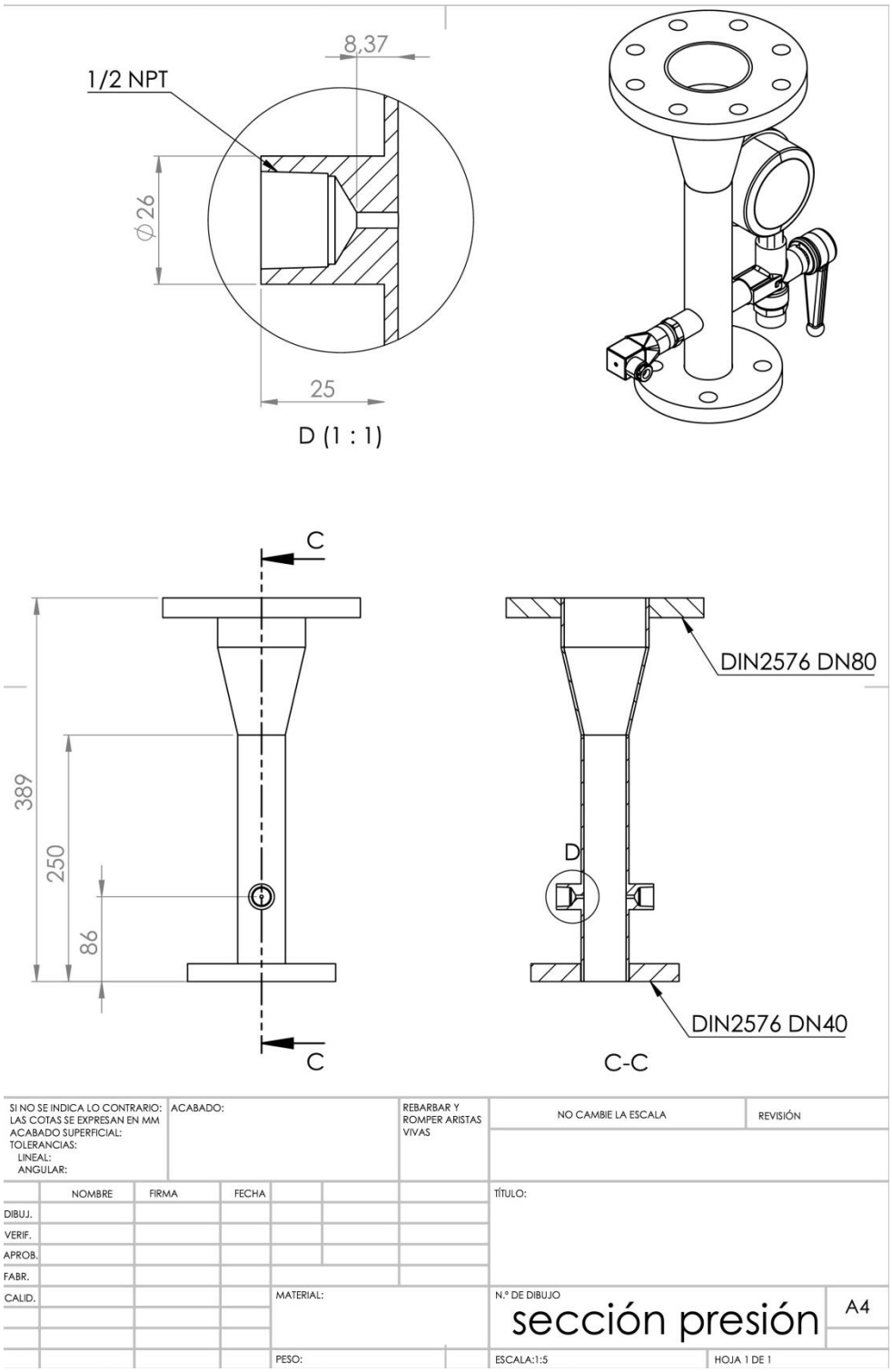


Ilustración C-4 Plano sección presión