



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Diseño, construcción y puesta a punto de una
instalación para la determinación de la
cavitación en bombas centrífugas.**

Autor:

Barcina García, Pedro

Tutor:

**Méndez Bueno, César
Departamento de ingeniería
energética y fluidomecánica**

Valladolid, junio de 2016.

Agradecimientos

A mi tutor, por sus directrices, correcciones y paciencia.

Al técnico de laboratorio por estar siempre disponible a echarme una mano y enseñarme y por las conversaciones en el laboratorio que hacían menos dura la tarea.

A mi familia y amigos, pilares indispensables en mi vida, por sus ánimos y estar a mi lado siempre.

A todos los que en los malos momentos me recordaban que Edison descubrió más de 1000 maneras de cómo no hacer una bombilla antes de conseguirlo.

Al deporte y a la música, que conseguían aumentar el NPSH_d de mi cerebro para que no me cavitaran las neuronas.

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Resumen

El presente proyecto se basa en el diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para el estudio de la cavitación en bombas centrífugas. Es una profundización, desde el punto de vista experimental, en los conocimientos aprendidos sobre el tema en las asignaturas de Ingeniería Fluidomecánica, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Además del experimento, se ha preparado la instalación y se ha redactado un guion de prácticas para que pueda ser usada con fines didácticos por los alumnos de dichas asignaturas en las prácticas de laboratorio.

En la presente memoria se describen los diversos bocetos de la instalación realizados y el montaje de la instalación. Una vez resueltos los problemas constructivos, se describe su puesta a punto para que se puedan realizar correctamente los experimentos y se resumen las conclusiones obtenidas.

Abstract

This project is based on the design, construction, and adjustment of an installation in order to study cavitation in centrifugal pumps. It deepens, from an experimental point of view, into the knowledge learned about cavitation in subjects such as Engineering Fluid Mechanics, Fluid Mechanics and Hydraulic Machines. In addition to the experimental issue, the installation has been prepared and a guideline has been written to be used for educational purposes by students of these subjects in laboratory practices.

In this specification several sketches and the assembly of the installation are described. After construction problems were solved, the adjustment of the installation to perform correctly is included and final conclusions summarized.

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Índice

Agradecimientos	III
Resumen	V
Índice	VII
Nomenclatura	IX
Capítulo 1. Introducción	- 1 -
1.1 Objetivos del proyecto.....	- 1 -
1.2 Estructura del proyecto.....	- 2 -
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	- 3 -
2.1 Introducción.....	- 3 -
2.2 Bombas centrífugas	- 4 -
2.2.1 Clasificación.....	- 4 -
2.2.2 Descripción	- 4 -
2.2.3 Definición de alturas	- 6 -
2.3 Cavitación en bombas centrífugas.....	- 7 -
2.3.1 Introducción.....	- 7 -
2.3.2 Efectos	- 7 -
2.3.3 Consecuencias	- 8 -
2.4 NPSH requerido y disponible.....	- 10 -
2.5 Cómo evitar la cavitación	- 15 -
2.6 Algunos experimentos de laboratorio sobre cavitación en bombas.....	- 17 -
2.7 Otras aplicaciones de la cavitación	- 18 -
Capítulo 3. Diseño y construcción de la instalación	- 21 -
3.1 Introducción.....	- 21 -
3.2 De la idea al primer diseño.....	- 21 -
3.3 Dimensionado de la instalación.....	- 24 -
3.3.1 Estimación de la presión mínima necesaria en el depósito	- 24 -
3.3.2 Estimación del volumen del depósito	- 27 -
3.3.3 Estimación del tiempo que tarda en sacar el aire.....	- 28 -
3.3.4 Estimación de las dimensiones y peso del depósito (sin agua)	- 30 -
3.4 Construcción de la instalación	- 31 -
3.5 Memoria descriptiva de los componentes	- 34 -
3.6 Comprobación de los elementos de medida.....	- 35 -
3.6.1 Caudalímetro y su display.....	- 35 -
3.6.2 Presostatos.....	- 36 -

3.6.3 Bomba centrífuga (curva H-Q)	- 37 -
3.6.4 Calibración velocidad de giro de la bomba	- 38 -
Capítulo 4. Puesta a punto y ensayos de laboratorio	- 39 -
4.1 Detección de la cavitación.....	- 39 -
4.2 Cálculo del NPSH _r de la bomba.....	- 40 -
4.2.1 Cálculo del NPSH escuchando la cavitación	- 41 -
4.2.2 Cálculo del NPSH con toma de datos automática	- 43 -
4.2.3 Influencia de la velocidad de giro del rodete en el NPSH _r	- 45 -
4.3 Justificación de las medidas	- 47 -
Capítulo 5. Prácticas de laboratorio.....	- 49 -
5.1 Introducción.....	- 49 -
5.2 Guion de prácticas	- 50 -
5.2.1 Objetivo	- 50 -
5.2.2 Descripción de la instalación	- 50 -
5.2.3 Procedimiento para la toma de datos	- 52 -
5.2.4 Cálculos.....	- 53 -
5.2.5 Presentación de resultados.....	- 54 -
5.3 Resultados orientativos de las prácticas.....	- 55 -
Capítulo 6. Conclusiones finales y trabajos futuros.....	- 57 -
6.1 Conclusiones generales.....	- 57 -
6.2 Conclusiones sobre la instalación	- 57 -
6.3 Conclusiones sobre los ensayos realizados	- 58 -
6.4 Trabajos futuros	- 58 -
Capítulo 7. Estudio económico del proyecto	- 61 -
7.1 Gastos materiales	- 61 -
7.2 Gastos de mano de obra	- 62 -
7.3 Gastos totales.....	- 62 -
Referencias.....	- 63 -
Anexo I - Planos.....	- 65 -
Anexo II - Tablas de calibración de elementos de medida	- 89 -
Anexo III - Tablas de presión de vapor	93
Anexo IV – Gráficos del cálculo plástico del depósito.....	97
Anexo V - Guía técnica del caudalímetro, presostatos, bomba y bomba de vacío. 101	

Nomenclatura

A	Área
D	Diámetro de tubería
f	factor de fricción
g	Aceleración de la gravedad
H_m	Altura manométrica
H_p	Altura de pérdidas de carga
k	Coefficiente de pérdida de carga en puntos singulares de tuberías
L	Longitud de tubería
N	Velocidad de giro en revoluciones por minuto
N_{ss}	Velocidad específica de succión
$NPSH_d$	Altura neta de succión disponible
$NPSH_r$	Altura neta de succión requerida
P	Presión
P_v	Presión de vapor
Q	Caudal
Re	Número adimensional de Reynolds
U	Potencial de fuerzas másicas
v	Velocidad media
w	Velocidad relativa del flujo

Letras griegas

ε	Rugosidad relativa de un material
λ	Parámetro característico de la geometría de la bomba
μ	Viscosidad cinemática de un fluido
π	Número pi (3'14159265...)
ρ	Densidad absoluta
ρ_w	Densidad absoluta del agua
ρ_a	Densidad absoluta del aire
σ	Número de Thoma de cavitación
ω	Velocidad de giro en radianes por segundo
ω_s	Velocidad específica

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Objetivos del proyecto

Los efectos producidos por el fenómeno de la cavitación son uno de los problemas de funcionamiento más comunes de las bombas centrífugas. Como estas son usadas en multitud de aplicaciones en ingeniería, se ha decidido mediante el presente trabajo fin de grado profundizar en el conocimiento de este fenómeno.

Se pretende ahondar en los conceptos elementales de la mecánica de fluidos sobre cavitación, los efectos que lo acompañan, las consecuencias sobre las bombas centrífugas y los estudios que investigan cómo evitarlo. Para ello se ha diseñado y construido una instalación donde se puedan hacer experimentos sobre la cavitación en bombas centrífugas. También se pretende ayudar a futuros alumnos mediante un guion que comprenda una serie de ensayos representativos que ilustren los conceptos vistos en teoría.

El procedimiento seguido para la elaboración del proyecto es el siguiente:

- Realización de diseños previos y cálculos de la instalación para comprobar la viabilidad de la instalación.
- Confirmación de los diseños y realización de un modelo 3D en CATIA obteniendo los planos necesarios para fabricar las piezas.
- Montaje de la instalación y comprobación de su correcto funcionamiento.
- Puesta a punto de los elementos de medida y realización de experimentos para comprender las leyes que rigen el comportamiento de una bomba centrífuga que sufre cavitación.
- Redacción de un guion claro y completo para la realización de prácticas de las asignaturas en las que se imparta el tema de cavitación en los Grados y Máster de la Escuela de Ingenierías Industriales.

En conjunto se ha querido realizar un proyecto que ahonde en el fenómeno de la cavitación y que aporte una herramienta más para la comprensión del comportamiento de una bomba bajo sus efectos, en este caso más específicamente, calculando el parámetro NPSH.

1.2 Estructura del proyecto

Para facilitar la comprensión, se procede a describir la estructura del proyecto en líneas generales.

- **Capítulo 1. Introducción.** Objetivo y estructura del proyecto.
- **Capítulo 2. Fundamentos teóricos.** Describe las leyes, expresiones, teoremas e hipótesis que condicionan el fenómeno de la cavitación.
- **Capítulo 3. Diseño y construcción de la instalación.** Aquí se recogen todos los bocetos, cálculos, procesos de montaje y problemas surgidos durante la construcción de la instalación, además de una memoria descriptiva de todos los elementos que forman dicha instalación y la calibración de los elementos de medida.
- **Capítulo 4. Puesta a punto y ensayos de laboratorio.** Comprende los ensayos que se han realizado en la instalación que se ha construido. También se incluyen los resultados, gráficas y comparativa con los resultados teóricos.
- **Capítulo 5. Prácticas de laboratorio.** Incluye un guion de las prácticas que podrían realizar los alumnos con la instalación diseñada. También contiene detalladas explicaciones de la instalación y los experimentos y resultados orientativos.
- **Capítulo 6. Conclusiones finales y trabajos futuros.** Resumen final del proyecto con las observaciones más importantes sobre el trabajo realizado. Se incluye además las líneas de trabajo sobre las que se podría seguir trabajando en esta instalación de cavitación.
- **Capítulo 7. Estudio económico del proyecto.** Análisis de los costes del proyecto.
- **Referencias:** Recopilación de toda la bibliografía, normas, proyectos y documentos técnicos utilizados como soporte para la realización de este trabajo.
- **Anexo I – Planos.** Croquis de definición de las piezas y conjuntos diseñadas.
- **Anexo II – Tablas de calibración de elementos de medida.** Recoge las tablas con las mediciones realizadas para la calibración de los diversos elementos de medida utilizados en la instalación.
- **Anexo III – Tablas de presión de vapor:** Recoge las tablas de presión de vapor para cada temperatura, que son frecuentemente usadas en los experimentos.
- **Anexo IV – Gráficos del cálculo plástico del depósito.** Gráficos proporcionados por el fabricante del depósito con los resultados del estudio de cálculo plástico realizado.
- **Anexo V – Guía técnica del caudalímetro, presostatos, bomba centrífuga y bomba de vacío.** Guías de los dispositivos utilizados con sus instrucciones y datos técnicos.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

2.1 Introducción

Todos los elementos que se pueden encontrar en la naturaleza pueden estar en varios estados de agregación, siendo los más importantes sólido, líquido y gaseoso. Como estos estados varían en función de la presión y la temperatura, se suele representar en un gráfico la variación de los estados respecto a las dos variables mencionadas anteriormente, en lo que se conoce como diagramas de estados y que también incluyen las curvas de cambio de fase.

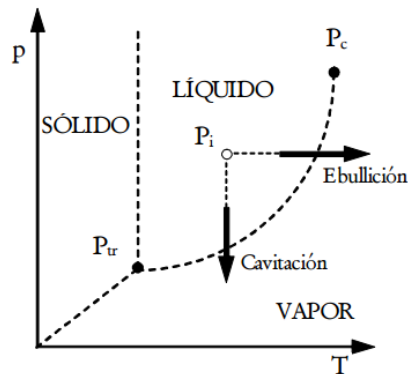


FIGURA 1. ESQUEMA GENERAL DE DIAGRAMA DE ESTADOS Y CURVAS DE CAMBIO DE FASE [3].

Según se puede observar en la Figura 1, se puede conseguir que un líquido pase a estado de vapor mediante un aumento de temperatura (lo que se conoce como ebullición) o por una disminución de la presión, que es el mecanismo básico de la cavitación. Por ejemplo, como la presión en altura es menor que la del nivel del mar, un montañero hirviendo agua para cocinar a los 8848 metros de altura del Everest comprobará que el agua hierve aproximadamente a 72°C ya que la presión en la cima es un tercio de la que se puede encontrar al nivel del mar [1 y 2].

Es entonces cuando aparece el concepto de presión de vapor. En la Figura 1 la presión de vapor para una temperatura dada es el punto de corte entre la curva de cambio de fase líquido-vapor y la vertical de la temperatura a la que se encuentre el fluido. Como se puede ver, claramente aumenta cuando aumenta la temperatura, es decir, cuanto mayor sea la temperatura del líquido, menos se tendrá que disminuir la presión para pasar a estado de vapor.

En términos teóricos, la presión de vapor a una temperatura dada se define como la presión a la que el líquido se encuentra en equilibrio con su propio vapor, es decir, en la superficie libre del líquido se produce evaporación y condensación en la misma proporción. Si no hay superficie libre en el líquido (como en el caso de circulación por una tubería) y la presión del líquido es inferior a la presión de vapor, se producirán burbujas de vapor en el interior del líquido [3].

Con la ecuación de la energía se puede analizar la instalación y calcular la presión en cualquier punto de la misma. En general, los puntos elevados son críticos y susceptibles de alcanzar la presión de vapor. Otro de los puntos de baja presión es la aspiración de una bomba instalada en el sistema.

Si se alcanza en ese punto la presión de vapor, se producen burbujas de vapor que al ir progresando a lo largo del rodete colapsan bruscamente, produciendo vibraciones y erosiones que acaban reduciendo el rendimiento de la bomba e incluso dejándola fuera de servicio a largo plazo. Como las bombas hidráulicas tienen múltiples aplicaciones en la sociedad y la industria actual, es muy importante tener en cuenta el fenómeno de cavitación y conocer lo suficiente sobre él para poder prevenirlo y ahorrar problemas, averías y dinero.

2.2 Bombas centrífugas

2.2.1 Clasificación

Una bomba centrífuga es una máquina de fluido, es decir, un sistema mecánico que intercambia energía con un fluido que circula a través de él. Dentro de las máquinas de fluidos se hacen más subdivisiones teniendo en cuenta el sentido de transferencia de energía entre la máquina y el fluido, el grado de compresibilidad del fluido utilizado y el principio de funcionamiento.

Una bomba centrífuga comunica energía al fluido, ya que el fluido experimenta un incremento de energía específica entre las secciones de entrada y salida de la bomba. Si es el fluido el que comunica energía a la máquina, sería una turbina. Estas también pueden sufrir cavitación, pero el caso que se va a estudiar está centrado en bombas.

De acuerdo a la compresibilidad del fluido que circula por su interior, una bomba se considera máquina hidráulica, puesto que el fluido que atraviesa la bomba no sufre variaciones de volumen específico. Esto simplifica los cálculos ya que se podría realizar un balance de energía mecánica, siendo innecesario usar la ecuación de conservación de la energía total. Si el fluido sufriera variaciones de volumen específico se hablaría de máquinas de flujo compresible.

Respecto al principio de funcionamiento, las bombas centrífugas son máquinas dinámicas porque se basan en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido. Y más específicamente rotodinámicas, porque su elemento principal tiene movimiento giratorio y lo que se produce es un intercambio de energía con el fluido a través de una variación de momento cinético. Otro tipo de máquinas son las de desplazamiento positivo [3].

2.2.2 Descripción

Una bomba centrífuga tiene varias partes diferenciadas. Como ya se ha hablado, al ser una bomba rotodinámica tiene una parte móvil con movimiento giratorio, que se denomina rodete. Es una rueda provista de álabes que gira con el eje de la

máquina y que es la que transmite la energía al fluido. Dependiendo de la dirección de flujo en su interior se clasifican en:

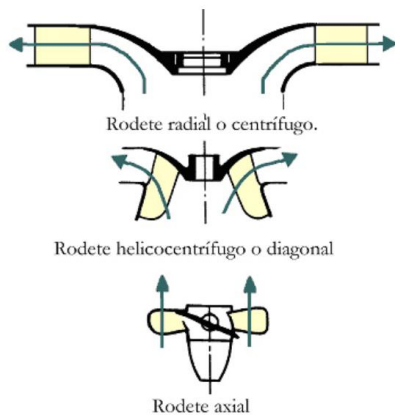


FIGURA 2. TIPOS DE RODETE SEGÚN LA DIRECCIÓN DE FLUJO [3].

-Rodetes radiales o centrífugos, en el que las trayectorias que describen las partículas fluidas entre los álabes están contenidas en los planos perpendiculares al eje de rotación.

-Rodetes axiales, en el que las trayectorias están contenidas en superficies cilíndricas, coaxiales con el eje de la máquina.

-Rodetes diagonales o helicentrífugos, en el que las trayectorias están contenidas en

superficies cónicas coaxiales.

Se van a estudiar solo los rodetes radiales o centrífugos porque es el tipo que más se ve afectado por la cavitación como se verá posteriormente.

La parte estática de la bomba la forman la corona directriz, el difusor y la voluta o cámara espiral. La corona directriz es la zona de entrada y se encarga de conducir el fluido hasta el rodete. Dependiendo de la bomba podrá tener álabes para que el fluido incida con un ángulo determinado o también puede ser una tubería normal. El difusor está a la salida del rodete y guía el flujo de líquido hacia la voluta de forma hidráulicamente eficiente. En la bomba con la que se va a trabajar no hay difusor ni álabes en la corona directriz.

La voluta es la cámara que rodea al rodete y que recoge el flujo que sale de él y lo conduce hacia la impulsión recuperando energía de presión a partir de la energía cinética del fluido. En el sentido de avance del fluido, la voluta muestra secciones transversales crecientes y como el caudal se mantiene constante, la velocidad disminuye según la ecuación de conservación de la masa, que aplicada en un caso estacionario queda:

$$Q = A \cdot v = cte$$

ECUACIÓN 1

Donde Q es el caudal, A es el área de la sección y v la velocidad media del fluido en esa sección. Aplicando la ecuación de la energía mecánica entre dos secciones al comienzo y final de la voluta se puede deducir que la reducción de la velocidad se traduce en un aumento de la presión a la salida de dicha voluta.

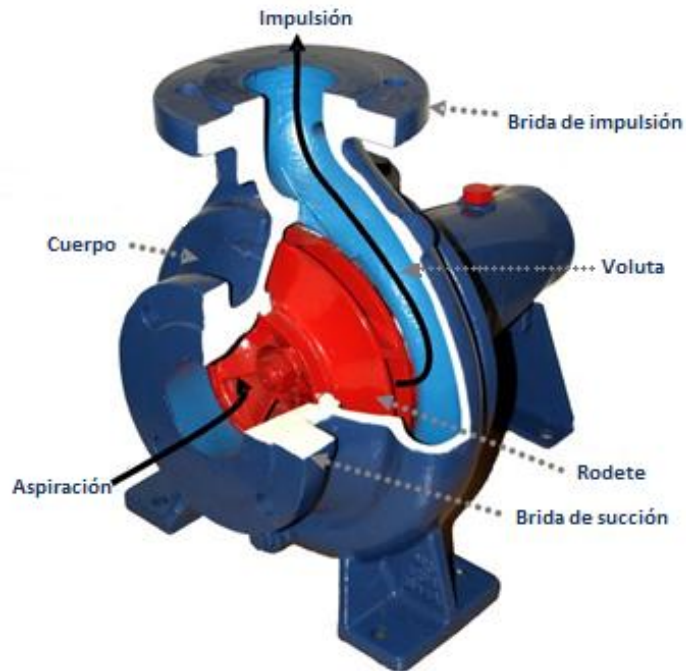


FIGURA 3. BOMBA CENTRÍFUGA [4].

2.2.3 Definición de alturas

Hay varias definiciones interesantes dentro de las bombas centrífugas que se usarán posteriormente para hablar de la cavitación en bombas centrífugas, por lo que es necesario tener claros algunos conceptos.

Restando al balance de energía total en una máquina de fluido el balance de energía interna para una máquina hidráulica, se obtiene el balance de energía mecánica en una máquina hidráulica, que aplicado entre la entrada y salida de la bomba quedaría:

$$\left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + U\right)_s - \left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + U\right)_e = \frac{W}{G} - \frac{\overline{\Phi}_v}{G}$$

ECUACIÓN 2

El primer término es la energía mecánica específica que posee el fluido a la salida, el segundo es la energía mecánica específica que posee el fluido a la entrada, el tercero es la energía mecánica intercambiada por unidad de masa que atraviesa la máquina y el cuarto es la energía degradada por unidad de masa que atraviesa la máquina. Normalmente las energías específicas en hidráulica se expresan en función de una altura por la gravedad. Se definen:

Altura manométrica (H_m) como la diferencia entre las energías mecánicas a la salida y a la entrada de la bomba.

$$\left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + U\right)_s - \left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + U\right)_e = g \cdot H_m$$

ECUACIÓN 3

Altura útil (H_u) como la energía aportada por el eje de la máquina.

$$\frac{W}{G} = g \cdot H_u$$

ECUACIÓN 4

Altura de pérdidas internas (H_{p_int}) como las pérdidas de energía mecánica en el interior de la máquina debido a la disipación viscosa.

$$\frac{\overline{\Phi}_v}{G} = g \cdot H_{p_int}$$

ECUACIÓN 5

2.3 Cavitación en bombas centrífugas

2.3.1 Introducción

Es importante precisar que los mecanismos que rigen la creación y colapso de las burbujas de vapor en la cavitación en bombas centrífugas son complejos y se siguen realizando estudios y experimentos científicos para describir dichos mecanismos, por lo que se hará una explicación teórica general para centrarse en la cavitación en las bombas centrífugas, sus parámetros y cómo evitarla.

2.3.2 Efectos

Como se explicó en la introducción, tiene que ver con la presión de vapor. Hay que tener en cuenta que la menor presión posible en un líquido no es la presión cero, sino la presión de vapor [5]. Se suele pensar que la evaporación ocurre solo cuando aumenta la temperatura, pero también puede producirse bajando la presión del líquido [6], como se vio en la Figura 1.

La presión de vapor varía según aumenta la temperatura a la que se encuentre el líquido (en este caso agua), llegando hasta una atmósfera cuando la temperatura es de 100 °C, que es a lo que se está acostumbrado. Cuando en algún punto el fluido está a la presión de presión de vapor o menos, se producen esas burbujas de vapor [1].

Por tanto, los puntos más peligrosos para la cavitación son los de presión mínima y en este caso se localiza en la entrada al rodete [5]. Cuando ahí se forman burbujas de vapor, continúan por el rodete hasta que la presión es suficiente como para que colapsen repentinamente y provoquen daños, vibraciones y pérdidas de rendimiento (Figura 4). La presión a lo largo del rodete va creciendo porque al girar transfiere momento cinético al fluido y este aumenta su energía.

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

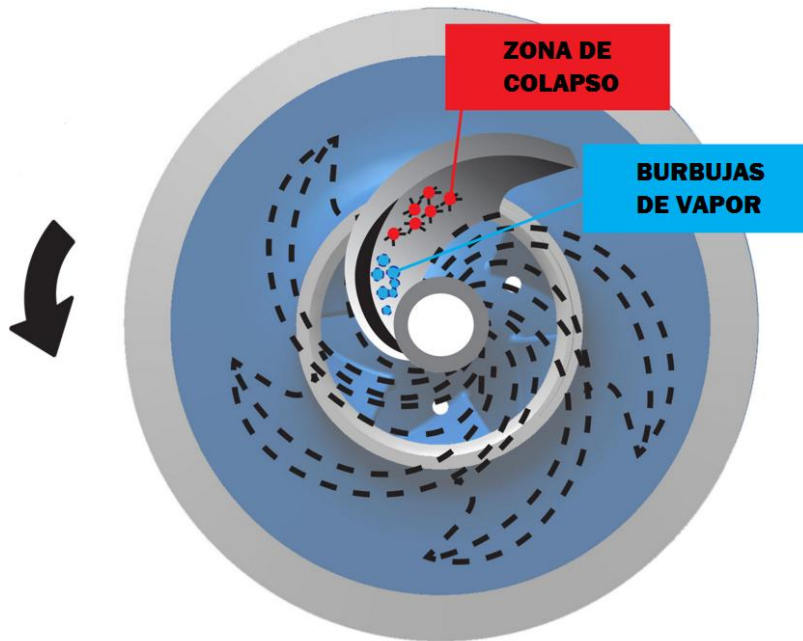


FIGURA 4. LA IMPLOSIÓN SE PRODUCE CUANDO LA PRESIÓN AUMENTA EN EL RODETE [7].

La cavitación se puede detectar por un ruido similar al de canicas o piedras en un tarro [8], vibraciones y disminución del caudal y de la altura manométrica. En la industria hidráulica se considera que la cavitación aparece cuando se produce un descenso de la altura manométrica a partir del 3% [6, 9 y 10], aunque algún estudio también indica que puede considerarse una caída del 3% en el caudal [11], algo que se discutirá más adelante.

En Estados Unidos este valor viene dado por el Hydraulic Institute en colaboración con el Instituto Nacional de Estándares Americanos (American National Standards Institute, ANSI), de acuerdo con la norma ANSI/HI 9.6.1-2012 [12]. En Europa esas normas también están recomendadas por Europumps, la Asociación Europea de Bombas (European Association of Pumps) [13].

2.3.3 Consecuencias

Se ha comentado que hay diversas teorías que tratan de explicar los fenómenos de gran complejidad que ocurren en el corto espacio de tiempo en el que se produce la cavitación, uno de ellos indica que el cambio de estado de esas burbujas a estado líquido es una reacción violenta que produce microchorros de líquido a muy alta presión, que puede desgastar y arrancar pequeñas partículas del metal, erosionando el rodete. Este efecto se produce miles de veces por segundo (estimaciones hablan de 25 KHz) y a altísima presión (entre 400 y 700 MPa) [6 y 9].

En la Figura 5 se puede observar un esquema que trata de explicar el fenómeno cuando las burbujas aparecen cerca de una superficie sólida y en la Figura 6 la explicación de cómo se producen esos microchorros.

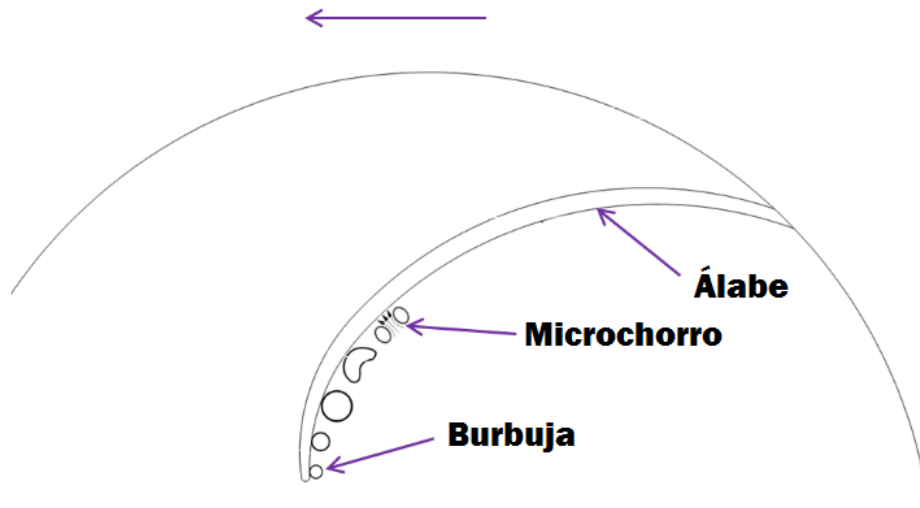


FIGURA 5. ESQUEMA DE LA CAVITACIÓN [14].

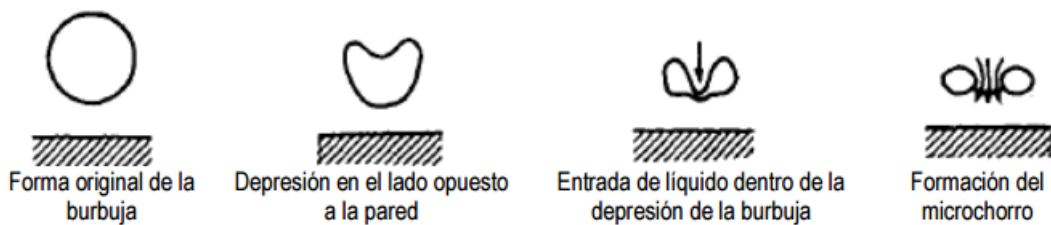


FIGURA 6. ESQUEMA DE LA DESAPARICIÓN DE LA BURBUJA Y APARICIÓN DE MICROCHORRO [3].

Aunque el estudio de las burbujas en el fenómeno de la cavitación es muy complejo, algunos experimentos han llegado a la conclusión de que el crecimiento de la cavitación está controlado por los límites de las transferencias de calor en la frontera entre vapor y líquido. Esto provoca que de 0°C a 42°C el tamaño de la burbuja sea grande y cuanto más cerca de los 100°C más pequeñas y más numerosas son estas burbujas. La implosión de las burbujas grandes es más dañina y más peligrosa produciendo ese típico ruido por el que se detecta la cavitación [10].

Los principales problemas que causan son ruidos y vibraciones, erosión en los álabes del rodete que puede provocar corrosión y fatiga en el material (la fatiga es el fenómeno por el que componentes que están operando se rompen de manera brusca por debajo de su carga de rotura debido a las cargas cíclicas y variables en el tiempo) [15]. Además, las partículas desprendidas del rodete pueden estropear las juntas y los rodamientos. En un caso extremo, con exposición muy prolongada, puede provocar incluso un fallo estructural de la máquina [6 y 9].



FIGURA 7. DAÑOS POR CAVITACIÓN DONDE LAS BURBUJAS COLAPSAN [16 Y 17].

Para evitarlo se intentará trabajar lo más lejos posible de las condiciones que pueden producir cavitación, es decir, se debe asegurar que la presión más baja del circuito sea suficientemente superior a la presión de vapor del agua a la temperatura a la que se encuentre [6].

2.4 NPSH requerido y disponible

Para intentar evitar en lo posible la cavitación, se hacen cálculos para minimizarla o se buscan herramientas para intentar contrarrestarlo, por ello se van a estudiar los puntos de riesgo, que son los de mínima presión. En el caso de bombas centrífugas, ese punto va a ser la entrada del rodete.

Se aplica la ecuación de conservación de la energía mecánica (Ecuación 6) entre la superficie libre del líquido que se aspira (Punto D) y la entrada de la bomba (Punto A) como se puede ver en la Figura 8 [3]:

$$\left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + U\right)_A - \left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + U\right)_D = -g \cdot H_p$$

ECUACIÓN 6

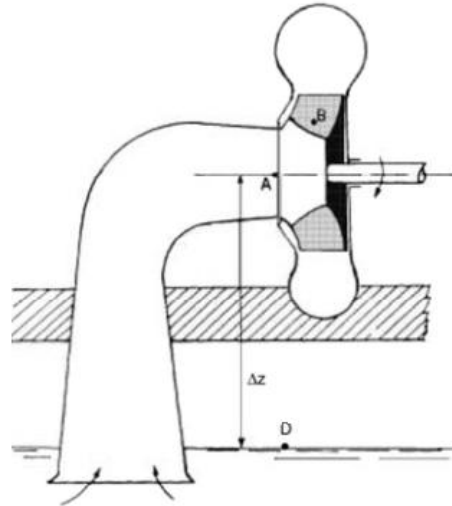


FIGURA 8. ESQUEMA DE LA BOMBA PARA EL BALANCE [3].

Si se resta en cada lado P_v/ρ y se reorganiza, queda:

$$\frac{P_D - P_v}{\rho} + \frac{v_D^2 - v_A^2}{2} + U_D - U_A - g \cdot H_p = \frac{P_A - P_v}{\rho}$$

ECUACIÓN 7

Como se ha dicho antes, se quiere evitar la aparición de cavitación en la entrada del rodete, el punto A, por lo que P_A tiene que ser mayor que la presión de vapor. Así que la parte de la izquierda de la Ecuación 7 tiene que ser mayor o igual que cero. Además, se considera que en el punto D la velocidad es despreciable y que las únicas fuerzas másicas son las gravitatorias, quedando:

$$\frac{P_D - P_v}{\rho} - \frac{v_A^2}{2} - g \cdot (z_A - z_D) - g \cdot H_p \geq 0$$

ECUACIÓN 8

Para representar las pérdidas de carga adicionales que se producen en la entrada del rodete (entre A y B) se añade un nuevo término:

$$\frac{P_D - P_v}{\rho} - \frac{v_A^2}{2} - g \cdot (z_A - z_D) - \lambda \cdot \frac{w_B^2}{2} - g \cdot H_p \geq 0$$

ECUACIÓN 9

En el nuevo término, λ es un parámetro característico de la geometría de la bomba y w_B es la velocidad del flujo relativo en la aspiración.

Se observa que algunos de esos factores de la Ecuación 9 dependen de la bomba y otros de la instalación. Agrupando los de la instalación se define la altura neta

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

máxima disponible de aspiración ($NPSH_d$) y los que tienen que ver con la bomba definen la altura neta máxima requerida de aspiración ($NPSH_r$).

$$\frac{v_A^2}{2 \cdot g} + \lambda \cdot \frac{w_B^2}{2 \cdot g} \leq \frac{P_D - P_v}{\rho \cdot g} - \Delta z_{asp} - H_{p_{asp}}$$

ECUACIÓN 10

$$NPSH_d = \frac{P_D - P_v}{\rho \cdot g} - \Delta z_{asp} - H_{p_{asp}}$$

ECUACIÓN 11

$$NPSH_r = \frac{v_A^2}{2 \cdot g} + \lambda \cdot \frac{w_B^2}{2 \cdot g}$$

ECUACIÓN 12

Como el $NPSH_r$ es la altura que tiene que tener el fluido a la entrada de la bomba para que no se produzca cavitación y el $NPSH_d$ es la altura que tiene el fluido a la entrada de la bomba, está claro que se tiene que cumplir:

$$NPSH_d \geq NPSH_r$$

ECUACIÓN 13

Analogía de la puerta giratoria. Para explicar el NPSH a veces se recurre a una puerta giratoria, que necesita ser empujada para que al girar se pueda pasar. Pero si la persona que quiere entrar no tiene la fuerza suficiente, la puerta no girará. En el caso de estudio, el $NPSH_r$ es la fuerza que hace falta para abrir la puerta y el $NPSH_d$ es la fuerza que tiene la persona que quiere entrar [9].

Estos parámetros permiten “jugar” para evitar la cavitación. Por ejemplo si hay una instalación determinada y se necesita una bomba, se hacen los cálculos del $NPSH_d$ y se ve qué bomba tiene el $NPSH_r$ para que no se produzca la cavitación. O si ya se tiene una bomba con un $NPSH_r$, con el $NPSH_d$ se estudiaría cómo alterar la instalación para asegurar que no se produzca cavitación.

Determinación del $NPSH_r$. El $NPSH_d$ es fácilmente calculable con los datos de la instalación, pero los datos para calcular de forma teórica el $NPSH_r$ no son sencillos de obtener, por lo que este parámetro se obtiene en la mayoría de los casos de forma empírica. En Estados Unidos ese experimento sigue un criterio impuesto por el Instituto de Estándares Hidráulicos para bombas centrífugas, que es que el $NPSH_r$ se alcanza cuando una bomba centrífuga funcionando a un caudal y velocidad constante, sufre una caída del 3% en su H total [9], es decir, en el momento en el que se iguala al $NPSH_d$, que es fácilmente calculable.

El test consiste en establecer un $NPSH_d$ alto y obtener la altura, caudal y rendimiento de la bomba. Se reduce el $NPSH_d$ (cambiando la presión del aire o el

nivel del líquido en el depósito) y con la válvula de descarga se vuelve a poner el mismo caudal, calculando también la altura y rendimiento. Esto se hace hasta que la altura y el rendimiento caen un 3% [6], aunque también se puede detectar por los ruidos y vibración al colapsar las burbujas [3]. Puede parecer este último método más subjetivo e inexacto, pero luego se verá que los resultados son muy parecidos.

Márgenes del NPSH. Se supone que si el $NPSH_d$ es mayor o igual que el requerido, no ocurrirá la cavitación, pero esa afirmación no es del todo cierta, puesto que la cavitación empieza antes de la caída del 3% de la altura manométrica, solo que se supone que empieza a tener consecuencias negativas a partir de ese punto [14]. Una de las razones de que se desarrolle la cavitación antes de poder detectarla es el retraso dinámico, y lo producen los fenómenos de inercia que acompañan a la formación de la cavidad de un tamaño suficiente para ser detectada [3].

Para evitar esa difusa frontera se recomienda estar un cierto margen por encima para asegurar el correcto funcionamiento de la bomba. Los que quieren evitar la aparición de cavitación hasta en su forma más débil sitúan ese margen en que el $NPSH_d$ ha de ser el 250%-560% del requerido [10 y 14]. Algún estudio sitúa el margen de los daños para la bomba en el 10% [6], otros dicen que el disponible debe ser 2 pies (0'6 m) superior al requerido y el Instituto Hidráulico recomienda para las bombas normales un 30% y para las de alta succión un 60%, que en ese caso puede ser difícil de obtener [8, 9 y 12].

Otros parámetros. El NPSH no es el único parámetro que estudia la cavitación, puesto que la industria hidráulica ha seguido trabajando para intentar evitar un problema que supone el 40% de las averías y problemas relacionados con las bombas [9].

Hay dos parámetros adimensionales más que se usan en el diseño de bombas. También están basados en el $NPSH_r$ y son la velocidad específica de succión (N_{ss}) y el parámetro de cavitación de Thoma (σ).

La **velocidad específica de succión (N_{ss})**. Está basado en la velocidad específica (Ecuación 14), que es un parámetro adimensional que se interpreta como las revoluciones por minuto a las que tendría que girar la máquina para elevar un caudal de 1 m³/s a 1 metro de altura y que sirve para determinar dentro de un rango de bombas la que se adapta mejor a las condiciones de trabajo que se van a requerir.

$$\omega_s = \frac{\omega \cdot \sqrt{Q}}{(g \cdot H)^{3/4}}$$

ECUACIÓN 14

Sustituyendo la altura por el $NPSH_r$ (Ecuación 12), se consigue la velocidad específica de succión [6]. Si la N_{ss} es muy alta (superior a 174) y se hace trabajar a

la bomba lejos de su punto de máxima eficiencia, se producen vibraciones que reducen la vida útil de la bomba. Estas vibraciones se deben a recirculaciones internas, pero el fenómeno desaparece si se la hace operar dentro de su región permitida. Las bombas de baja N_{ss} tienen valores más altos de NPSH y pueden tener menos eficiencia, pero se ven menos afectadas por operar en rangos de caudal alejados del punto de máxima eficiencia [18].

$$N_{ss} = \frac{\omega \cdot \sqrt{Q}}{(g \cdot NPSH_r)^{3/4}}$$

ECUACIÓN 15

El **número de Thoma** (σ) relaciona el $NPSH_r$ con la altura manométrica (Ecuación 16). Este valor se compara con el número crítico de cavitación (σ_c), que es el valor del número de Thoma a partir del cual se produce cavitación y que puede ser obtenido mediante tablas o mediante relaciones empíricas, aunque sobre todo está estudiado para turbinas. Si el número de Thoma es mayor que el factor crítico, no se producirá cavitación [19].

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

ECUACIÓN 16

Despejando el $NPSH_r$ en la Ecuación 15, sustituyendo en la Ecuación 16 y haciendo unos cálculos usando la fórmula de la velocidad específica [3], se llega a la siguiente relación [6]:

$$N_{ss} = \frac{\omega_s}{\sigma^{3/4}}$$

ECUACIÓN 17

Además de estos dos parámetros, se siguen investigando nuevos parámetros que puedan facilitar la determinación de si una bomba sufrirá cavitación o no. Uno de ellos es el **NPSH(π)** y nace porque el NPSH no cubre totalmente el rango de temperaturas y velocidades de bomba del mercado [10].

El NPSH convencional funciona en un rango de temperaturas de entre 0 y 40°C y con bombas funcionando hasta 3600 rpm, pero hay aplicaciones que nos van a exigir temperaturas y velocidades superiores, como pueden ser en la industria química. Para ello se realizan unos ajustes siguiendo las reglas de semejanza para diferentes velocidades [3] y se añade un margen del 250% para evitar los problemas que puede haber a alta temperatura por la exactitud de las medidas y la posible mala homogeneidad debida a recirculaciones de equilibrado que puede hacer que caviten las zonas más calientes (Ecuación 18) [10].

$$NPSH(\pi) = 2'5 \cdot NPSH_r \cdot \left(\frac{3600}{N}\right)^2$$

ECUACIÓN 18

Siendo N la velocidad de giro de la bomba en revoluciones por minuto.

2.5 Cómo evitar la cavitación

Una vez que se ha definido qué es la cavitación y por qué se produce, llega una de las partes con más interés de cara a las aplicaciones en la industria. El diseño de una instalación con una bomba dada o la elección de la bomba para una instalación no ha sido la correcta y la bomba cavita. ¿Qué se puede hacer para evitarlo?

Reducir el NPSH_r. Este parámetro depende de la bomba y es el más difícil de variar, pero aun así hay varias soluciones para intentar disminuirlo:

- Coger un rodete con un NPSH_r más pequeño, que muchos fabricantes ofrecen opcionalmente. Estos rodetes tienen generalmente un área de entrada mayor, con lo que reducen la energía absoluta requerida para que se produzca la cavitación [8].
- Instalar una bomba más grande a una velocidad más pequeña para seguir con el mismo caudal. Al tener un área de entrada más grande disminuye el NPSH_r. Aunque es una solución costosa económicamente, puede merecer la pena si acaba con la cavitación [8].
- Algunos fabricantes ofrecen cambiar la tuerca del rodete por un rodete axial o helicoidal de gran succión que actúa como una bomba de refuerzo impulsando el líquido hacia la entrada del rodete de la bomba, reduciendo el NPSH_r porque aumenta la presión a la entrada [8]. Esta opción ya era investigada por la NASA en los años 70 [20] y está bastante desarrollada [21 y 22]. Los principales problemas son que la bomba admita este rodete y asegurar que la bomba que se introduce no sufra cavitación a la presión a la que va a trabajar [23].

Las características de una bomba y rodete para que su NPSH_r sea pequeño son: que el ángulo de entrada sea lo más favorable al flujo, tener superficies de álabe grandes e hidrodinámicas, que no haya violentos cambios de dirección en la entrada del cuerpo de la bomba y en la boca del rodete y que las paredes sean lisas y los ángulos lo más abiertos posible en las secciones de entrada de los canales del rodete [3 y 5].

Aumentar el NPSH_d. Las variables de las que depende este parámetro son más fácilmente cuantificables y permiten alterar la instalación de varias maneras útiles para intentar aumentar el NPSH_d y evitar la cavitación [5, 6 y 8]. Volviendo a poner la Ecuación 11 para comprobar cada factor:

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

$$NPSH_d = \frac{P_D - P_v}{\rho \cdot g} - \Delta z_{asp} - H_{p_{asp}}$$

- Cerrando el depósito de la aspiración y presurizándolo aumentando su presión, se consigue aumentar el $NPSH_d$. En el experimento que se realizará en el presente trabajo, lo que se quiere es provocar cavitación así que se hará lo contrario, es decir, se provocará el vacío en él.

- Como $\Delta z = z_{bomba} - z_{sup \text{ libre}}$, hay que conseguir que la entrada de la bomba esté lo más cerca posible de la superficie libre del agua del depósito, o mejor aún, que la bomba esté por debajo de la superficie libre del depósito, con lo que Δz sería negativo y aumentaría más el $NPSH_d$. No solo por esto debe estar la bomba por debajo o cerca de la superficie libre, sino porque podrían existir problemas de cebado de la bomba y si se queda aire atrapado la bomba no funcionaría correctamente.

- Disminuir en todo lo posible las pérdidas por fricción en la aspiración. Según la Ecuación 19 [3], se podría aumentar el diámetro de tuberías para disminuir las pérdidas por fricción, hacer que las tuberías vayan más en línea recta y reducir el número de codos para reducir la fricción, sustituir los codos por curvas con un radio mayor o cambiar las válvulas de asiento por válvulas de esfera que tienen menos pérdidas (aunque no permiten el manejo tan preciso del caudal).

$$H_{p_{asp}} = \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2} \cdot \left(\sum f_i \frac{L}{D_i^5} + \sum \frac{k_i}{D_i^4} \right)$$

ECUACIÓN 19

- Intentar que la presión de vapor sea lo menor posible. Teniendo en cuenta que la presión de vapor depende directamente de la temperatura [1], al hacer que la temperatura del agua sea la menor posible, disminuye el $NPSH_d$.

Reforzar la bomba y reparar los daños. Si después de hacer todo lo anterior (o por la imposibilidad de hacerlo) sigue produciéndose cavitación, es porque es imposible evitarlo, con lo que habrá que centrarse en que sus consecuencias sean las mínimas posibles. Se intentará que los materiales de la bomba y del rodete sean lo más resistente posible.

Bronce, fundición de hierro o metales blandos no son buenos candidatos a resistir adecuadamente las consecuencias de la cavitación, sobre todo para los rodetes. Al menos se debe usar acero 316 SS (Stainless Steel, acero inoxidable) para el rodete, que se puede pedir al fabricante y los suelen tener disponibles. O aceros con alto contenido en cromo o manganeso y otros metales duros resistirán bien. Y si se trabaja con fluidos a alta temperatura con mucha más razón. Además hay que evitar que las zonas mecanizadas tengan marcas o señales que faciliten el desgaste y la erosión [5 y 8].

Si teniendo en cuenta todo lo anterior es imposible evitar la aparición de cavitación y los materiales empiezan a desgastarse a pesar de ser materiales duros y resistentes, algunas empresas se están especializando en el arreglo de bombas y rodetes mediante el empleo de un compuesto de acero cerámico reforzado con polímero para poder seguir trabajando con esas piezas como se puede comprobar en la Figura 9 [17].



FIGURA 9. ANTES Y DESPUÉS DE UN ARREGLO DE UNA TURBINA CON BELZONA [24].

Aire en la entrada no es cavitación. Muchas veces el mal rendimiento de una bomba y que no impulse lo que realmente debería, es porque está entrando aire de alguna manera al sistema que está desplazando agua que de otra manera hubiera sido impulsada. El ruido producido se parece a la cavitación incipiente, pero no lo es y además tiene varias maneras de ser fácilmente solucionable teniendo en cuenta un par de puntos [9]:

- Que no haya caídas libres de agua en el depósito que introduzcan aire en el fluido o sumideros de conducciones cerca del nivel del agua que metan aire a la succión.
- Que el proceso en sí puede producir burbujas, espuma o emitir oxígeno u otros gases desplazando el líquido
- Que si en el depósito no hay agua suficiente puede provocar vórtices en el depósito, introduciendo aire en le entrada.

Teniendo estas cosas en cuenta para evitar la entrada de aire a la conducción de aspiración se evitarán problemas y mejorarán las capacidades de la bomba.

2.6 Algunos experimentos de laboratorio sobre cavitación en bombas

Hay varios experimentos de laboratorio parecidos al que se va a realizar. Uno es de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional autónoma de México, en Ciudad de México [11]. Su instalación consiste en un circuito hidráulico cerrado alimentado por una bomba centrífuga con tuberías transparentes de acrílico que permiten visualizar el flujo del fluido y la formación de burbujas. Para provocar la cavitación

estrangulaban la válvula de succión, lo que hace que aumenten las pérdidas y por tanto que disminuya la presión a la entrada de la bomba. Cuando la presión a la bomba es menor que la presión de vapor, la bomba entra en cavitación. Toman los datos de caudal, presión a la entrada y salida del rodete a la entrada y salida de la bomba mediante transductores piezoeléctricos de presión y temperatura del líquido. Solo obtienen gráficas de presión y no calcularon el NPSH_r.

Otra es de la Universidad Carlos III de Madrid, con una instalación parecida a la del experimento anterior pero hacen cavitación en la válvula de entrada que están estrangulando. Después de la válvula colocaron un tramo transparente de tubo para poder ver, con la ayuda de un estroboscopio, la aparición de burbujas e incluso su colapso. Además de la cavitación en la válvula, también se producía la cavitación de la bomba, produciéndose una caída en la diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la bomba que estaban midiendo. Cuando ese dato caía el 3% paraban y calculaban el NPSH [25].

Lo novedoso del proyecto que se ha realizado es que se provoca la cavitación con una bajada de la presión en el depósito, es decir, sin alterar el caudal que está circulando por haber estrangulado una válvula y que hace que los cálculos para determinar el NPSH sean más exactos.

2.7 Otras aplicaciones de la cavitación

La cavitación era un fenómeno poco conocido para la gente no involucrada en ingeniería y más específicamente en hidráulica, pero desde hace unos años una de sus aplicaciones ha acercado a la sociedad este término. En numerosos centros de belleza han aparecido tratamientos de adelgazamiento mediante cavitación, que se vende como un sistema relativamente rápido y seguro para eliminar grasa localizada.

El fundamento se basa en la aplicación de ultrasonidos en la capa de tejido adiposo que provocan ciclos de contracción y expansión en las células de grasa. En los ciclos de expansión se produce vacío, lo que unido al calor provocado por las ondas, hace que se produzcan microburbujas que al colapsar van rompiendo el envoltorio de las células de grasa y haciendo que se descompongan y posteriormente sean reabsorbidas por el cuerpo y expulsadas del organismo [26]. Aunque sobre todo se usan ondas mecánicas de ultrasonidos, se están empezando a usar ondas electromagnéticas de alta frecuencia en la llamada cavitación intraadipocitaria [27].

Otra aplicación benigna de la cavitación por ultrasonidos puede ser la que se usa para los dispositivos de limpieza ultrasónicos, en los que una fuente de ultrasonidos produce millones de minúsculas burbujas de cavitación en un fluido para arrancar la suciedad de objetos delicados, como joyas, instrumentos ópticos y quirúrgicos [28]...

También se puede ver cavitación cuando en las articulaciones humanas se crea una depresión por decoaptación rápida de superficies articulares, que provoca que los gases disueltos en el líquido sinovial pasen a estado gaseoso en forma de microburbujas. Al volver la articulación a su estado normal la presión aumenta y las burbujas colapsan produciendo el típico chasquido que se oye. Si se repitiera excesivamente acabaría dañando la articulación [29].

Investigadores de la Universidad Carlos III de Madrid se preguntaron por qué se derramaba la cerveza cuando se da un golpe a la boca del botellín. Tras diversas pruebas llegaron a la conclusión de que las ondas de presión producidas hacen que se produzca la cavitación del gas disuelto y aparezcan pequeñas burbujas en la base que en su ascensión provocan una liberación del CO₂ de la cerveza que hace que se salga [30].

Aunque en la mayoría de los casos expuestos no se habla rigurosamente de cavitación, si no de pseudocavitación, porque las burbujas creadas son burbujas del gas disuelto en ese líquido, y como se definió anteriormente la cavitación propiamente dicha es la que se produce al cambiar de estado el propio fluido.

También es interesante el fenómeno de supercavitación, que ocurre al moverse un sólido a muy alta velocidad en el seno de un fluido. Por la viscosidad, el líquido que arrastra con el fluido aumenta mucho su velocidad, con lo que disminuye su presión y si se da el caso, puede llegar a la presión de vapor y producirse burbujas que hacen que disminuya el rozamiento. El principal uso de la supercavitación ha sido en aplicaciones militares, como torpedos de submarinos [31].

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Capítulo 3. Diseño y construcción de la instalación

3.1 Introducción

En este capítulo se describe desde las primeras ideas de concepción de la instalación, pasando por los cambios realizados en esos bocetos para adecuarlo a las exigencias técnicas hasta la instalación final tal como está montada después de fabricar las piezas, soldarlas, cambiar los diseños anteriores por diversos problemas y ajustes y realizar las pruebas de calibración y comprobaciones necesarias.

3.2 De la idea al primer diseño

Lo primero que había que tener claro era el tipo de instalación que se quería tener, un circuito sencillo que iba a constar de un depósito cerrado con una tubería de salida y una tubería de entrada, es decir, un circuito cerrado. En ese circuito se pondría un caudalímetro, la bomba y presostatos a la entrada y salida de la bomba. Además el depósito tenía una salida superior a la que iba conectada una bomba de vacío.

¿Pero dónde colocar cada elemento? El depósito podría estar debajo o encima de la mesa, pero como iba a tener mucha agua parecía más estable estando debajo, ya que cuanto más bajo esté el centro de gravedad menos probabilidades hay que se produzca un vuelco con el riesgo que ello conllevaría. Se decidió poner la bomba anclada a un lateral y con la aspiración hacia abajo.

Los presostatos no suponían mucho problema, no así el caudalímetro. Al principio se pensó en poner un caudalímetro de área variable con tubo de plástico, con lo que debería estar en vertical y a una altura que no exigiera una postura complicada para leerlo. Además el caudalímetro debía tener antes y después un tramo de tubería recta para que las líneas de corriente fueran lo más paralelas a la tubería posible y la medida no se viera afectada por turbulencias.

También había que tener en cuenta que la salida del depósito hacia la bomba de vacío debía estar situada en la parte superior de la misma y lejos del nivel del agua para que no hubiera problemas con la posible entrada de agua en la bomba de vacío. Y la mesa debería contar con suficiente espacio para apoyar una hoja para apuntar los datos que fuesen necesarios.

Pero según se trabajaba en el diseño, fueron surgiendo ideas, dudas y modificaciones en cada una de las partes de la instalación, que se van a ir analizando por bloques.

Depósito. Esta era uno de los puntos críticos del proyecto, puesto que su tamaño, material, forma y colocación iba a marcar el resto del diseño. Al principio se barajó la compra de un depósito cilíndrico de acero inoxidable, pero al hacer los cálculos del volumen que se iba a necesitar (ver apartado 3.3.2) no encajaba adecuadamente con las dimensiones máximas deseadas de la instalación completa.

Por ello se decidió el diseño de un depósito a medida (ver Figura 10). La opción de uno de plástico transparente quedó rápidamente desechada debido a la presión de vacío que debía soportar, puesto que ya se había comprobado en una instalación previa que el plástico al combarse rajaba las uniones en las aristas. Además se tuvo en cuenta que tendría que durar mucho tiempo operativo y en condiciones de humedad constantes, por lo que se escogió de material acero inoxidable 304.

Respecto a las medidas, al colocarse en la parte posterior iba a ser un prisma rectangular estrecho. Como se necesitaba una parte de aire, se decidió dejar una cámara de aire más estrecha en la parte superior e inclinar la parte superior de la parte de agua para que las posibles burbujas de aire ascendieran a la cámara de aire y no fueran introducidas en el circuito.

Los orificios de salida y entrada al depósito estarían colocados en la parte inferior para que el agua que sale tuviera el menor aire posible y que el agua que entrara, que podría tener aire disuelto, lo soltara al ascender para sortear la costilla. Esta costilla es una plancha de acero de un metro colocada en el centro del depósito para reforzar las paredes frontales respecto a pandeo y además forzar al agua a soltar el aire.

Los orificios para el vacuómetro y la salida de aire hacia la bomba de vacío se realizaron en la parte superior para evitar la posible entrada de aire a la bomba de vacío. Otro orificio en la parte frontal a la altura hasta donde llegaría el agua podría permitir la instalación de un visor de nivel para conocer la cantidad de agua que hubiera en el depósito. En todos esos orificios se colocaron machos y hembras roscadas para el fácil ensamblaje de las tuberías.

Una vez decidido todo lo anterior y después de conocer la depresión que iba a tener que soportar (ver apartado 3.3.1), se encargó a la empresa Estructuras Metálicas

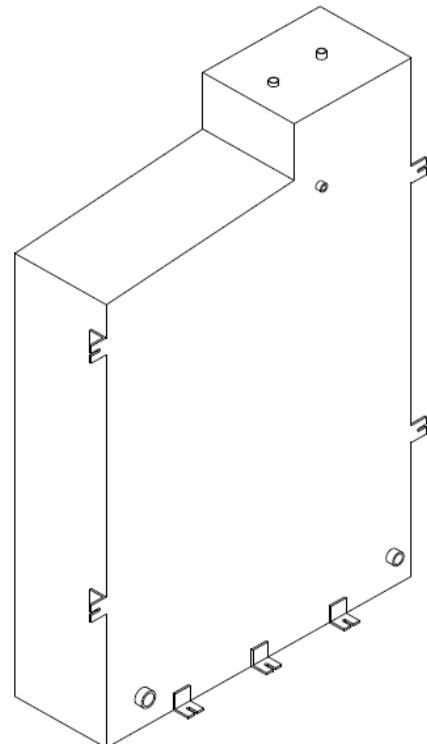


FIGURA 10. DISEÑO DEL DEPÓSITO.

Metasol S.A. la fabricación y el cálculo resistivo (ver Anexo IV). Los resultados dieron un espesor de 6 mm y se procedió a la fabricación del elemento.

Estructura. Es otra de las partes fundamentales de la instalación, puesto que soporta tanto el depósito como el resto de elementos necesarios. Primero se pensó en una estructura más completa con perfiles cuadrados de acero y mesa integrada, pero después se buscó alguna alternativa y surgió la empresa FASTEN, que trabaja con perfiles de aluminio con los que se puede montar una estructura previamente diseñada. Además los perfiles de aluminio son más ligeros, son fácilmente intercambiables y suficientemente resistentes para la instalación.

Las dimensiones de la instalación para que estuviera integrada dentro del laboratorio eran de 700 mm de ancho y 1000 mm de largo, no habiendo problemas de altura. Se usarían perfiles de 45x45 mm y en la parte inferior tendría una rueda en cada esquina para poder ser movido con facilidad.

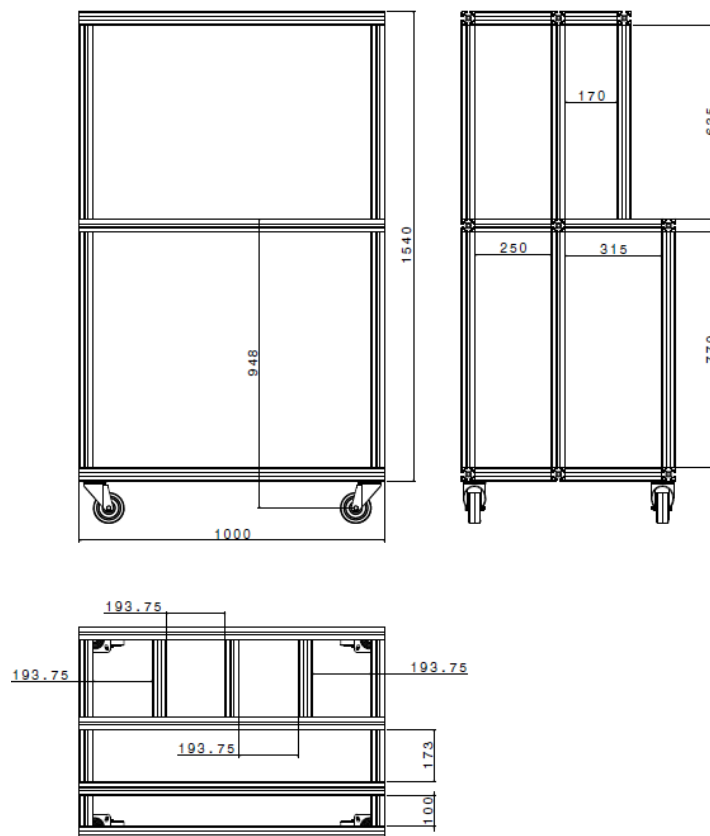


FIGURA 11. VERSIÓN 1 DE LA ESTRUCTURA.

El depósito iría colocado en el hueco de 250 mm en la parte posterior, con 3 perfiles cruzados sobre los que iría apoyado. Para reforzar ese apoyo se cambiaron los perfiles de un metro de la parte central y trasera por unos de 90x45, para que el depósito tuviera un apoyo extra además de los perfiles perpendiculares. Como los perfiles traseros verticales no soportaban esfuerzos e iban a dificultar el montaje y desmontaje del depósito de la instalación, se eliminaron.

Para una mejor sujeción del depósito en la estructura y dificultar la posibilidad de vuelco, se decidió soldar al depósito unas piezas en forma de “L”. Dos en cada lateral para engancharla a los perfiles verticales del centro y 5 para anclarlas a la base. Además, en la parte superior derecha, para evitar tener que poner un soporte para la bomba de vacío, se movió uno de los perfiles para poder sujetarla.

Una vez diseñado y fabricado el depósito y calculado el peso (ver apartado 3.3.4) y teniendo en cuenta que el peso del depósito más el del resto de elementos superaba el peso máximo soportado por las ruedas, se colocó una quinta rueda en el perfil central de 45x90 y un perfil en la parte izquierda para colocar la bomba centrífuga en posición vertical.

3.3 Dimensionado de la instalación

A la vez que se iba realizando el diseño previo de la instalación, se iban comprobando diversos cálculos para terminar de definir la presión de vacío necesaria, medidas, tiempos y volúmenes de cara a aproximar más exactamente dimensiones y tiempos de vaciado/llenado, peso del depósito, etc.

3.3.1 Estimación de la presión mínima necesaria en el depósito

Este es uno de los primeros cálculos que se hicieron para asegurar la viabilidad de la práctica. Se necesitaba asegurar que se podía conseguir la presión que hacía que la bomba entrara en cavitación teniendo en cuenta el resto de aspectos de la instalación y en las condiciones más desfavorables.

Para calcular la presión mínima del depósito se parte de la Ecuación 11 del apartado 2.4, la definición del $NPSH_d$:

$$NPSH_d = \frac{P_D - P_v}{\rho \cdot g} - \Delta z_{asp} - H_{p_{asp}}$$

Despejando la P_D se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_D = \rho \cdot g \cdot (NPSH_d + \Delta z_{asp} + H_{p_{asp}}) + P_v$$

ECUACIÓN 20

Donde $H_{p_{asp}}$ es la altura de pérdidas en la aspiración (Ecuación 19 del apartado 2.5).

El caso que presentará menor presión será cuando se produce cavitación con el menor caudal posible, puesto que el $NPSH_d = NPSH_r$ es el menor según la Figura 12 y las pérdidas que son función del caudal también serán menores:

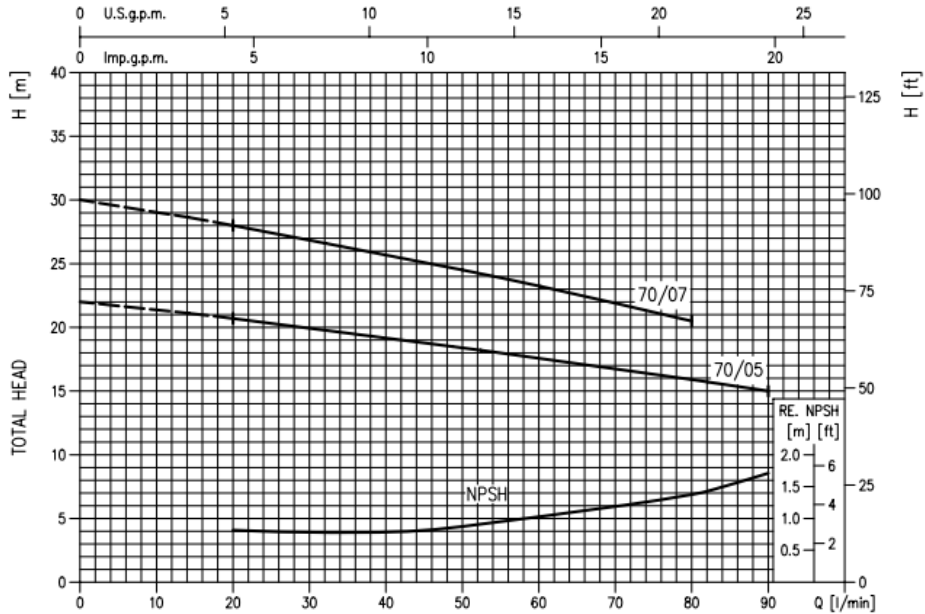


FIGURA 12. CURVAS DE ALTURA Y NPSH DE LA BOMBA EBARA CD 70/05 [32].

-El Δz_{asp} está definido por el diseño como se describe más adelante y es de -0'5 m, ya que la bomba está por debajo del nivel del depósito.

-La H_{p_asp} también viene dada por la instalación.

Para calcular las pérdidas hay que saber el factor de fricción (f) de la tubería de cobre. Se puede sacar del Diagrama de Moody entrando con la rugosidad relativa del cobre ($\varepsilon = 0'0015$, [33]), el diámetro interior del tubo ($D_i = 0'018$ mm) y el número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot \frac{Q}{A} \cdot D}{\mu} = 2'4 \cdot 10^4$$

ECUACIÓN 21

Donde μ es la viscosidad, Q es el caudal que pasa por la instalación, D es el diámetro interno de la tubería y ρ la densidad del fluido con el que se está trabajando.

Teniendo todos esos datos se entra en el diagrama de Moody para sacar el factor de fricción, que en este caso es de 0'026, como se puede ver en la Figura 13.

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

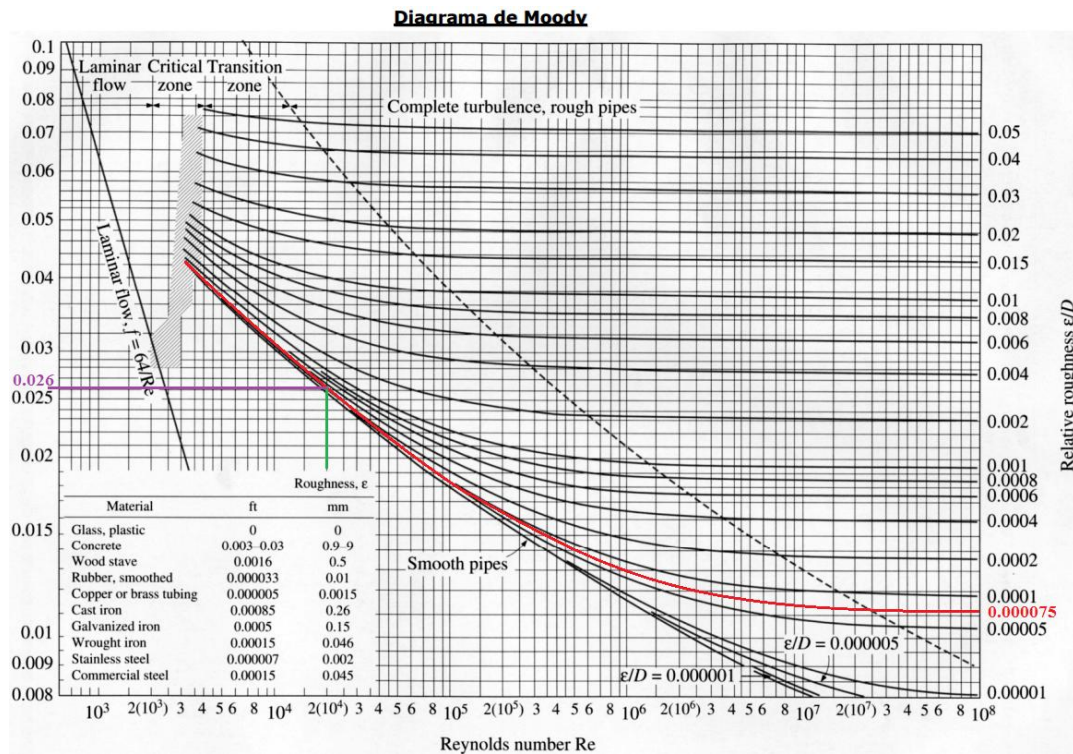


FIGURA 13. DIAGRAMA DE MOODY PARA EL CASO DE $Q=20\text{L}/\text{MIN}$ [33].

Falta saber la longitud de tubería de la aspiración, que es aproximadamente de 1 m y los coeficientes de pérdida de carga en la embocadura ($k_e=1$) y en los dos codos ($k_c=0.5$) [34]. Calculados todos los datos que hacían falta se sustituye en la Ecuación 19 del apartado 2.5 para sacar H_p y luego en la Ecuación 20 para obtener la presión mínima que se va a necesitar, resultando ser de -0.926 bares (en presión manométrica).

Esto podría ser un problema puesto que la bomba de vacío consigue una depresión máxima de -0.9 bares, por lo que se decidió calcular la presión mínima para cada caudal.

TABLA 1

Q l/min	NPSH _r (m)	H _{pasp} (m)	P _{dep} (Pa)	P _{dep_man} (bar)
20	0,8	0,302	8714	-0,926
30	0,8	0,646	12086	-0,892
40	0,8	1,128	16817	-0,845
50	0,9	1,733	23719	-0,776
60	1,0	2,451	31741	-0,696
70	1,2	3,307	42084	-0,592
80	1,4	4,280	53583	-0,477
90	1,7	5,368	67182	-0,341
98	2,0	6,306	79317	-0,220

Como se puede observar en la Tabla 1 solo habría dificultades en conseguir el vacío para que se produjera cavitación con el caudal de 20 l/min, mientras que para el resto la bomba de vacío conseguiría satisfactoriamente bajar la presión lo suficiente como para que se produjera cavitación.

Este cálculo teórico realizado del lado de la seguridad (asumiendo las condiciones más desfavorables) se demostró satisfactorio en la práctica, puesto que incluso realizando el experimento con el caudal de 20 l/min se conseguía que la bomba cavitara, aunque no tan claramente ni con la rapidez del resto de caudales.

3.3.2 Estimación del volumen del depósito



FIGURA 14. VOLUMEN DE CONTROL.

Como se pretende que la bomba trabaje alrededor de 3 horas cada vez que se realicen los experimentos, se tuvo en cuenta el posible calentamiento del agua, que influiría en la presión de vapor. Un aumento de temperatura haría que la presión de vapor aumentara y provocara que no se tuviera que hacer tanto vacío en el depósito para que la bomba empezara a cavitara. A pesar de ello, no interesa que ese valor aumente considerablemente para tener controlados los parámetros e intentar que sean casi constantes. Teniendo en cuenta que la potencia de la bomba es de 0'37 KW [32] y que no se desea que la temperatura del agua se eleve más de 3'5 grados kelvin, se usa la ecuación de conservación de la energía aplicada al volumen de control (Figura 14) formado por el agua

en el depósito [3]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \cdot \left(e + \frac{v^2}{2} + U \right) dV + \int_{SC} \rho \cdot \left(e + \frac{v^2}{2} + U \right) \cdot (\bar{v}_r \cdot \bar{n}) dS \\ = \int_{SC} \bar{v} \cdot (\bar{\zeta} \cdot \bar{n}) dS + \int_{VC} (Q_r + Q_q) dV - \int_{SC} \bar{q} \cdot \bar{n} dS \end{aligned}$$

ECUACIÓN 22

El primer término es la variación temporal de la energía total del fluido en el volumen de control por unidad de tiempo, en este caso solo se produce variación temporal de la energía interna. El segundo término es el flujo de energía total por unidad de tiempo a través de la superficie de control (ver Figura 14), en este caso se suponen condiciones uniformes a la entrada y a la salida y se anula el potencial de fuerzas másicas.

El tercero es el trabajo por unidad de tiempo realizado por las fuerzas de superficie, que en este caso es la potencia de la bomba. El cuarto es el flujo de calor por unidad de tiempo transmitido por conducción a través de la superficie de control, es decir, el calor que se conduce a través de las paredes al exterior. Se va a

despreciar porque es un término pequeño y únicamente se está realizando una aproximación. Además siempre va a ser favorable, ya que es un flujo que equilibra la temperatura del agua y la del ambiente, contrarrestando el calentamiento por efecto de la bomba.

El quinto término es la potencia calorífica intercambiada por radiación y reacción química que en este caso va a ser nulo porque no hay radiación ni se produce ninguna reacción química, quedando:

$$\frac{d}{dt} e \cdot \rho_w \cdot V + \rho_w \cdot \left(e_s + \frac{v_s^2}{2} \right) \cdot v_s \cdot A_s - \rho_w \cdot \left(e_e + \frac{v_e^2}{2} \right) \cdot v_e \cdot A_e = 370$$

ECUACIÓN 23

Se aproxima que la energía interna a la entrada y a la salida es la misma porque varía poco. Como a la entrada y a la salida el caudal y el área son los mismos, los términos de velocidad a la entrada y a la salida también se anulan. Sustituyendo $e = c_v \cdot T$:

$$\rho_w \cdot V \cdot c_v \int_0^{\Delta T} dT = \int_0^t 370 dt$$

ECUACIÓN 24

En el caso de estudio el incremento de temperatura máximo deseado será de 3'5K. La bomba va a estar funcionando durante 3 horas, que son 3 · 3600 segundos, así que si se despeja el volumen:

$$V = \frac{370W \cdot 10800 s}{3'5 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 4186 \text{ J/Kg} \cdot K} = 0'273 \text{ m}^3$$

ECUACIÓN 25

Teniendo en cuenta que había que reservar una pequeña cámara de aire (de 10 litros), se decidió hacer un depósito de 300 litros de capacidad.

3.3.3 Estimación del tiempo que tarda en sacar el aire

Otro de los pasos importantes era saber cuánto tiempo iba a tardar la bomba de vacío en llegar a la presión de vacío necesaria para que se produjera cavitación en la bomba. Aplicando la ecuación de conservación de la masa (Ecuación 26) al volumen de control formado por el aire en el depósito (Figura 15):

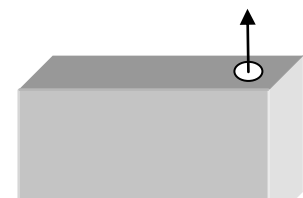


FIGURA 15. VOLUMEN DE CONTROL.

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho_a \cdot dV + \int_{SC} \rho_a \cdot (\bar{v}_r \cdot \bar{n}) \cdot dS = 0$$

ECUACIÓN 26

Asumiendo funcionamiento en circuito cerrado, el volumen de aire se mantiene y queda:

$$V \cdot \frac{d\rho}{dt} + \rho_a \cdot Q_a = 0$$

ECUACIÓN 27

Despejando:

$$\int_{\rho_0}^{\rho_{cav}} \frac{d\rho_a}{\rho_a} = -\frac{Q_a}{V} \int_0^t dt$$

ECUACIÓN 28

Quedando:

$$\ln \frac{\rho_{cav}}{\rho_0} = -\frac{Q_a}{V} \cdot t$$

ECUACIÓN 29

Siendo ρ_{cav} la densidad en el momento en el que se alcanza la presión de cavitación y ρ_0 la densidad inicial, es decir, la densidad a presión atmosférica. Se asume un volumen de aire de 10 litros y se sustituyen los valores para cada caso sabiendo que $\rho = P/R \cdot T$:

TABLA 2

Q_{\min} (l/min)	Presión cavitación (Pa)	ρ_0 (kg/m ³)	t (Q=20) (s)	<u>Datos</u>		
20	8714	0,1036	26,3	ρ_{inic}	V (m ³)	Q (m ³ /s)
Q_{\max} (l/min)	Presión cavitación (Pa)	ρ_0 (kg/m ³)	t (Q=90) (s)	1,205	0,01	0,001333
90	79317	0,9432	2,6			

El tiempo máximo no es excesivo para la realización del experimento como se puede observar en la Tabla 2 y el tiempo mínimo es corto pero es suficiente para apreciar adecuadamente el inicio de la cavitación. Al realizar el experimento se comprobó que el tiempo máximo real era un poco superior, con lo cual la situación era favorable.

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

3.3.4 Estimación de las dimensiones y peso del depósito (sin agua)

Una vez que se sabe el volumen del depósito, las dimensiones y estructura y la presión de vacío que tiene que soportar, se contactó con la empresa Estructuras Metálicas Metasol para que lo realizaran con el espesor de pared mínimo posible. Los cálculos para que el depósito resistiera dieron como espesor mínimo 6 milímetros, superior a lo esperado. Se necesitaba calcular el peso del depósito para comprobar si la estructura diseñada iba a soportar el peso del depósito más los 300 litros de agua.

Usando los planos, se calculó que el depósito vacío tendría un peso total de 187 kg, siendo el peso total del depósito lleno de 487 kg. Se habían diseñado 4 ruedas para la estructura, una en cada esquina, pero según el catálogo [35], las ruedas soportaban 120 kg cada una, por lo que se decidió añadir una rueda extra en el centro de la plataforma para evitar posibles colapsos (Figura 16).



FIGURA 16. PROCESO DE COLOCACIÓN DE LA QUINTA RUEDA EN LA BASE DEL DEPÓSITO.

3.4 Construcción de la instalación

Una vez que se tenía un diseño satisfactorio, se instaló el resto de componentes. Pero esta primera versión no fue la definitiva, puesto que surgieron problemas, mejoras y cambios que se irán explicando en las diferentes configuraciones llevadas a cabo hasta la definitiva.

Configuración 1. La bomba estaba anclada en la parte interior lateral derecha, con la aspiración en la parte inferior y la impulsión hacia la izquierda. En la parte horizontal del circuito están colocados el presostato y la válvula, las tuberías de eran de cobre de $\frac{3}{4}$ de pulgada, cortadas con cortatubos y unidas mediante soldadura blanda estaño-plomo y machos roscados, tuercas locas y uniones de tres piezas para que se pudiera desmontar fácilmente el circuito entero. La bomba de vacío estaba situada en la parte superior trasera izquierda. También había un grifo de nivel en la parte frontal superior para comprobar cuando el nivel del agua era el deseado (Figura 17).

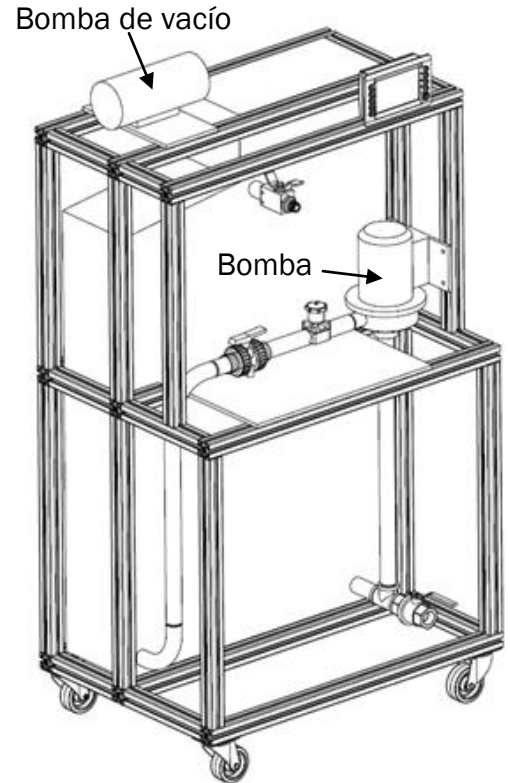


FIGURA 17. CONFIGURACIÓN 1.

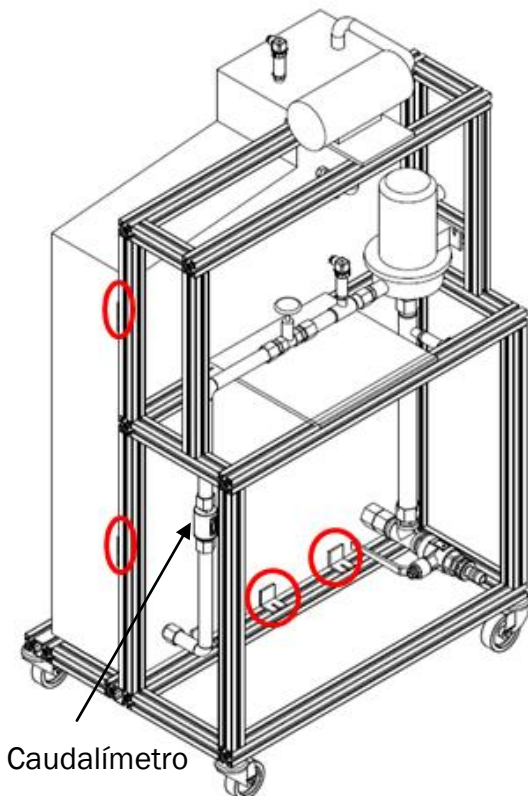


FIGURA 18. CONFIGURACIÓN 2.

Configuración 2.

De la estructura se eliminan los perfiles traseros para tener un acceso más sencillo al depósito, por lo que la bomba de vacío se cambia a la parte derecha. Y los perfiles de la parte inferior ya se han cambiado por unos de 90x45 para aumentar la superficie de apoyo del depósito. Además, se incorporan las L soldadas al depósito (en rojo en la Figura 18) para amarrar el depósito a la estructura. También está añadido el caudalímetro (finalmente elegido de tipo electromagnético) en la tubería descendente de la parte izquierda, ya que antes y después del mismo debía haber un tramo recto sin perturbaciones físicas para una correcta medición.

Configuración 3. En el manual técnico del caudalímetro se indica que no debe situarse en tuberías verticales, por lo que se mueve al final de la tubería horizontal asegurando el tramo recto a ambos lados para que las líneas de corriente sean lo más estables posible y la medida sea más exacta (Figura 19). También para sujetar la bomba de vacío se mueve el perfil superior derecho para anclarla y que la salida del depósito y la toma de la bomba queden alineadas. Ese cambio no afecta mecánicamente a la estructura porque solo se desplaza ese perfil pero sigue transmitiendo los mismos esfuerzos.

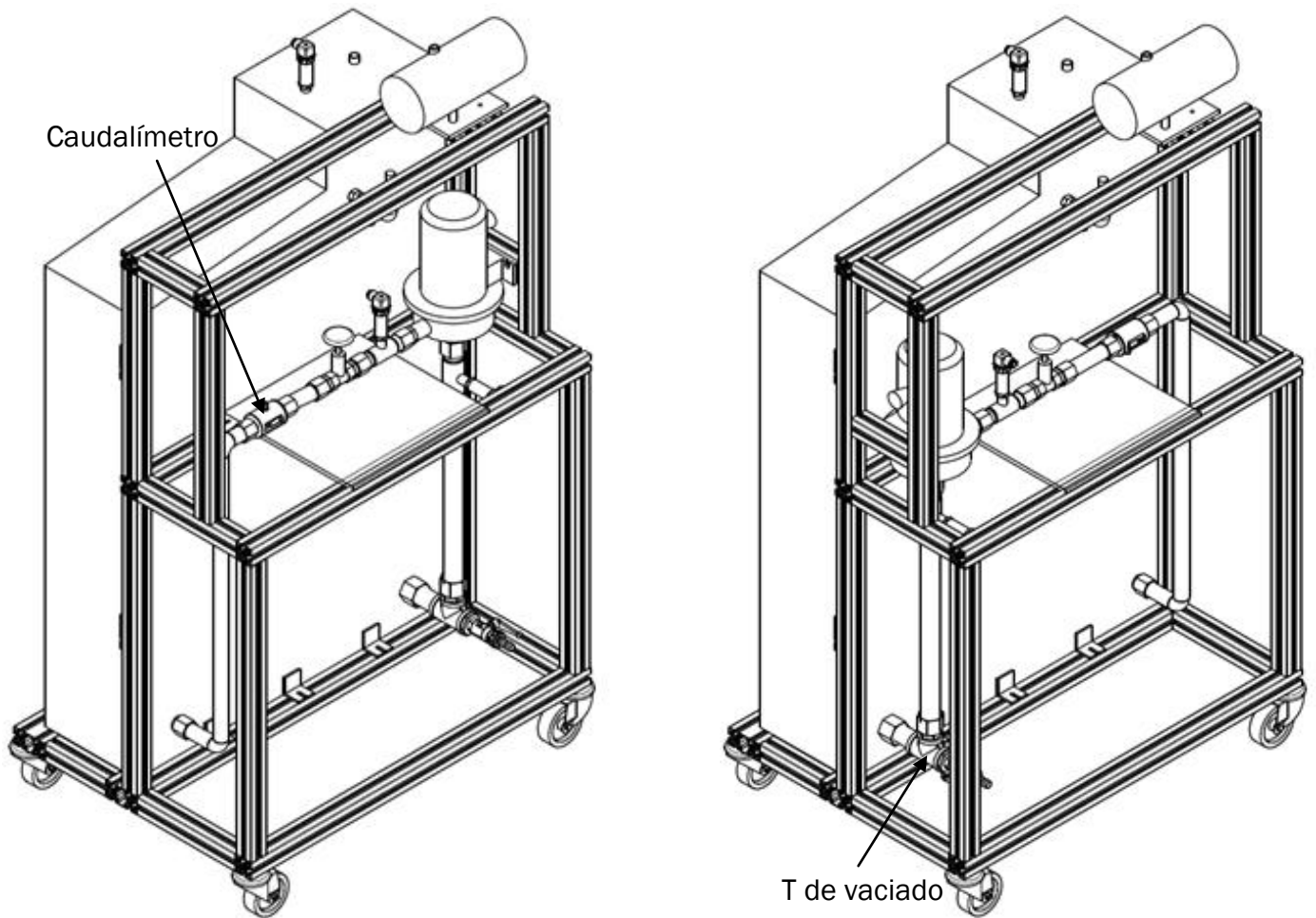


FIGURA 19. CONFIGURACIÓN 3 Y 4.

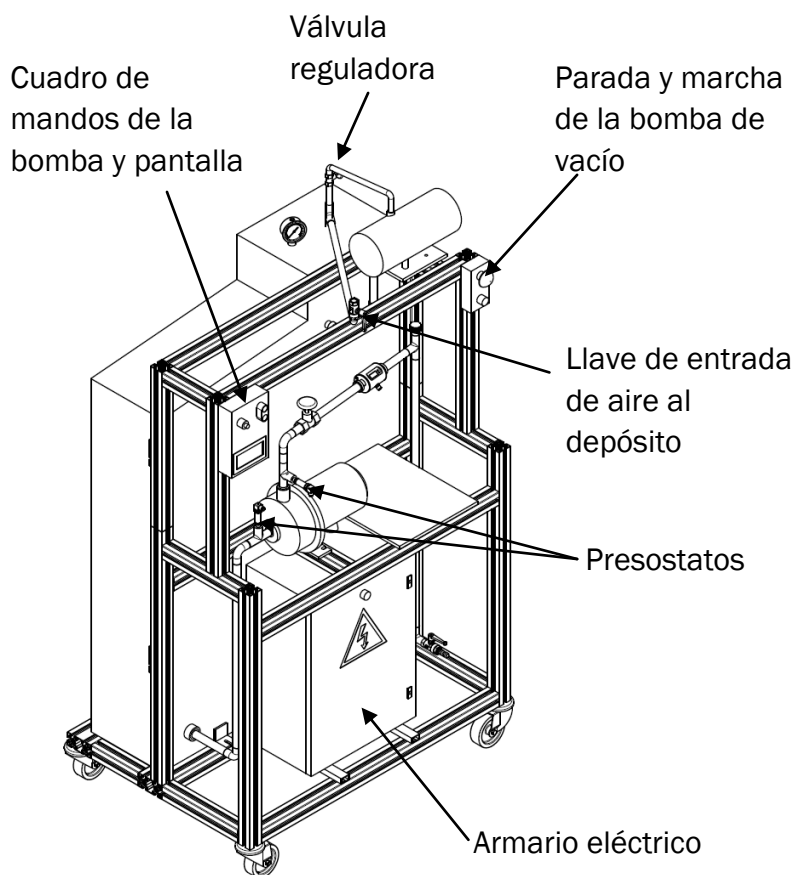
Configuración 4. Se decide que en la pantalla del caudalímetro se va a mostrar la temperatura, pero en el sentido instalado se leería al revés, por lo que se opta por dar la vuelta al circuito, con la bomba cambiada de lado (Figura 19). Hay que cambiar el perfil soporte de lado y girar las piezas inferiores que conectan al depósito, de forma que el circuito vuelve a estar en la misma posición que antes, pero girado 180°. Posteriormente también se consideraría que la T de vaciado, la que tiene la espiga y la válvula para conectar una manguera y vaciar o llenar el depósito, se colocaría en la tubería de entrada al depósito para no aumentar las pérdidas en la aspiración.

Configuración 5.

Con la configuración 4 surgieron varios problemas, probándose varias modificaciones hasta llegar a la definitiva. En esta configuración la bomba está en posición horizontal, perpendicular a la tubería saliente del depósito y encima de la mesa auxiliar. Los dos perfiles que soportaban la mesa se bajaron 200 mm para que la parte de la impulsión del circuito no quedara por encima del nivel del agua del depósito y no hubiera problemas de cebado del circuito (Figura 20), y también se quitó la T de vaciado de la aspiración y se llevó a la entrada de agua al depósito.

La parte negativa de esta configuración tiene que ver con lo que ya se ha visto en el apartado 2.5. El objetivo es que se produzca fácilmente cavitación para su estudio y con los cambios realizados (aumento de las pérdidas por aumentar la longitud de la aspiración y los dos codos introducidos y haber bajado la bomba) se consigue el efecto contrario. Esto va a exigir a la bomba de vacío tener que conseguir un vacío mayor, pero no es problema porque si se hacen los cálculos se ve que esa diferencia es muy pequeña y en la práctica no va a suponer ningún hándicap o impedimento para la correcta realización del experimento.

En este punto también se añadió una válvula reguladora de caudal en la tubería que llega a la bomba de vacío para poder variar la velocidad de vaciado del depósito, además de una T con una tubería que acerca a la parte frontal de la



instalación la llave de entrada de aire al depósito. También se cambiaron las T de los presostatos por unas abrazaderas de cobre con toma para que la medida fuera más exacta al ser el orificio de menor diámetro y tener menos turbulencias. Colocando el armario eléctrico y los cuadros de mandos de la bomba y de la bomba de vacío se dio por concluida la construcción de la instalación. Todos los planos pueden consultarse en el Anexo I.

FIGURA 20. CONFIGURACIÓN 5.

3.5 Memoria descriptiva de los componentes

En la Tabla 3 se listan los componentes usados en la construcción de la instalación, indicando marca y modelo si se considera necesario y número de ítems usados o longitud de los mismos en caso de tubos y tuberías.

TABLA 3

N.	Nombre	Uds/m
1	Depósito acero inoxidable 304 e=6 mm	1
2	Bastidor fabricado en perfil aluminio con ruedas	1
3	Bomba hidráulica centrífuga Ebara CDX/A 70/05	1
4	Bomba de alto vacío Wigam DIP-401	1
5	Caudalímetro electromagnético IFM SM8000	1
6	Presostato GEMS 3100 Series	2
7	Cuadro de mandos con pantalla táctil, mando micrométrico y parada y marcha de la bomba.	1
8	Mando con parada y marcha de la bomba de vacío	1
9	Vacuómetro analógico WIKA -1 a 0 bar	1
10	Válvula de esfera 1"	3
11	Válvula de estrangulación	2
12	Abrazadera de latón con toma	2
13	Válvula de aguja Genebre 1"	1
14	Armario eléctrico con variador de velocidad, diferencial, magnetotérmico y parada de emergencia	1
15	Tabla polietileno 700x300x10	1
16	Codo para soldar 90° de 1"	3
17	T de cobre para soldar de 1"	2
18	Toma con salida a espiga	1
19	Codo roscado macho-hembra	1
20	Racor de tres piezas	4
21	Racor soldar-roscado	3
22	Purgador	1
23	Tubería de cobre de 1"	3 m
24	Tubo flexible de plástico	0'5 m

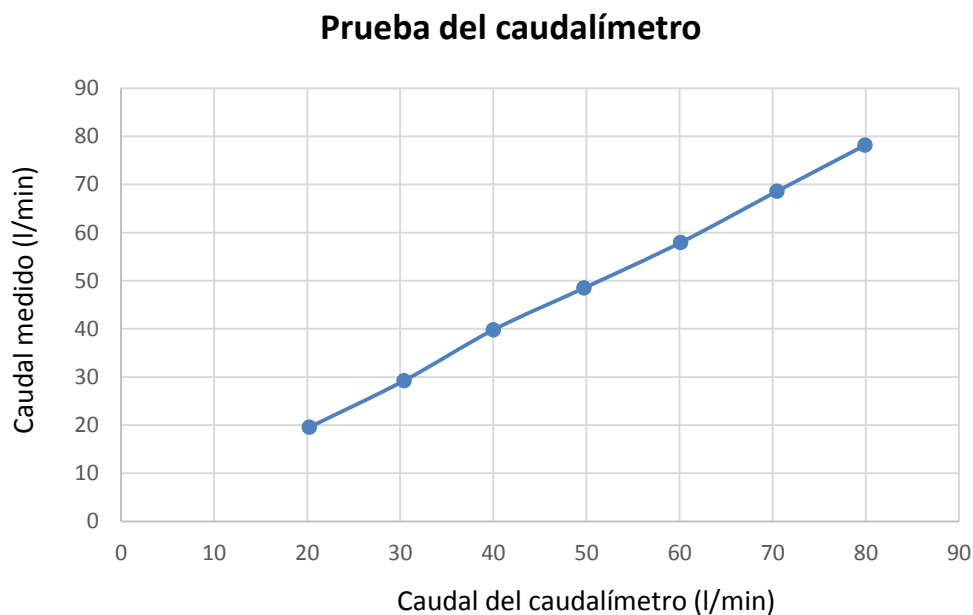
3.6 Comprobación de los elementos de medida

En este punto se detallan las comprobaciones de las medidas realizadas por los diferentes elementos utilizados y las posibles correcciones que habría que realizar para obtener los cálculos correctos después de que el software del programa analice los datos.

3.6.1 Caudalímetro y su display

El caudalímetro utilizado es uno de tipo electromagnético de IFM modelo SM8000, cuya guía técnica se puede consultar en el Anexo V. Para la comprobación se conectó el caudalímetro con una válvula reguladora a una manguera y posteriormente se vertía el agua a un depósito calibrado. Midiendo el tiempo que tardaba en llenarse cierto volumen de agua se obtenía el caudal medio y se podía comparar con el mostrado por el caudalímetro. Los cálculos y datos se pueden ver en el Anexo II, pero representando ambos caudales en una gráfica queda:

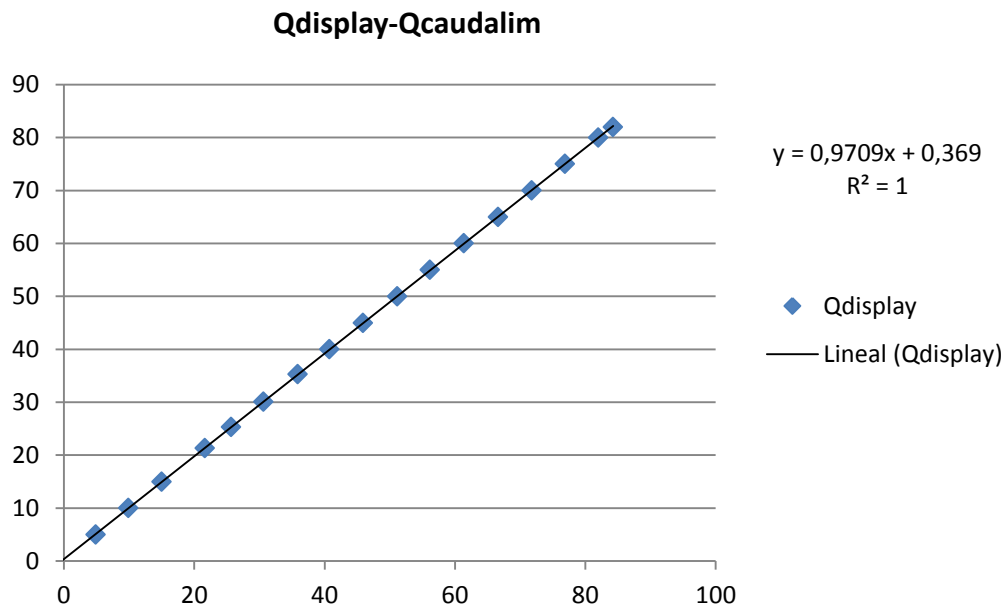
GRÁFICA 1



Por otra parte, la señal del caudalímetro se lleva a la pantalla del cuadro de mandos mediante un software que tenía que convertir la señal. En esa conversión se perdía información por las diferentes escalas, así que se realizó una comparación entre la señal que salía en la pantalla y la que mostraba el caudalímetro.

Los datos también están en el Anexo II y la Gráfica 2:

GRÁFICA 2



La ecuación obtenida del ajuste de las medidas se metió en el programa para que se mostrara en la pantalla del cuadro de mandos la medida real.

3.6.2 Presostatos

En este caso más que una comprobación se realizó una calibración propiamente dicha, usando para ello una pequeña instalación experimental consistente en dos volúmenes con un vaso comunicante entre ellos (Figura 21). En uno de los lados se conecta el presostato a calibrar y en el otro volumen se introduce un pistón reglado y calibrado sobre el que se van añadiendo pesos también calibrados. Con lo cual se sabe la presión que debería marcar el presostato.

De ahí se obtiene una curva de calibración mediante el método de mínimos cuadrados que se introduce en el programa para corregir el posible error del presostato o el error al convertir la señal de un tipo de señal a otra. Los datos obtenidos durante el procedimiento se pueden consultar en el Anexo II. Se realizó para los dos presostatos, resultando las siguientes curvas:

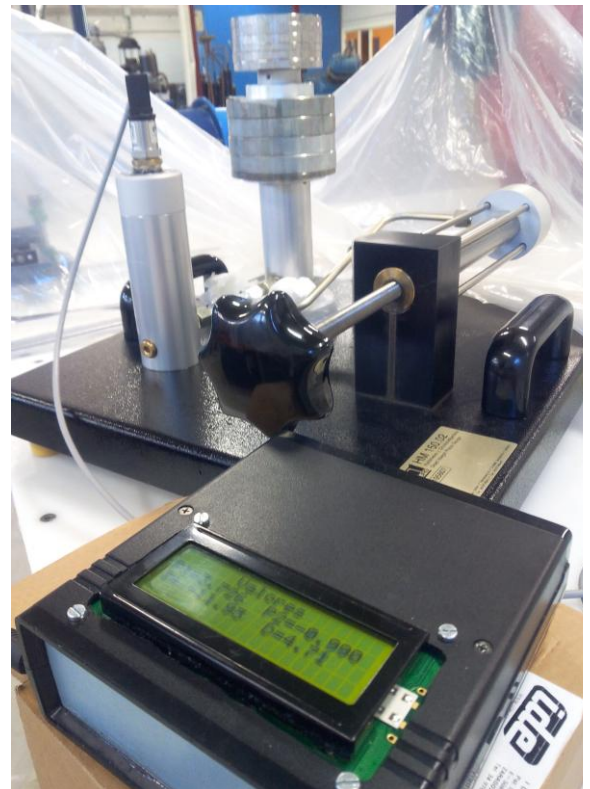
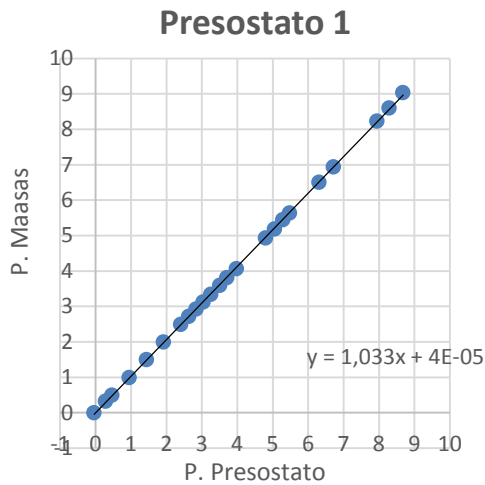
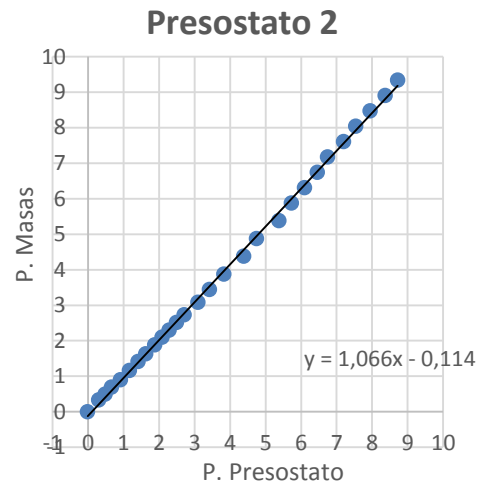


FIGURA 21. CALIBRACIÓN DE LOS PRESOSTATOS.

GRÁFICA 3



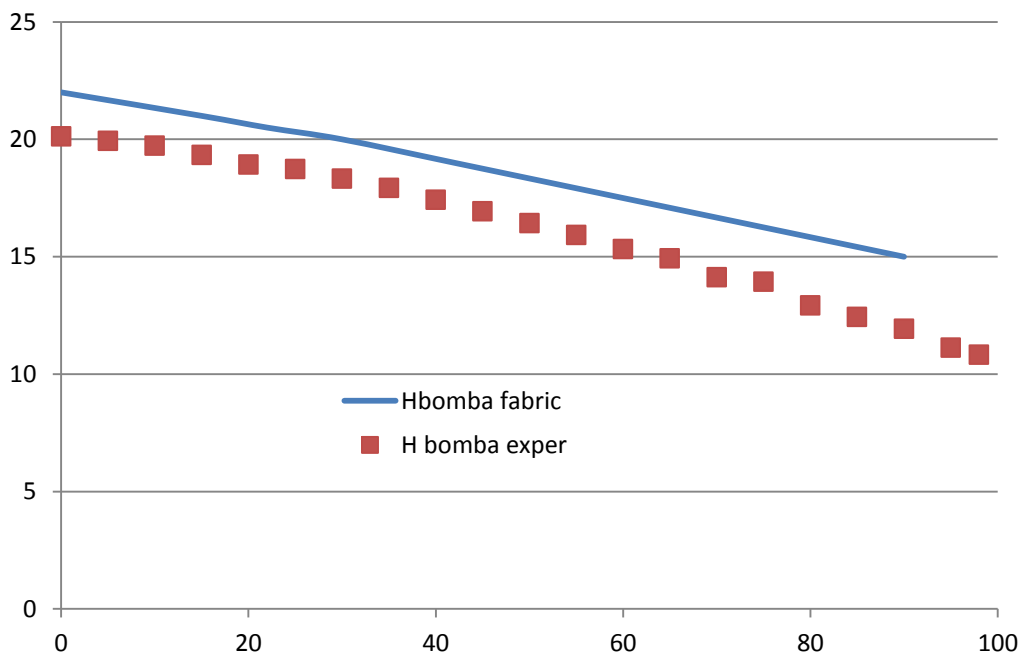
GRÁFICA 4



3.6.3 Bomba centrífuga (curva H-Q)

Una vez que se consiguió el correcto funcionamiento de la bomba en su nueva posición, se procedió a obtener la curva experimental de altura manométrica y caudal para compararla con la del fabricante. Se necesitaba el caudal (mostrado por el caudalímetro) y la altura manométrica, obtenida mediante las presiones a la entrada y salida de la bomba y la diferencia de cotas entre la entrada y la salida. Los datos de las tablas se pueden consultar en el Anexo II y se muestra la Gráfica 5, en el que se representa las curvas de los datos obtenidos experimentalmente y los proporcionados por el fabricante:

GRÁFICA 5



Se observa que la curva experimental está ligeramente por debajo de la del fabricante. Para calcular la altura manométrica se tomaron las presiones de los

presostatos asumiendo que eran las presiones a la entrada y salida de la bomba. Realmente no es así, ya que los presostatos están colocados a una distancia de la entrada y salida de la bomba y provoca que se obtenga un valor menor de la H_m . Pero al hacer los cálculos se demostró que la H_m sale del orden de 0'00008 metros menor, lo cual es despreciable.

3.6.4 Calibración velocidad de giro de la bomba

Al igual que el caudalímetro y los presostatos, la velocidad de giro de la bomba, medida dentro del variador en el armario eléctrico, debía llevarse al software del visor del cuadro de mandos para poder seleccionar la velocidad de giro en la que se quiera trabajar. En esa conversión también se producen errores de conversión de escala. Para solucionarlo se compararon entre 0 y 3600 rpm las medidas reales que mostraba el variador con la medida convertida por el software en la pantalla. Se comprobó que se producía en todas las medidas una desviación de 40 rpm y haciendo pequeños cambios en el ancho de escala del software se consiguió cuadrarlo sin necesidad de introducir una ecuación.

Capítulo 4. Puesta a punto y ensayos de laboratorio

laboratorio

Una vez que la instalación ha sido construida y se ha comprobado que todos los elementos funcionan correctamente, se procede a calcular los parámetros exactos para la correcta realización del experimento y la puesta a punto de las variables de la instalación.

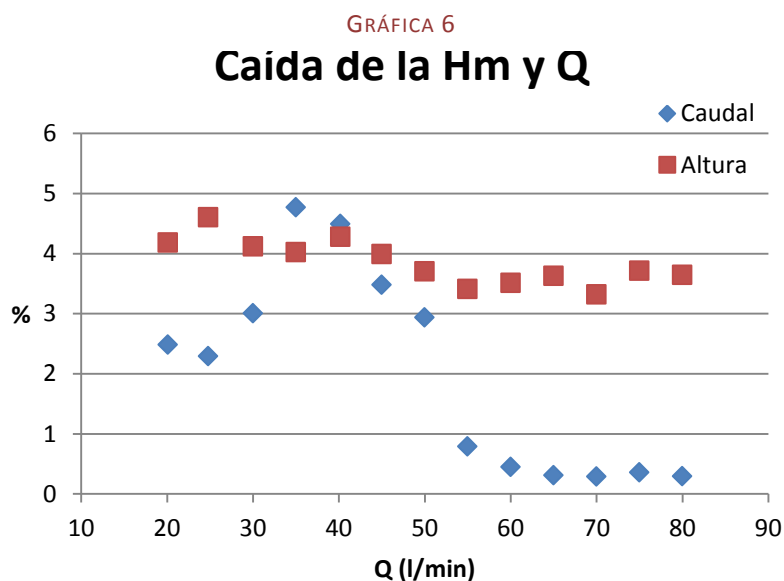
4.1 Detección de la cavitación

En la bibliografía consultada [6, 9 y 10], se indica de manera mayoritaria que industrialmente se considera como convenio que existe cavitación cuando se produce una caída del 3% en la altura manométrica de la bomba, aunque hay algún estudio que también habla del caudal [11]. Para comprobar las diferencias se realiza un experimento que consiste en hacer funcionar la bomba a su velocidad nominal (2670 rpm) con un determinado caudal y altura manométrica, apuntando dichos valores. Se pone en marcha la bomba de vacío hasta que se oye en la bomba el crepitar de la cavitación, momento en el que se para el experimento y el programa informático muestra en la pantalla el caudal y altura manométrica en ese instante. Comparándolas con la H_m y el Q iniciales, se puede saber qué porcentaje ha caído cada una al inicio de la cavitación.

Uno de los problemas del experimento es que para caudales pequeños la presión del depósito para que se produzca cavitación es muy próxima al vacío absoluto, lo que hace que la bomba de vacío trabaje a niveles muy exigentes que se traducen en una velocidad de vaciado cada vez menor según vacía y provoca que el momento en el que se produce la cavitación no sea muy nítido.

Por otra parte, el momento en el que empieza la crepitación (el sonido producido al colapsar las burbujas de vapor de agua formadas en la aspiración) es subjetivo dependiendo de lo fino que perciba el sonido el experimentador.

En la Gráfica 6 se observan los resultados del experimento. En el eje Y se muestra el porcentaje de disminución que se produce en la H_m y el Q al percibir la



cavitación y en el eje X se muestran los caudales a los que se ha realizado el experimento. Se observa que la caída de altura manométrica se mantiene constante en torno al 4%, aunque con una ligera tendencia descendente según aumenta el caudal. Esto se explica por la forma de la gráfica H-Q. En caudales pequeños la curva de la instalación es muy vertical y por tanto pequeñas variaciones en el eje x provocan diferencias más importantes en la altura, mientras que para caudales grandes la curva de la instalación es más horizontal y varía menos. De todas formas esa variación es muy pequeña porque en sí la curva de la bomba es bastante horizontal. El valor medio de la caída de Hm para el conjunto de caudales es del 3'7%, habiendo repetido el experimento 3 veces para cada caudal.

En la curva de porcentaje de caída del caudal se observa que el caudal no va a ser un valor tan representativo como la altura para detectar la cavitación, ya que no responde tan constante como la H_m. De hecho, para valores muy altos de caudal la caída se muestra despreciable, mientras que para valores menores es mayor, con un pico de aproximadamente un 5% en el entorno del caudal 40 l/min.

4.2 Cálculo del NPSH_r de la bomba

Como se sabe que en el instante de cavitación incipiente se igualan el NPSH_r y el NPSH_d, se utiliza el NPSH_d para determinar el NPSH_r, puesto que el disponible es fácilmente calculable con los datos de que se dispone (Ecuación 11 del apartado 2.4):

$$NPSH_d = \frac{P_D - P_v}{\rho \cdot g} - \Delta z_{asp} - H_{p_{asp}}$$

Los valores que se van a medir, según los sensores que se han instalado son: presión a la entrada de la bomba, presión a la salida de la bomba, temperatura del agua en el caudalímetro, caudal y presión de la superficie del agua en el depósito.

Para conocer el término H_p, se aplica la ecuación de conservación de la energía mecánica (Ecuación 30) entre la superficie libre del líquido que se aspira (D) y la entrada de la bomba (A), considerando que las únicas fuerzas másicas son las gravitatorias:

$$\left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right)_A - \left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right)_D = -g \cdot H_{p_{asp}}$$

ECUACIÓN 30

Al ser circuito cerrado la velocidad del agua en la superficie del depósito es nula. Despejando H_{p_{asp}} se obtiene:

$$H_{p_{asp}} = \frac{P_D - P_A}{\rho \cdot g} - \frac{v_A^2}{2 \cdot g} + (z_D - z_A) = \frac{P_D - P_A}{\rho \cdot g} - \frac{v_A^2}{2 \cdot g} - \Delta z_{asp}$$

ECUACIÓN 31

Sustituyendo en el NPSH_d:

$$NPSH_d = \frac{P_D - P_v}{\rho \cdot g} - \Delta z_{asp} - \frac{P_D - P_A}{\rho \cdot g} + \frac{v_e^2}{2 \cdot g} + \Delta z_{asp} = \frac{P_A - P_v}{\rho \cdot g} + \frac{v_e^2}{2 \cdot g}$$

ECUACIÓN 32

Como $v=Q/A$ y $A_A=\pi \cdot D^2/4$, finalmente quedaría:

$$NPSH_d = \frac{P_A - P_v}{\rho \cdot g} + \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4}$$

ECUACIÓN 33

Con la temperatura se obtiene la presión de vapor (P_v) según tabla del Anexo III, la presión a la entrada de la bomba (P_A) es el otro de los datos recogidos, el diámetro de tubería es un dato y el caudal lo mide el caudalímetro. La toma de estos datos se realizó de varias maneras diferentes para observar la incidencia de algunas variables sobre la curva obtenida, aunque en todos ellos se realizó 10 veces el experimento de cada caudal para dar una muestra de repetibilidad.

Se ha tenido en cuenta que la presión a la entrada de la bomba no es exactamente el valor que mide el presostato, puesto que está colocado a cierta distancia de la entrada de la bomba. Realizando los cálculos para comprobar la diferencia entre esas presiones se obtuvo una diferencia de 0'03 pascales, que sobre medidas del entorno de 20000 bares, es totalmente despreciable.

4.2.1 Cálculo del NPSH escuchando la cavitación

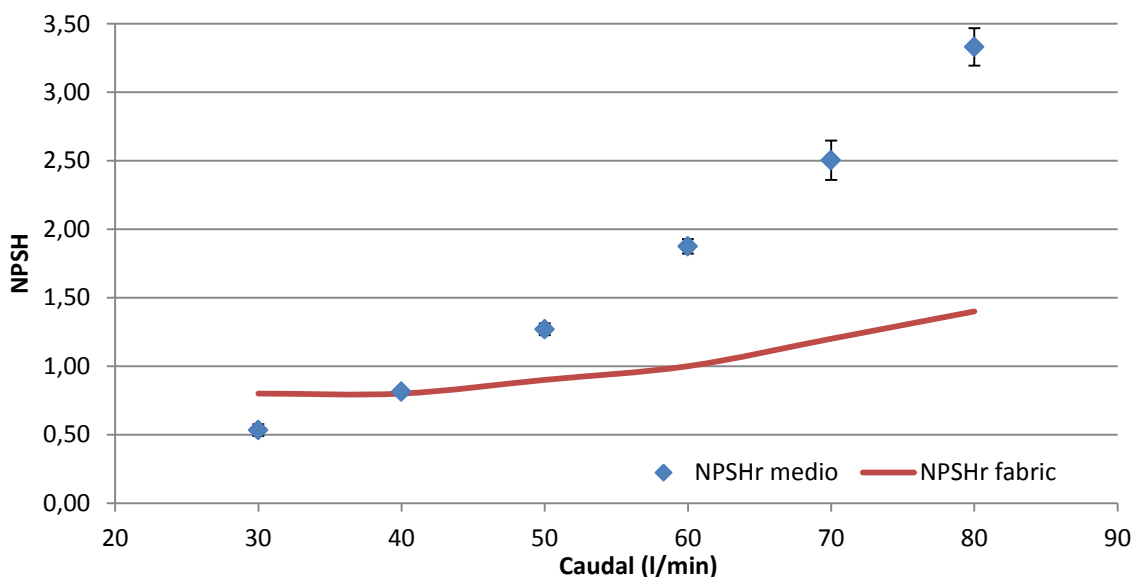
En este experimento se tomaron los datos cuando se oía la crepitación característica de la cavitación en la bomba. Es un experimento subjetivo porque depende de la habilidad de ser capaz de escuchar la crepitación. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 4:

TABLA 4

Q (m3/s)	Presiones de entrada					Temperatura	NPSHr					NPSH _r medio
30	-0,88	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	18,6	0,61	0,51	0,51	0,51	0,51	0,53
Q (m3/s)	-0,88	-0,89	-0,89	-0,89	-0,89	Pvapor (Pa)	0,61	0,51	0,51	0,51	0,51	NPSH _r fabric
0,0005						2144						0,80
Q (l/min)	Presiones de entrada					Temperatura	NPSHr					NPSH _r medio
40	-0,87	-0,87	-0,87	-0,87	-0,87	18,8	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Q (m3/s)	-0,87	-0,87	-0,87	-0,87	-0,87	Pvapor (Pa)	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	NPSH _r fabric
0,00066667						2171						0,80
Q (l/min)	Presiones de entrada					Temperatura	NPSHr					NPSH _r medio
50	-0,84	-0,83	-0,84	-0,84	-0,84	18,8	1,25	1,35	1,25	1,25	1,25	1,27
Q (m3/s)	-0,84	-0,83	-0,84	-0,84	-0,84	Pvapor (Pa)	1,25	1,35	1,25	1,25	1,25	NPSH _r fabric
0,00083333						2171						0,90
Q (l/min)	Presiones de entrada					Temperatura	NPSHr					NPSH _r medio
60	-0,8	-0,8	-0,79	-0,79	-0,79	19	1,81	1,81	1,92	1,92	1,92	1,87
Q (m3/s)	-0,8	-0,8	-0,79	-0,79	-0,79	Pvapor (Pa)	1,81	1,81	1,92	1,92	1,92	NPSH _r fabric
0,001						2198						1,00
Q (l/min)	Presiones de entrada					Temperatura	NPSHr					NPSH _r medio
70	-0,76	-0,74	-0,74	-0,76	-0,77	19,4	2,40	2,61	2,61	2,40	2,30	2,50
Q (m3/s)	-0,74	-0,75	-0,73	-0,77	-0,74	Pvapor (Pa)	2,61	2,50	2,71	2,30	2,61	NPSH _r fabric
0,00116667						2254						1,20
Q (l/min)	Presiones de entrada					Temperatura	NPSHr					NPSH _r medio
80	-0,67	-0,7	-0,67	-0,69	-0,71	19,4	3,536	3,23	3,536	3,332	3,128	3,33
Q (m3/s)	-0,68	-0,7	-0,7	-0,69	-0,69	Pvapor (Pa)	3,434	3,23	3,23	3,332	3,332	NPSH _r fabric
0,00133333						2254						1,40

Se realizaron 10 medidas para cada caudal para dar una muestra de repetibilidad. En la Gráfica 7 se representan la media de los valores obtenidos junto con la curva del fabricante en rojo. Además el NPSH_r calculado se acompaña de la desviación típica de cada grupo de medidas. Se puede observar que la desviación típica crece con el caudal. Esto es debido a la mayor dificultad de identificar el sonido de la cavitación por la rapidez con la que se alcanza la presión crítica en el depósito.

GRÁFICA 7



Como se verá en el apartado siguiente, la ventaja de poder detectar la cavitación exactamente en cada caudal se pierde en la objetividad del experimento, por lo que la curva se desplaza demasiado hacia arriba en los caudales grandes. Eso puede ser porque el vacío necesario para que la bomba cavite en esos caudales es pequeño y se consigue muy rápido, por lo que aporta inestabilidad al resultado.

4.2.2 Cálculo del NPSH con toma de datos automática

Para tratar de eliminar la subjetividad causada por el experimentador en la detección de la cavitación se realizó el experimento de forma automática. Para ello se empleó un programa informático que detectaba la caída de la altura manométrica. Cuando esa caída era suficiente tomaba todos los datos y con ellos se realizaban los cálculos. Los experimentos realizados en el apartado 4.1 y 4.2 daban una caída de altura manométrica media del 3'7%, pero se probaron caídas del 3, 4 y 5% para ver en qué porcentaje se conseguía la curva más fiel a la del fabricante con los siguientes resultados:

TABLA 5

3%					
Q (l/min)	Tª (°C)	Pv (Pa)	P _e media (bar)	NPSH _r medio (m)	NPSH _r fab (m)
30	19,8	2311	-0,87	0,7	0,8
40	20	2339	-0,862	0,88	0,8
50	20	2339	-0,822	1,42	0,9
60	20,2	2369	-0,801	1,79	1
70	20,2	2369	-0,749	2,5	1,2
80	20,4	2398	-0,701	3,2	1,4

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

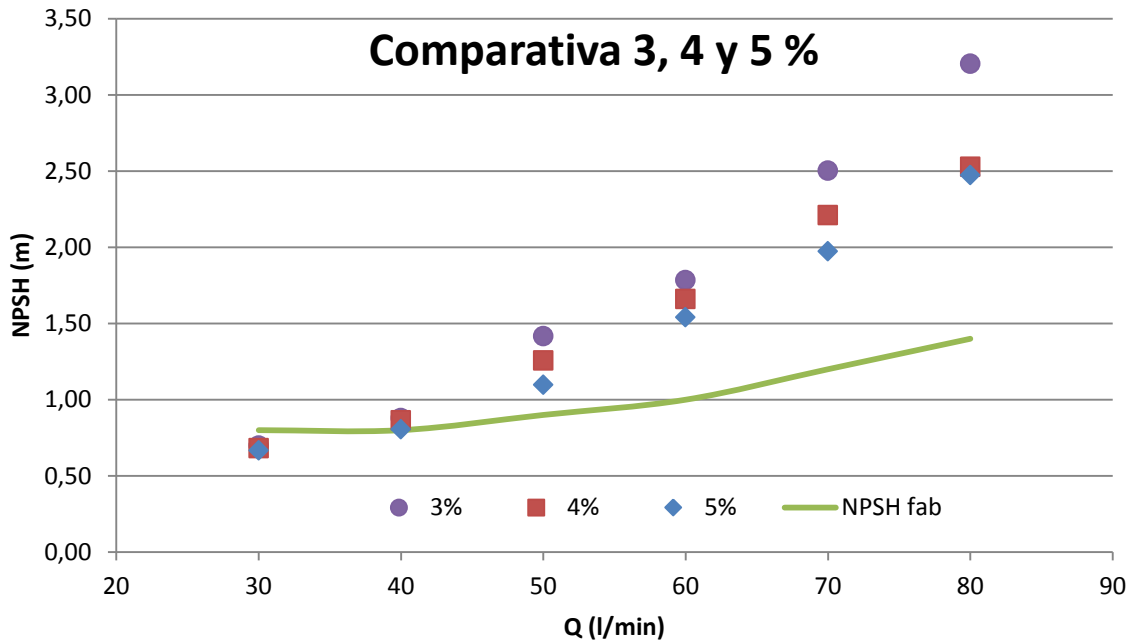
4%					
Q (l/min)	Tª (°C)	Pv (Pa)	P _{e media} (bar)	NPSH _{r medio} (m)	NPSH _{r fab} (m)
30	21	2487	-0,87	0,68	0,8
40	21	2487	-0,862	0,86	0,8
50	21	2487	-0,836	1,26	0,9
60	21	2487	-0,812	1,66	1
70	21,2	2519	-0,776	2,21	1,2
80	21,2	2519	-0,766	2,53	1,4

5%					
Q (l/min)	Tª (°C)	Pv (Pa)	P _{e media} (bar)	NPSH _{r medio} (m)	NPSH _{r fab} (m)
30	20,6	2428	-0,872	0,67	0,8
40	20,8	2457	-0,868	0,81	0,8
50	20,8	2457	-0,852	1,1	0,9
60	20,8	2457	-0,824	1,54	1
70	20,8	2457	-0,8	1,97	1,2
80	20,8	2457	-0,772	2,47	1,4

Considerando cavitación con el 3%, los resultados no fueron muy satisfactorios, ya que la instalación se comportaba de manera inestable en algunos caudales, sobre todo en los caudales grandes. Con el porcentaje del 4 % y 5 % la instalación no daba ningún problema de estabilidad ni repetibilidad. En la Gráfica 8 se pueden ver los resultados de los experimentos representados conjuntamente.

No se probaron porcentajes mayores puesto que con el 5% ya se empezaba a percibir acústicamente la cavitación antes de que el programa informático tomara los datos. Para acercarse más a la curva proporcionada por el fabricante, especialmente en caudales mayores, habrá que considerar mayor porcentaje de caída de H_m. Esto indica que la curva suministrada por el fabricante se ha realizado con una cavitación ya desarrollada. De entre el 4 o 5%, se ha considerado que al 4% el inicio del ruido de cavitación coincide más exactamente con el aviso sonoro del programa. Además, según los experimentos realizados en el punto 4.1 y 4.2, se llega a la conclusión de que la cavitación comienza en el entorno de una caída de la altura manométrica del 4%.

GRÁFICA 8



4.2.3 Influencia de la velocidad de giro del rodete en el NPSH_r

En este apartado se ha variado la velocidad de giro para estudiar su influencia.

4.2.3.1 Cálculo teórico del NPSH_r aplicando semejanza dimensional

Variar la velocidad de giro de la bomba es algo bastante común cuando se quiere variar el punto de funcionamiento de la instalación. Variar el régimen de giro del rodete permite regular el caudal en ambos sentidos, por encima y por debajo del caudal inicial. En este caso se va a evaluar el NPSH_r a una velocidad superior (3000 rpm) y en otro inferior (2500 rpm) a la velocidad de giro nominal, que como ya se ha comentado en el apartado 4.1, es de 2670 rpm.

Utilizando los parámetros adimensionales de coeficiente de caudal ($Q/\omega D^3$) y coeficiente de presión ($g \cdot \text{NPSH}_r / \omega^2 D^2$), que se obtienen de aplicar el teorema Pi de Buckingham a las magnitudes más significativas del funcionamiento de una máquina hidráulica [3], se obtienen las siguientes relaciones:

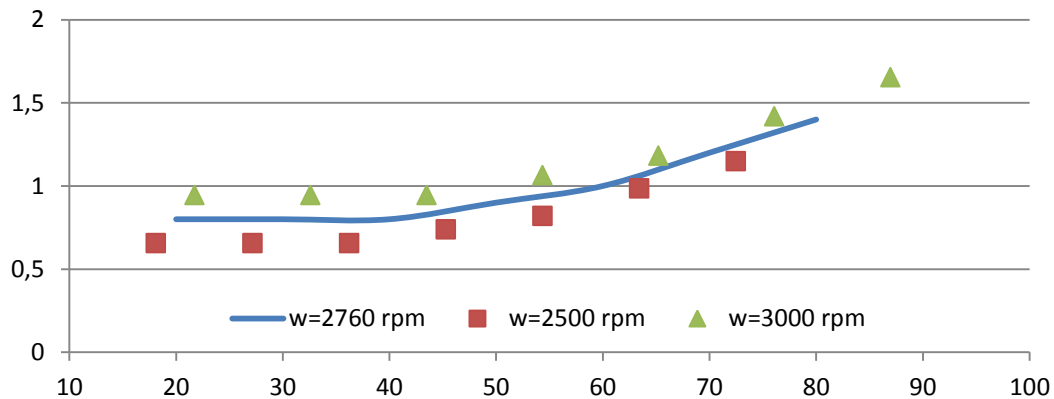
$$\frac{\text{NPSH}_{r1}}{\text{NPSH}_{r2}} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \quad y \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

ECUACIÓN 34

Usando los datos ya mencionados de velocidad de giro y el NPSH_r proporcionado por el fabricante se obtienen las siguientes curvas de NPSH_r para cada velocidad de giro:

GRÁFICA 9

NPSH_r para diferentes velocidades



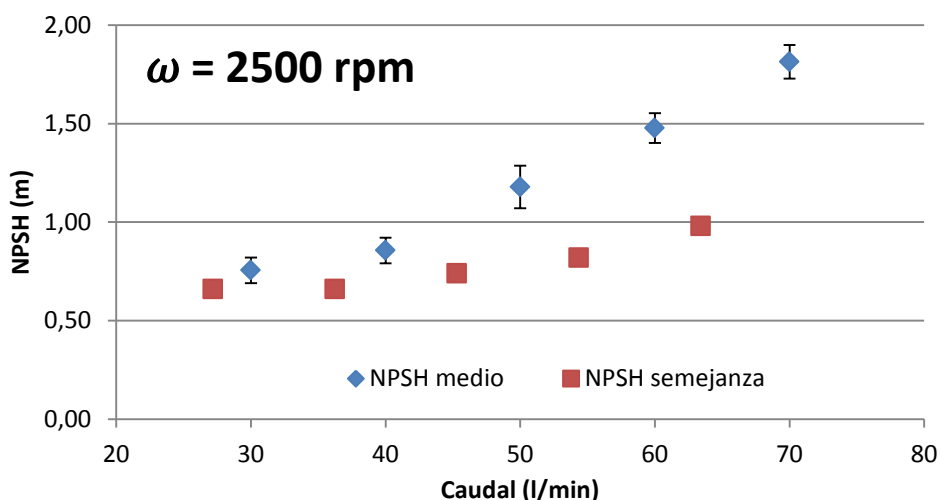
Se comprueba que cuanto mayor es la velocidad de giro, más fácil es que la bomba sufra cavitación y más alto es el NPSH_r para evitar que se produzca el indeseado fenómeno.

4.2.3.2 Medida experimental del NPSH_r

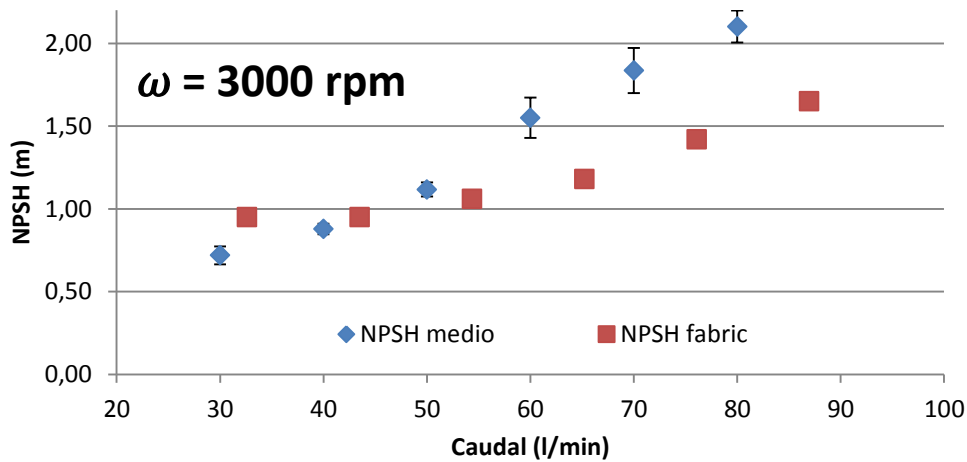
Para calcular en NPSH_r de manera experimental se varía la velocidad de la bomba hasta conseguir la velocidad deseada y posteriormente se realiza el mismo experimento que en el apartado 4.3. Al disminuir la velocidad de giro a 2500 rpm no se llega al caudal de 80 l/min, por lo que se pierde un punto de la curva. Lo contrario pasa cuando se aumenta la velocidad de giro a 3000 rpm. Para conseguir el caudal de 30 l/min hay que estrangular tanto la válvula de caudal que se llega a percibir la cavitación en la válvula antes que en la propia bomba.

Después de realizar el experimento, también con 10 medidas para caudal, se obtienen las siguientes gráficas. Además el NPSH_r medio se acompaña con la desviación típica de cada grupo de medidas:

GRÁFICA 10



GRÁFICA 11



Los resultados se ajustan más a la curva teórica en el caso de 3000 rpm que en el caso de 2500 rpm, por lo que en el futuro se recomienda realizar el experimento a esta velocidad.

4.3 Justificación de las medidas

Uno de los problemas que se creyó que hacían que el experimento no saliese totalmente igual que la curva teórica era un problema de tolerancia de las medidas. No se sabía si la incertidumbre de medida de los presostatos era tan grande que la caída del 4% de la altura manométrica era difícilmente detectable.

Para ello se calculó la incertidumbre de medida de los presostatos. Según la ficha técnica (ver Anexo V) la exactitud de medida era el 0'25% del fondo de escala sobre el que se estuviera midiendo. Es decir, si se estaba midiendo 1 bar, la incertidumbre sería:

$$U = \frac{0'25}{100} \cdot 1 \text{ bar} = 0'0025 \text{ bar} = 2'5 \text{ mbar}$$

En el caso menos favorable para el estudio, que es cuando se está midiendo la altura manométrica más pequeña ($H_m=13 \text{ m}$), los dos presostatos marcan 0'81 (salida) y -0'44 bares entrada) respectivamente, con lo que sus incertidumbres serían $U_e=0'0020 \text{ bar}$ y $U_s=0'0011 \text{ bar}$.

Como la altura manométrica se calcula según la Ecuación 35:

$$H_m = 10'2 \cdot (P_s - P_e) + 0'2$$

ECUACIÓN 35

La incertidumbre de la altura manométrica, suponiendo que hay correlación entre las dos medidas, sería:

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

$$U_{H_m} = 10'2 \cdot (U_e + U_s) = 0'032 \text{ m}$$

ECUACIÓN 36

Como la altura manométrica son 13 metros, la caída que se tiene que poder medir (la tolerancia) es de $T=13 \cdot 0'04= 0'52 \text{ m}$. Según el criterio para una buena práctica metrológica, se debe cumplir:

$$U \leq \frac{T}{6} \rightarrow 0'032 \leq \frac{0'52}{6} \rightarrow 0'032 \leq 0'086$$

ECUACIÓN 37

Con este sencillo cálculo queda comprobado que el sistema de medida es suficientemente fiable para las variables que se están midiendo y los resultados que se quieren obtener.

Capítulo 5. Prácticas de laboratorio

5.1 Introducción

La intención de este trabajo fin de grado es poder usar la instalación diseñada en las prácticas de laboratorio de las asignaturas en las que esté incluida la docencia sobre cavitación. Por ello en este capítulo se incluye un posible guion de prácticas enfocado a que el alumno obtenga ciertas nociones básicas sobre la cavitación y pueda entenderlo mucho mejor al poder manipular la instalación para observar el mecanismo por el que aparece la cavitación, tomar datos para realizar cálculos y percibir en primera persona el fenómeno de cavitación para afianzar los conocimientos teóricos tratados en las clases de aula.

Al final de la experimentación, el alumno presentaría un informe sobre lo realizado para que el profesor pueda comprobar que ha entendido y realizado correctamente los experimentos pedidos. Por ello también se incluye en un apartado unos resultados orientativos de lo pedido al alumno en las prácticas.

5.2 Guion de prácticas

5.2.1 Objetivo

Determinar de forma experimental el $NPSH_r$ de una bomba centrífuga y comparar gráficamente los valores con los proporcionados por el fabricante.

5.2.2 Descripción de la instalación

Depósito de acero inoxidable lleno de agua hasta el nivel que marca un tubo transparente en la parte frontal superior. Circuito cerrado de tubería de cobre de **20 mm** de diámetro interior. Salida del depósito por el frontal inferior izquierdo. Entrada al depósito por el frontal inferior derecho.

La parada y marcha de la bomba se controla con dos interruptores en el cuadro de mandos de la esquina superior izquierda. En él también se muestran las medidas de dos presostatos colocados en la aspiración y en la impulsión de la bomba. Después del presostato de la impulsión está la válvula reguladora de caudal y a continuación un caudalímetro electromagnético que además mide la temperatura. La señal de caudal se envía al cuadro de mandos y se muestra en la pantalla y la temperatura se muestra en el visor del propio caudalímetro.

En la cara superior del depósito hay una bomba de vacío con la que se extrae el aire del depósito para disminuir la presión y un vacuómetro para medir dicha presión de vacío. La parada y marcha de la bomba de vacío se controla desde un mando ubicado en la parte superior derecha de la instalación.

La tubería que sale del depósito hacia la bomba de vacío tiene una bifurcación desde donde sale un tubo hasta la parte frontal de la instalación con una válvula que al abrirse permite que el aire vuelva a entrar al depósito. La otra válvula de la bifurcación permite controlar el caudal de aire que la bomba de vacío extrae del depósito. El interruptor general de la instalación está en el lateral derecho del armario eléctrico de la parte frontal inferior, además de la parada de emergencia.

Para provocar la cavitación se pone en funcionamiento el sistema y se disminuye la presión del depósito, mediante la bomba de vacío, hasta que se detecte la cavitación, que se considera cuando se produce una disminución del 4% en la altura manométrica. En ese momento se anotan los datos, que son: temperatura, caudal, presión a la entrada de la bomba y presión a la salida de la bomba.

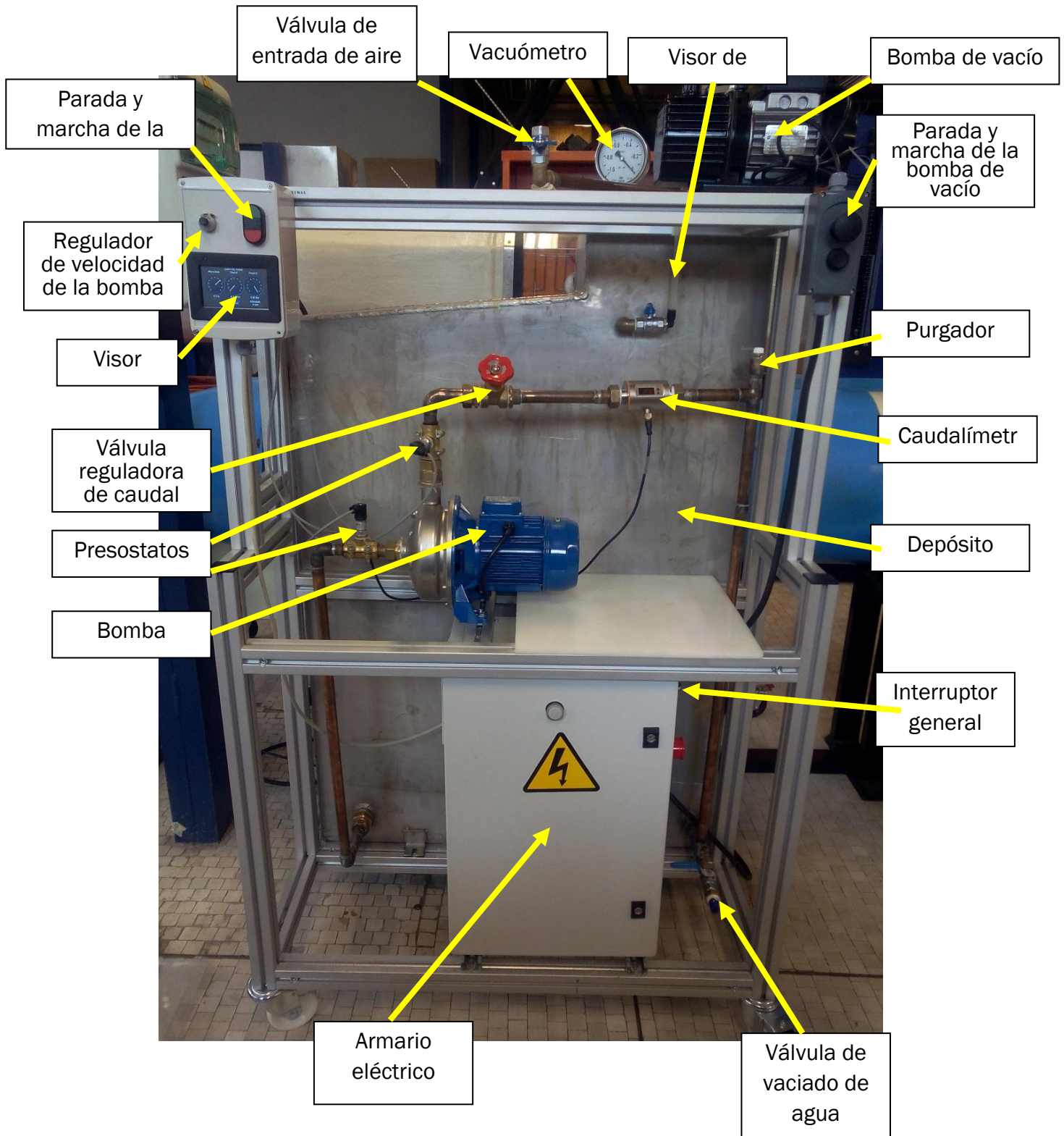


FIGURA 22. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.

5.2.3 Procedimiento para la toma de datos

1. **Comprobar** que la válvula reguladora de caudal está cerrada.
2. **Encender** el sistema en el interruptor lateral del armario, encender la bomba en el botón verde del cuadro de mandos. Ajustar la velocidad de la bomba a 2760 rpm. Abrir la válvula de entrada de aire al depósito y la de nivel, comprobando que el nivel del agua está entre los límites marcados en el visor de nivel. Una vez comprobado cerrar ambas.
3. Usando la válvula de caudal, establecer el caudal de 20 l/min mirando el dato de la pantalla del cuadro de mandos.
4. Esperar a que la temperatura que mide el caudalímetro se estabilice y apuntarla para obtener la presión de vapor. (El caudalímetro se calienta por las resistencias internas y puede alterar la medida, de hecho en cuanto se pone en marcha se observa que desciende ligeramente hasta mostrar la temperatura real).
5. **Comenzar a hacer el vacío.** Presionar el botón INICIO del visor y encender la bomba de vacío en él.
6. **Realizar experimento.** Esperar hasta que el sistema perciba la caída de la H_m , en el momento en el cual se emitirá un pitido constante que coincidirá con el crepitar de la bomba. En ese momento, pulsar el botón del visor para detener la toma de datos. Detener también la bomba de vacío en la seta negra del cuadro superior derecho. Abrir la válvula de entrada de aire.
7. **Anotar datos.** La pantalla muestra la H_m y el caudal iniciales y la presión a la entrada de la bomba en el momento de la cavitación, que es el que se usará para calcular el $NPSH_d$. Pulsar "SALIR".

TABLA 6

Q (l/min)	20	30	40	50	60	70	80
P_e (bar)							
T^a (°C)							

8. **Repetir** desde el paso 2 con los diferentes caudales y rellenar la Tabla 6. Recordar apuntar la temperatura cada vez que se haga un experimento porque puede variar y se necesita para usar la presión de vapor correcta.
9. **Regular** la velocidad de la bomba a 3000 rpm y repetir todas las medidas para rellenar la Tabla 7.

TABLA 7

Q (l/min)	20	30	40	50	60	70	80
P_e (bar)							
T^a (°C)							
$NPSH_r$ semej							

10. Usando la Ecuación 41 del apartado siguiente, la Tabla 10 y con los datos obtenidos, calcular el $NPSH_d$ y rellenar la Tabla 8 y la Tabla 9:

TABLA 8

2760 rpm					
Caudal (l/min)	P _{entrada_man} (bar)	T ^a (°C)	P _{vapor} (Pa)	NPSH _d	NPSH _{rfabric}
30					0'8
40					0'8
50					0'9
60					1
70					1'2
80					1'4

TABLA 9

3000 rpm				
Caudal (l/min)	P _{entrada_man} (bar)	T ^a (°C)	P _{vapor} (Pa)	NPSH _d
30				
40				
50				
60				
70				
80				

TABLA 10

T ^a (°C)	1	4	5	6	8	10	11	12	13
P (bar)	0,00611	0,00813	0,00872	0,00935	0,01072	0,01228	0,01312	0,01402	0,01497
T ^a (°C)	14	15	16	17	18	19	20	21	22
P (bar)	0,01598	0,01705	0,01818	0,01938	0,02064	0,02198	0,02339	0,02487	0,02645
T ^a (°C)	23	24	25	26	27	28	29	30	31
P (bar)	0,0281	0,02985	0,03169	0,03363	0,03567	0,03782	0,04008	0,04246	0,04496

5.2.4 Cálculos

Al estudiar la cavitación en bombas, se ha definido el NPSH requerido y disponible [3]. El NPSH_r es la mínima energía (en términos de altura) que tiene que tener el fluido a la entrada de la bomba para que no se produzca cavitación. El NPSH_d es la energía (en términos de altura) que tiene el fluido a la entrada de la bomba y se puede calcular:

$$NPSH_d = \frac{P_D - P_v}{\rho \cdot g} - \Delta z_{asp} - H_{p_{asp}}$$

ECUACIÓN 38

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Donde P_D es la presión del agua en el depósito de aspiración, P_v es la presión de vapor, Δz_{asp} es la cota de la aspiración de la bomba sobre el nivel del agua en el depósito de aspiración (en esta instalación será negativa porque la bomba está por debajo del nivel del agua en el depósito) y $H_{p\ asp}$ es la altura de pérdidas de carga desde el depósito de aspiración hasta la entrada de la bomba.

Para que no se produzca cavitación se debe cumplir:

$$NPSH_d > NPSH_r$$

ECUACIÓN 39

La cavitación incipiente se produce cuando se produce la igualdad en la Ecuación 39 y se utilizará para determinar el $NPSH_r$.

Para conocer el término H_{pasp} de la Ecuación 38, se aplica la ecuación de conservación de la energía mecánica entre la superficie libre del líquido que se aspira (D) y la entrada de la bomba (A), considerando que las únicas fuerzas másicas son las gravitatorias:

$$\left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right)_A - \left(\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right)_D = -g \cdot H_{pasp}$$

ECUACIÓN 40

Despejando H_{pasp} y sustituyendo en la Ecuación 38, se obtiene:

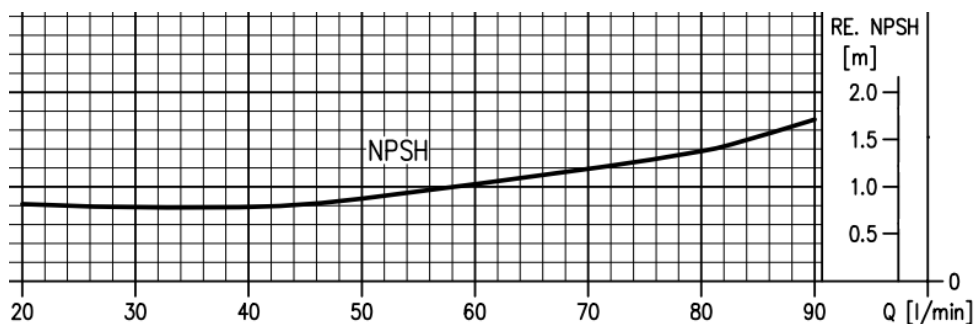
$$NPSH_d = \frac{P_A - P_v}{\rho \cdot g} + \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4}$$

ECUACIÓN 41

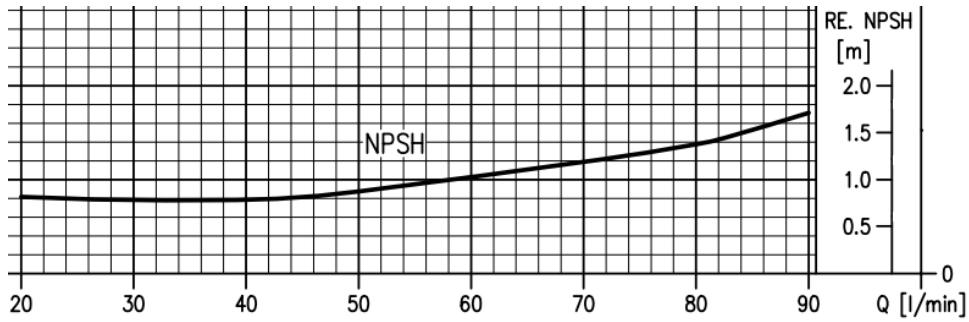
Donde Q es el caudal que recorre la instalación y D es el diámetro interior de la aspiración.

5.2.5 Presentación de resultados

1. Representar sobre la gráfica NPSH-Q proporcionada por el fabricante [32], la obtenida experimentalmente.



- Calcular de forma teórica aplicando semejanza la curva del $NPSH_r$ a 3000 rpm partiendo de la del fabricante. Superponer las medidas realizadas a 3000 rpm.



- ¿A qué se pueden deberse las discrepancias entre la curva teórica y la experimental?

5.3 Resultados orientativos de las prácticas

TABLA 11

2760 rpm			
Q (l/min)	P _{entrada_man} (bar)	NPSH _d	NPSH _d fabric
30	0'862 ± 0'004	0'65 ± 0'04	0'8
40	0'857 ± 0'005	0'8 ± 0'05	0'8
50	0'841 ± 0'009	1'09 ± 0'09	0'9
60	0'809 ± 0'009	1'57 ± 0'09	1
70	0'773 ± 0'014	2'12 ± 0'14	1'2
80	0'757 ± 0'018	2'50 ± 0'18	1'4

GRÁFICA 12

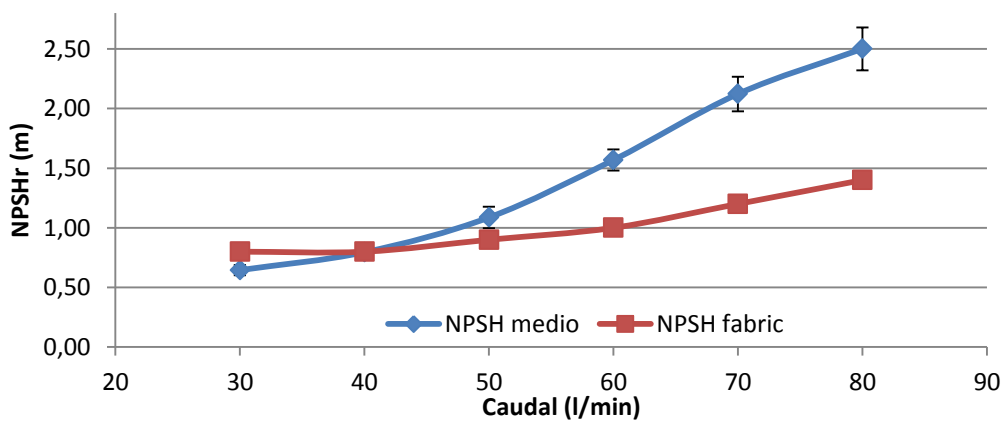
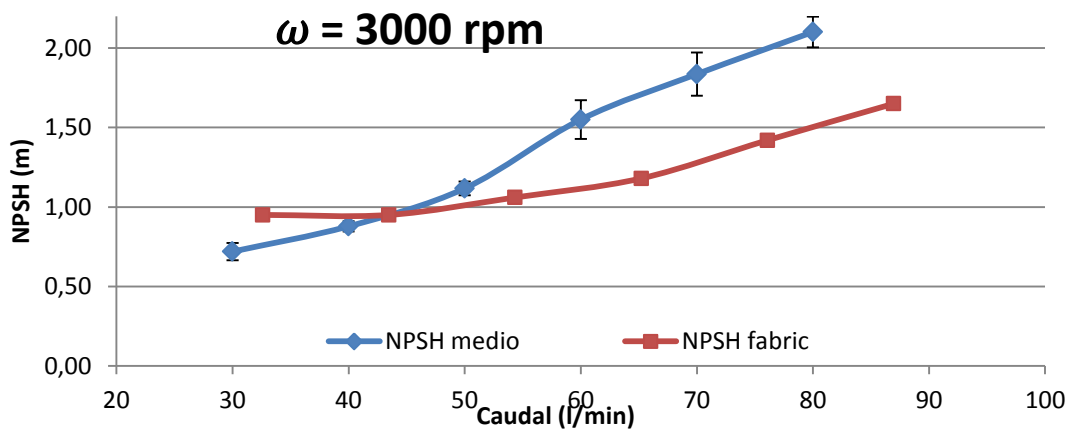


TABLA 12

3000 rpm				
Q (l/min)	Pentrada_man (bar)	NPSH _d	NPSH _{dteórico}	Qteórico
30	-0'855 +- 0'005	0'72 +- 0'05	0'95	32'61
40	-0'849 +- 0'003	0'88 +- 0'03	0'95	43'48
50	-0'838 +- 0'004	1'12 +- 0'04	1'06	54'35
60	-0'811 +- 0'012	1'55 +- 0'12	1'18	65'22
70	-0'783 +- 0'013	1'84 +- 0'14	1'42	76'09
80	-0'757 +- 0'009	2'10 +- 0'10	1'65	86'96

GRÁFICA 13



Capítulo 6. Conclusiones finales y trabajos futuros

De todo el proyecto se pueden extraer numerosas conclusiones. A continuación se detallan las más importantes:

6.1 Conclusiones generales

El proyecto ha sido una gran experiencia debido a que abarca todas las fases de la fabricación de un producto, desde el diseño, construcción, puesta a punto y realización de los experimentos. Se han podido trabajar en áreas de la ingeniería usando asignaturas estudiadas previamente como el Dibujo Técnico, el diseño con modelado 3D, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Ingeniería de Organización, todas las asignaturas de Fluidomecánica, Soldadura, Física, Estructuras... Por lo que ha sido muy satisfactorio poder usar todos esos conocimientos conjuntos en una única aplicación real.

También han resultado de utilidad los problemas que han ido surgiendo para mejorar en el proceso de reacción y toma de decisiones hasta encontrar soluciones con las que seguir trabajando.

6.2 Conclusiones sobre la instalación

La instalación ha quedado afinada y con un funcionamiento adecuado para las prácticas que realizarán los alumnos en el futuro o cualquier otra persona que quiera seguir investigando o entendiendo el fenómeno de la cavitación.

Se ha conseguido que se produjera cavitación en la bomba a pesar de varios problemas que han surgido en el montaje de la misma. La bomba de vacío es capaz de hacer descender la presión del depósito lo suficiente como para que se pueda percibir la cavitación con cualquier caudal. La instalación se comporta de manera bastante estable en la toma de resultados y, para su peso, es fácilmente transportable. Tiene todos los mandos accesibles y una mesa para facilitar la toma de datos.

El resultado es satisfactorio, pero mejorable. Por ejemplo en el diseño del depósito la costilla central del depósito no tiene abertura en la parte inferior porque se quería evitar el cortocircuito entre la entrada y la salida obligando al agua a ascender y soltar las posibles burbujas que tuviera, pero eso implica que si se quiere vaciar el depósito haya que abrir tanto el orificio de entrada como el de salida. Aunque también se ha comprobado que si el circuito está cebado hace de vaso comunicante entre ambos volúmenes y se acaba vaciando el depósito hasta la altura de los orificios, quedando siempre una cierta cantidad de agua en el depósito.

Como es lógico, la bomba está sufriendo cavitación frecuentemente, por lo que se debería realizar inspecciones periódicas para comprobar que no están afectados los álabes o reponer el rodete o la bomba si fuera necesario.

6.3 Conclusiones sobre los ensayos realizados

Los datos obtenidos en los experimentos realizados apuntan tendencias muy parecidas a los datos del fabricante de la bomba y a los modelos empíricos usados para comparar. Se han realizado diversos experimentos, tanto para calcular la curva de la bomba como para estudiar la cavitación en la bomba.

En el ensayo 4.1 se ha medido la caída de Q y de H_m que se producía cuando se detectaba cavitación en la bomba. Alguno de los trabajos [11] vistos en el punto 2.3 afirma que se producía una caída de caudal constante en torno al 3% cuando se producía cavitación. Los resultados obtenidos demuestran que se produce una caída sobre el 4% en la altura manométrica pero la caída del caudal en el punto de inicio de cavitación no parece tener ninguna relación directa con la aparición de la misma.

En el experimento 4.3.1 se intentó obtener la curva de $NPSH_r$ tomando los datos cuando se percibía de manera sonora la cavitación, aunque como se vio posteriormente no se conseguía una curva más parecida a la suministrada por el fabricante que en el apartado 4.3.2. En este último experimento se calculó el $NPSH_r$ tomando los datos cuando la H_m caía un 3, 4 y 5% para comprobar con qué porcentaje el cálculo resultaba más adecuado. Se llegó a la conclusión de que al 4%, ya que la curva quedaba razonable y la detección de la caída de la H_m coincidía con el crepitar de la cavitación.

Por último, en el 4.3.3 se investigó la influencia de la velocidad de giro del rodete en el $NPSH_r$. Para ello se calculó mediante semejanza la curva $NPSH_r$ partiendo de la proporcionada por el fabricante para dos velocidades de giro diferentes y posteriormente se determinó experimentalmente la misma curva, obteniéndose una buena aproximación.

6.4 Trabajos futuros

Al ser un tema poco trabajado en el ámbito de los Trabajos de Fin de Grado, las posibilidades de trabajos futuros son muy amplias. Se podría contactar con algún fabricante para conocer en profundidad el protocolo utilizado en fábrica para la determinación de las curvas de las bombas y ver si ahí puede estar la diferencia que se observa con los resultados obtenidos en el laboratorio.

Para hacer la instalación más visual se podría cambiar la carcasa metálica y opaca del rodete por una carcasa de un material transparente para tratar de observar el fenómeno que se produce en el rodete, las burbujas o las turbulencias que se

producen en el flujo al colapsar y relacionar estos fenómenos con la detección de la cavitación.

Otra vía de trabajo futuro podría ser detectar la cavitación con un micrófono insertado en la aspiración de la bomba. Se trataría de probar si en el momento en el que se empieza a escuchar la cavitación se produce una variación constatable de la frecuencia recogida por el micrófono y resulta un método más fiable que la caída de H_m para detectar la cavitación.

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Capítulo 7. Estudio económico del proyecto

Una parte muy importante de todos los proyectos es la económica, pues muchas veces va a marcar los recursos de los que se puede disponer. Para ello se va a estimar el coste total que ha supuesto el presente proyecto, diferenciando entre costes materiales y costes de mano de obra.

7.1 Gastos materiales

TABLA 13

Concepto	Precio unitario	UD	Total
	1700'05		
Depósito acero inoxidable 304 e=6 mm	€/UD	1	1700'05 €
Bastidor fabricado en perfil aluminio con ruedas	638'71 €/UD	1	638'71 €
Caudalímetro electromagnético IFM SM8000	646'50 €/UD	1	646'50 €
Bomba de alto vacío Wigam DIP-401	400 €/UD	1	400 €
Bomba hidráulica centrífuga Ebara CDX/A 70/05	355'62 €/UD	1	355'62 €
Presostato GEMS 3100 Series	117'81 €/UD	2	235'62 €
Cuadro de mandos con pantalla táctil, mando micrométrico y parada y marcha	87'16 €/UD	1	87'16 €
Vacuómetro analógico WIKA -1 a 0 bar	45'51 €/UD	1	45'51 €
Armario eléctrico con variador de velocidad, diferencial, magnetotérmico y parada de emergencia	469'14 €/UD	1	469'14 €
Válvula de aguja Genebre 1"	77'20 €/UD	1	77'20 €
Tubería de cobre diámetro exterior nominal 22 mm	7'16 €/m	2 m	14'32 €
Tubería de cobre diámetro exterior nominal 35 mm	22'4 €/m	2 m	44'8 €
Otros (codos, llaves, tubo rilsen, agua, electricidad...)			150 €
Total			4864'66 €

Se ha incluido una estimación de los gastos de agua y electricidad en el apartado "otros". Representa aproximadamente un 3% del presupuesto de gastos materiales.

7.2 Gastos de mano de obra

TABLA 14

Concepto	Precio unitario	UD	Total
Técnico de laboratorio	15 €/h	75	1125 €
Ingeniero	20 €/h	300	6000 €
Total			7125 €

En este apartado se incluye los gastos de mano de obra del técnico de laboratorio y del alumno, es decir, las horas que han trabajado. Se ha hecho una estimación con un hipotético salario de 20 €/h para el ingeniero y de 15 €/h para el técnico de laboratorio, aunque realmente el presente proyecto ha sido realizado por un alumno de la Universidad de Valladolid que no es un ingeniero empleado ni pertenece a ningún programa de prácticas, por lo que el coste de mano de obra es únicamente a modo orientativo.

7.3 Gastos totales

Los gastos totales se obtienen sumando los gastos de materiales y los de mano de obra, así que el gasto total del proyecto sería:

TABLA 15

Concepto	Coste
Costes materiales	4864'66 €
Costes de mano de obra	7125 €
Total	11989'66 €

En este proyecto no había presupuesto inicial ni límite, por lo que no ha supuesto un problema ni a la hora del diseño ni a la hora de elegir los materiales o elementos, aunque se ha intentado ajustar el gasto de manera razonable para que se pudiera construir la instalación y funcionara adecuadamente.

Referencias

- [1] Morán y Saphiro. Fundamentos de la termodinámica técnica. Editorial Reverté, 2004. Tabla A2.
- [2] Monte Everest, artículo de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Monte_Everest
- [3] Apuntes la asignatura Máquinas hidráulicas y térmicas. Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.
- [4] Bomba centrífuga, artículo de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_centric%C3%ADfuga
- [5] Pfleiderer, C. 1960. Bombas centrífugas y Turbocompresores, Ed. Labor, Barcelona.
- [6] Wright, T., Gerhart, P.M. 2010: Fluid Machinery: Application, selection and design. Second Edition. CRC Press.
- [7] Web de MEGA Corp. http://www.megacorpinc.com/parts/faq_water_pumps.asp
- [8] WORLD PUMPS July/August 2011. Centrifugal pumps: avoiding cavitation. Page34. Joshep R. Askew
- [9] WORLD PUMPS September 2006. Calculating NPSHA in pumping- The think Method. Page 20. Joseph R. Askew
- [10] WORLD PUMPS April 2011. The NPSH performance indicator, NPSH(PI). Page 36. Dr.Edward Grist
- [11] Experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas: Reyes De la Cruz et al. Latin-American Journal of Physics Education, ISSN-e 1870-9095, Vol. 4, 2010
- [12] Norma ANSI/HI 9.6.1-2012
- [13] Web de Europumps (Asociación Europea de Bombas).
<http://europump.net/publications/guides-and-guidelines/hydraulic-institute-hi-guides>
- [14] Cavitation misunderstandings & other stories. Simon Bradshaw.
- [15] Apuntes de la asignatura Ingeniería de Materiales. Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.
- [16] Modern polymeric materials offer options for equipment repair. Kyle Flanagan.
- [17] Restoration and Efficiency Enhancement for Pumps. Web de Belzona.
<http://www.belzona.com/en/applications/pumps.aspx>
- [18] Velocidad específica. Ricardo Cifuentes. M3H REVISTA AÑO 10 N°57 JUNIO-JULIO 2013.
- [19] A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines: (in S.I. Units), R. K. Bansal, Laxmi Publications.

- [20] Liquid rocket engine. Turbopumps inducers. National Aeronautics and Space Administration. Mayo de 1971.
- [21] Investigations on the performance of centrifugal pumps in conjunction with inducers. El Samanody et al. Ain Shams Engineering Journal. Volume 5, Marzo de 2014, pág. 149-156.
- [22] Pump Inducers. Technical information Bulletin N 10. Peerless Pump Company.
- [23] Inducers for centrifugal pumps. Lawrence Pumps Inc. 2009.
- [24] Reparación de turbina hidroeléctrica con belzona. Web de Belzona:
<http://khia.belzona.com/EN/view.aspx?id=4674>
- [25] Práctica 3. Ensayo de bomba centrífuga y cavitación. Turbomáquinas. Antonio Lecuona y J. I. Nogueira, Dpto. de Ingeniería Térmica y de Fluidos Universidad Carlos III de Madrid.
- [26] Cavitación, ultrasonido y radiofrecuencia paso a paso. Alfredo Luis Doldan. Ingeniería San Antonio tecnología medicinal.
- [27] Web de tratamiento de cavitación:
<http://cavitacion.org.es/cavitacion-intraadipocitaria>
- [28] La cavitación. Germán Fernández Sánchez. Podcast de Radio "El Neutrino". La cavitación. www.cienciaes.com
- [29] Cavitación ultrasónica aplicada en adiposidades localizadas. Efectos fisiológicos. Fº Javier Rodrigo Bellido. efisioterapia.net
- [30] Why does a beer bottle foam up after a sudden impact on its mouth? Javier Rodríguez et al. Departamento de Ingeniería Fluidomecánica. Universidad Carlos III de Madrid. Biblioteca online de la Universidad de Cornell.
- [31] Supercavitación, artículo de Wikipedia:
<https://es.wikipedia.org/wiki/Supercavitaci%C3%B3n>
- [32] Catálogo Ebara de bombas CDX 70/05 sacado de <http://ebara-pumps-online.com>
- [33] Diagrama de Moody:
<http://www.dequi.eel.usp.br/~lmguiaraes/Diagrama%20de%20Moody.pdf>
- [34] Ábacos pérdidas de carga en tuberías:
[ftp://ftp.ehu.es/cidirb/profs/inpibbeg/material/10_11_abacos/10_11_04_perdid as_carga_ABACOS.pdf](ftp://ftp.ehu.es/cidirb/profs/inpibbeg/material/10_11_abacos/10_11_04_perdid%20as_carga_ABACOS.pdf)
- [35] Catálogo Fasten: <http://es.slideshare.net/juanorrego2/catlogo-fasten>

Anexo I - Planos

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

D

C

B

A

4

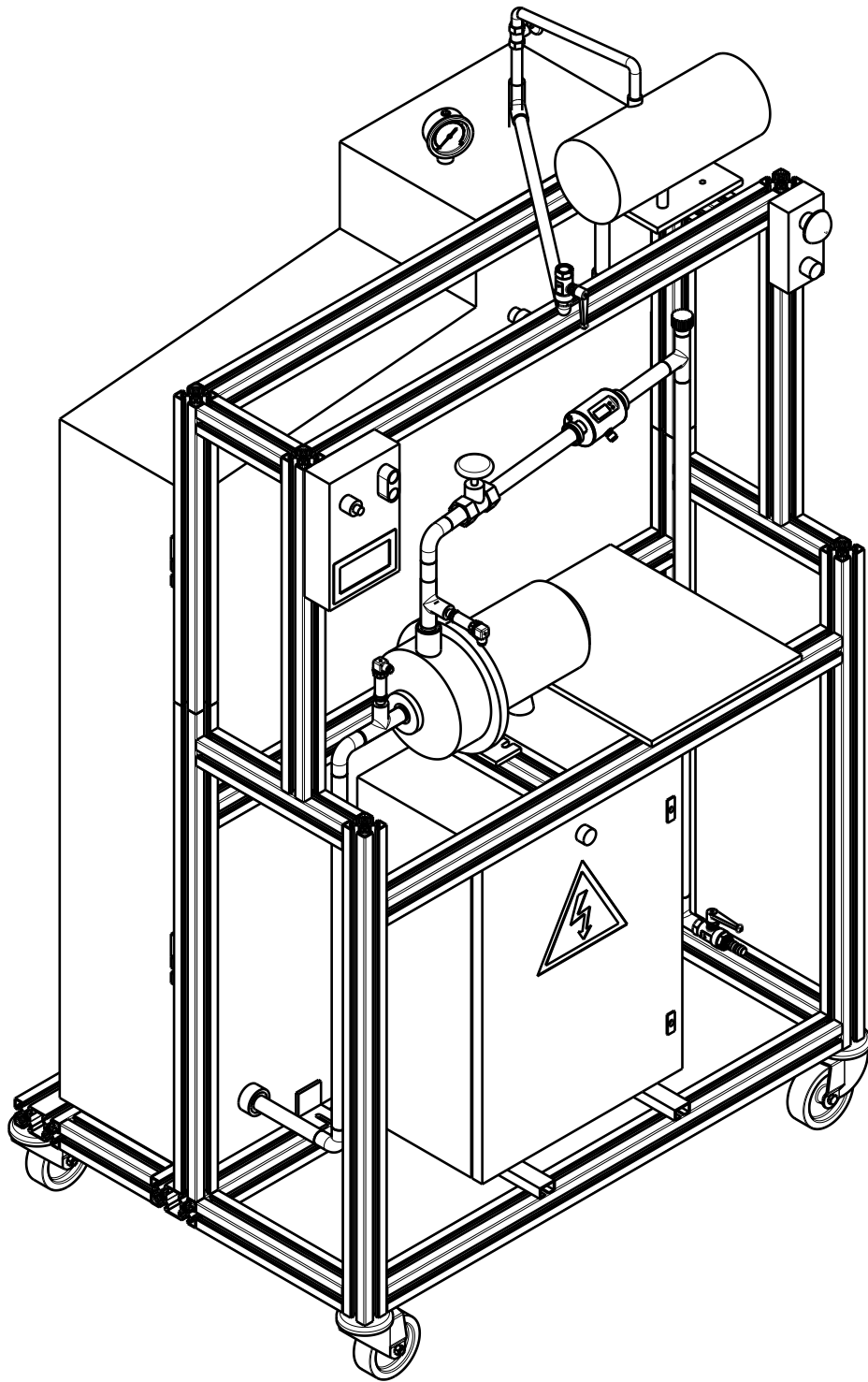
4

3

3

2

2



1

1

DESIGNED BY:

Pedro Barcina

DATE:

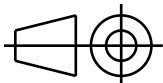
15/04/2016

CHECKED BY:

DATE:

SIZE

A4



TFG

Diseño y puesta a punto
práctica de cavitación

Universidad de Valladolid

SCALE

1:10

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER

3D

SHEET

1/11

I

-

H

-

G

-

F

-

E

-

D

-

C

-

B

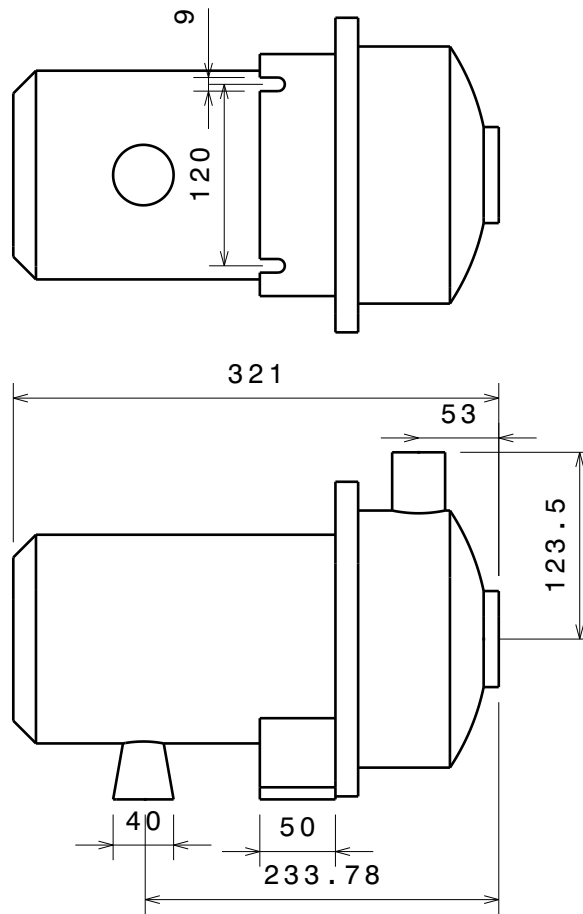
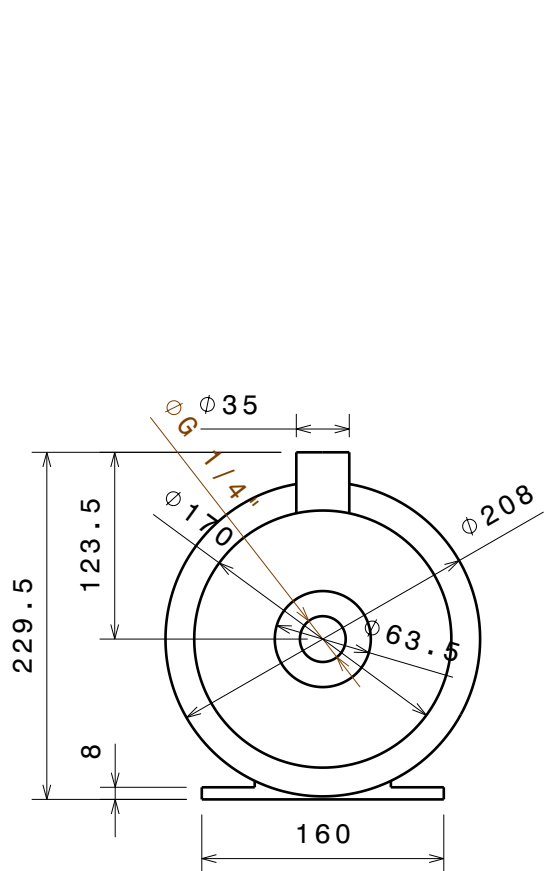
-

A

-

D

A



DESIGNED BY: Pedro Barcina		TFG Diseño y puesta a punto práctica de cavitación		I	-
DATE: 15/04/2016				H	-
CHECKED BY:		Universidad de Valladolid		G	-
DATE:				F	-
SIZE A4		BOMBA		E	-
SCALE 1:5	WEIGHT (kg)			D	-
DRAWING NUMBER		SHEET		C	-
		2/11		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

4

3

2

1

D

C

B

A

4

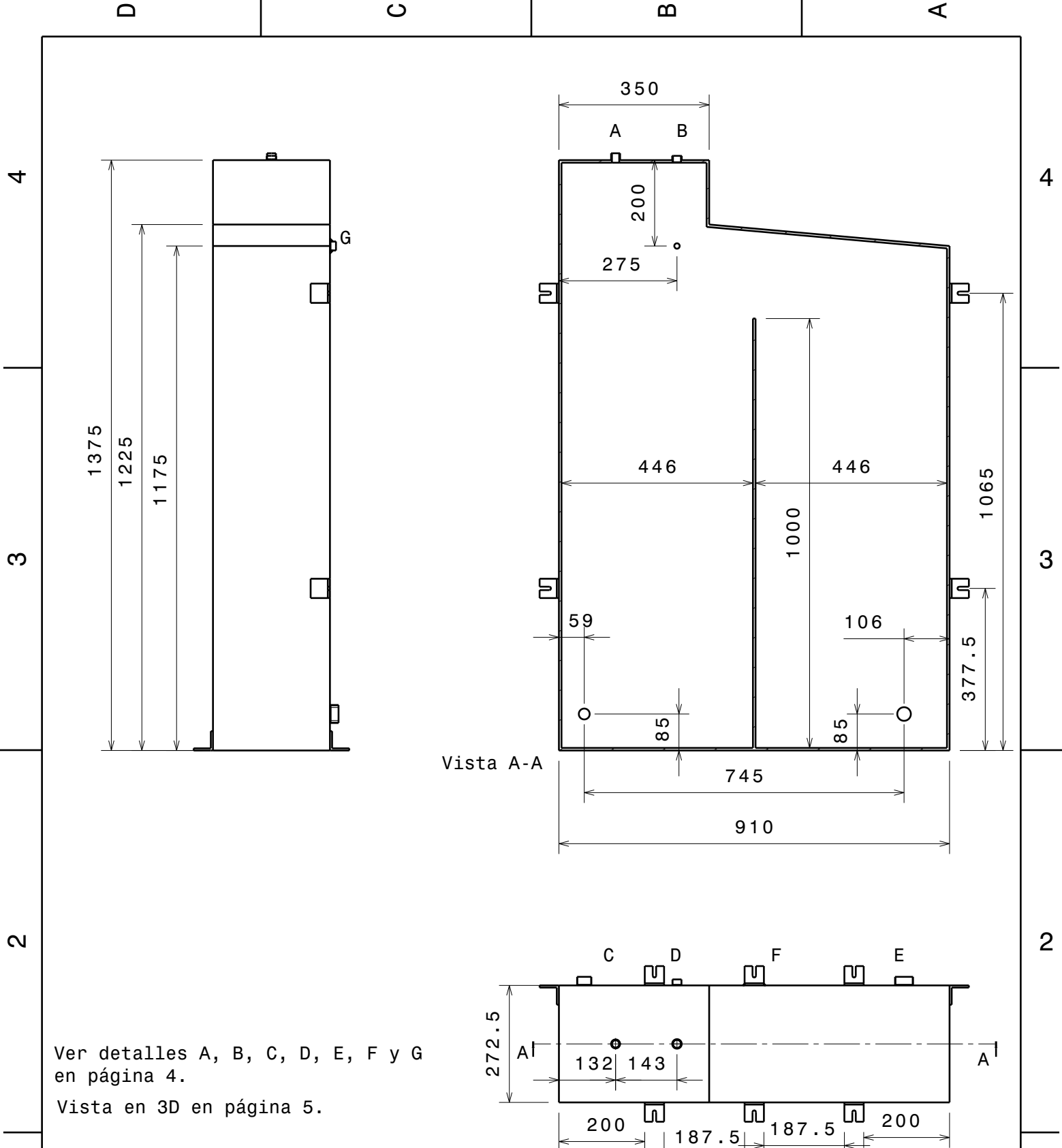
3

2

1

D

A



Ver detalles A, B, C, D, E, F y G en página 4.
 Vista en 3D en página 5.

DESIGNED BY: Pedro Barcina	
DATE: 15/04/2016	
CHECKED BY:	
DATE:	
SIZE A4	
SCALE 1:12	WEIGHT (kg)

TFG		I	-
		H	-
Diseño y puesta a punto práctica de cavitación		G	-
		F	-
Universidad de Valladolid		E	-
		D	-
DEPOSITO		C	-
		B	-
DRAWING NUMBER		A	-
SHEET		3/11	

4
3
2
1

4
3
2
1

D

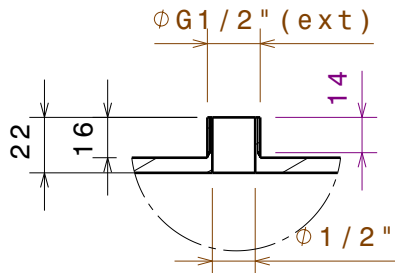
A

D

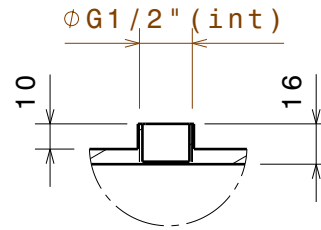
C

B

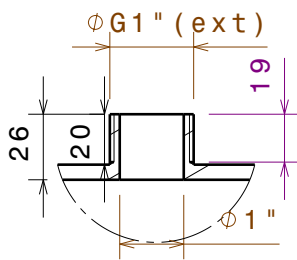
A



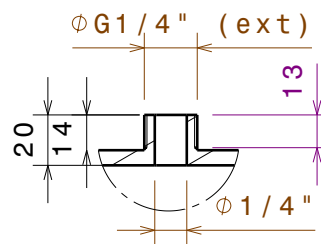
Detalle A



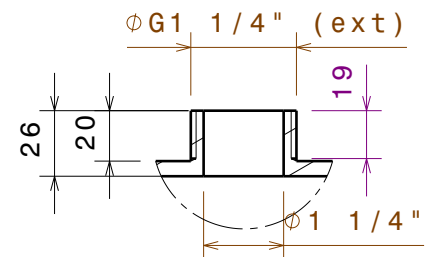
Detalle B



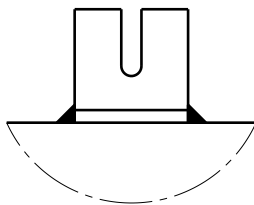
Detalle C



Detalle D

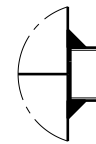


Detalle E



Detalle F

Soldadura de las L



Detalle G

Soldadura de los
tubos injertados

DESIGNED BY:

Pedro Barcina

DATE:

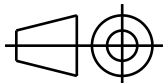
14/04/2016

CHECKED BY:

DATE:

SIZE

A4



TFG

Diseño y puesta a punto
práctica de cavitación

Universidad de Valladolid

SCALE

1:3

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER

Detalles depósito

SHEET

4/11

I

-

H

-

G

-

F

-

E

-

D

-

C

-

B

-

A

-

D

A

4

4

3

3

2

2

1

1

D

C

B

A

4

4

3

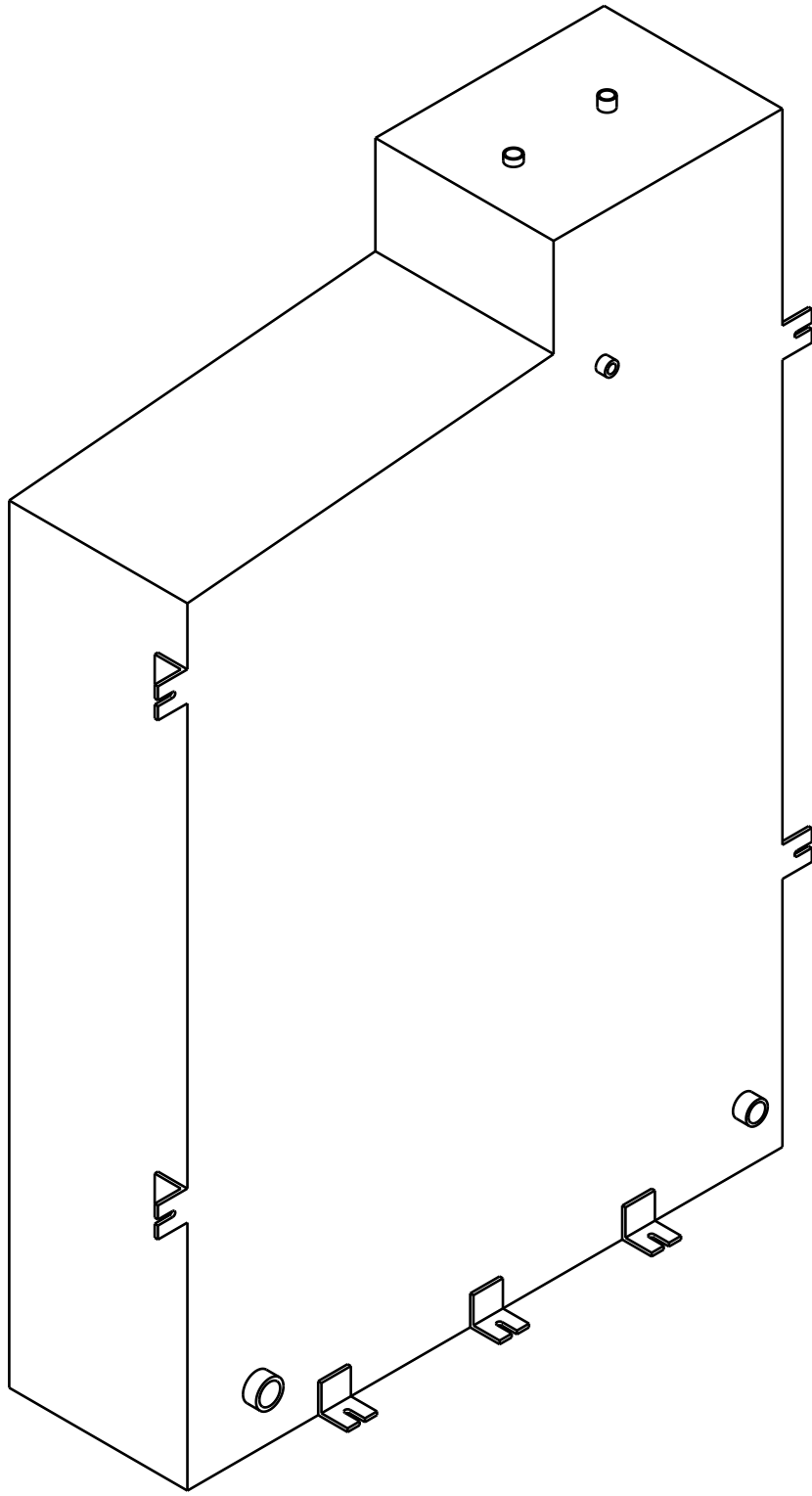
3

2

2

1

1

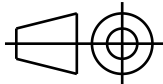


DESIGNED BY:
Pedro Barcina
 DATE:
14/04/2016

CHECKED BY:
 DATE:

TFG
Diseño y puesta a punto
práctica de cavitación

SIZE
A4



Universidad de Valladolid

SCALE
1:8

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER
Depósito 3D

SHEET
5/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D

A

D

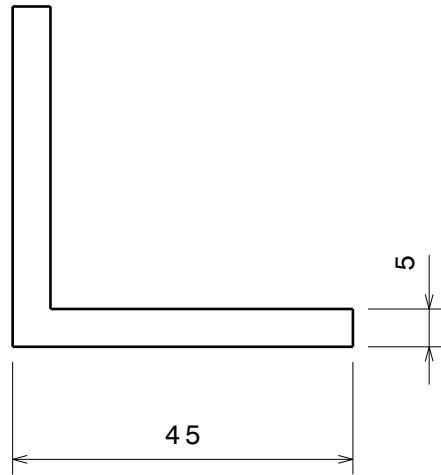
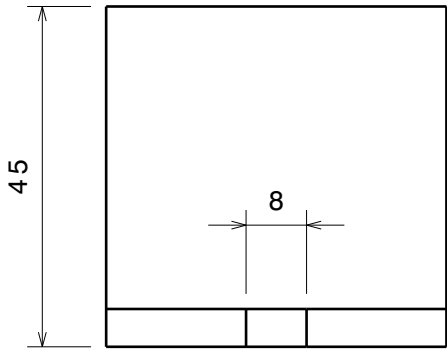
C

B

A

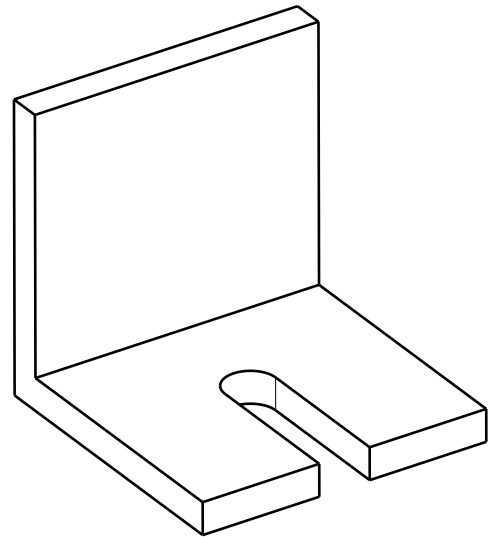
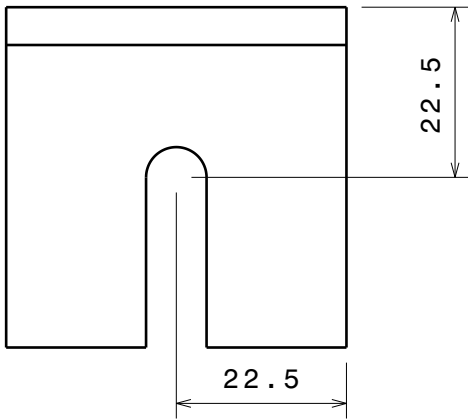
4

4



3

3



2

2

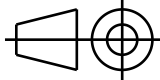
1

1

DESIGNED BY:
Pedro Barcina
DATE:
14/04/2016

CHECKED BY:
DATE:

SIZE
A4



SCALE
1:1

TFG
Diseño y puesta a punto
práctica de cavitación

Universidad de Valladolid

DRAWING NUMBER
L para soldar

SHEET
6/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D

A

D C B A

4

3

2

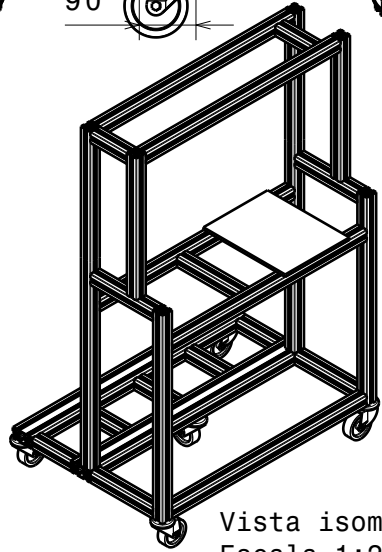
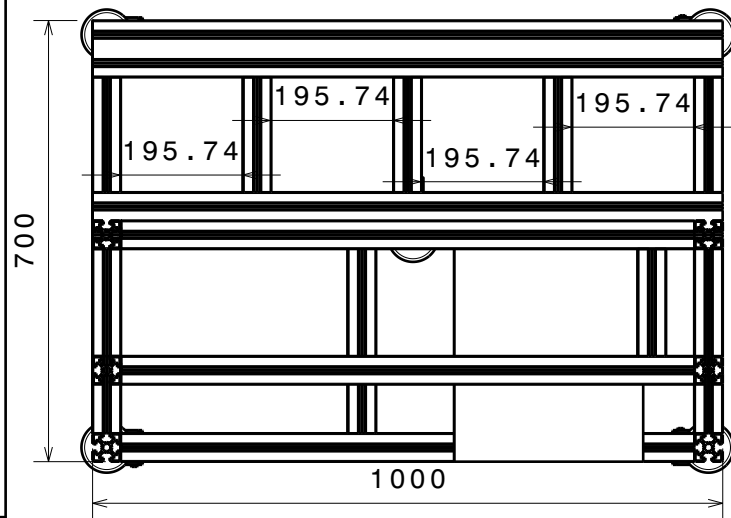
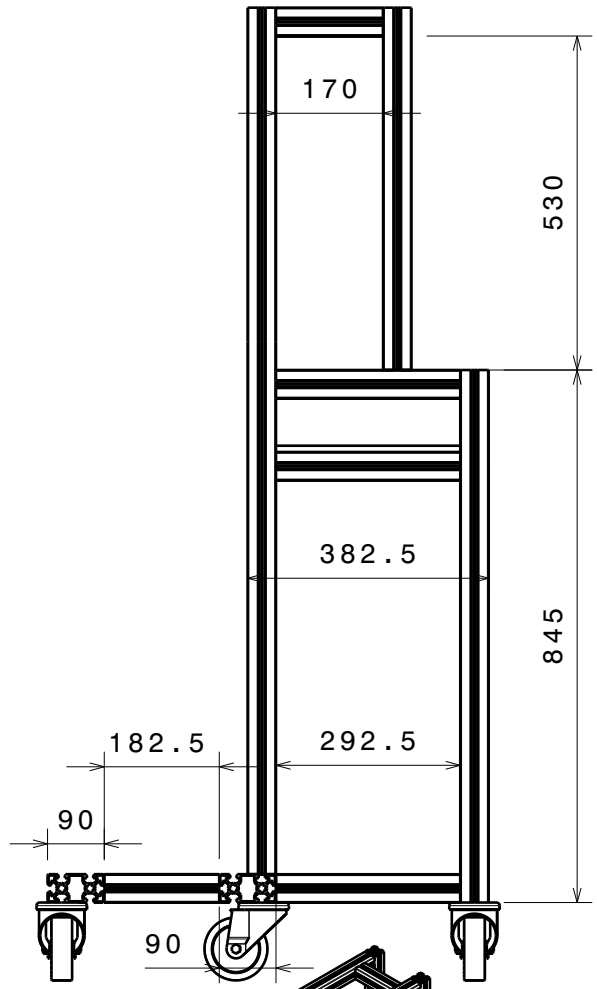
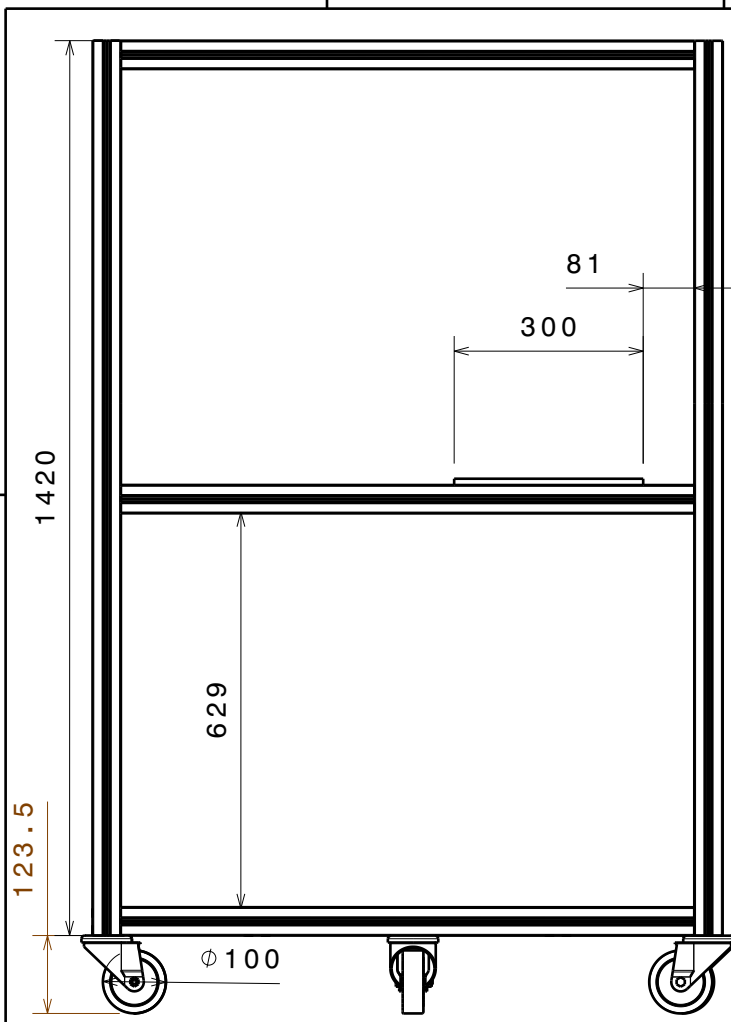
1

4

3

2

1



Vista isométrica
Escala 1:25

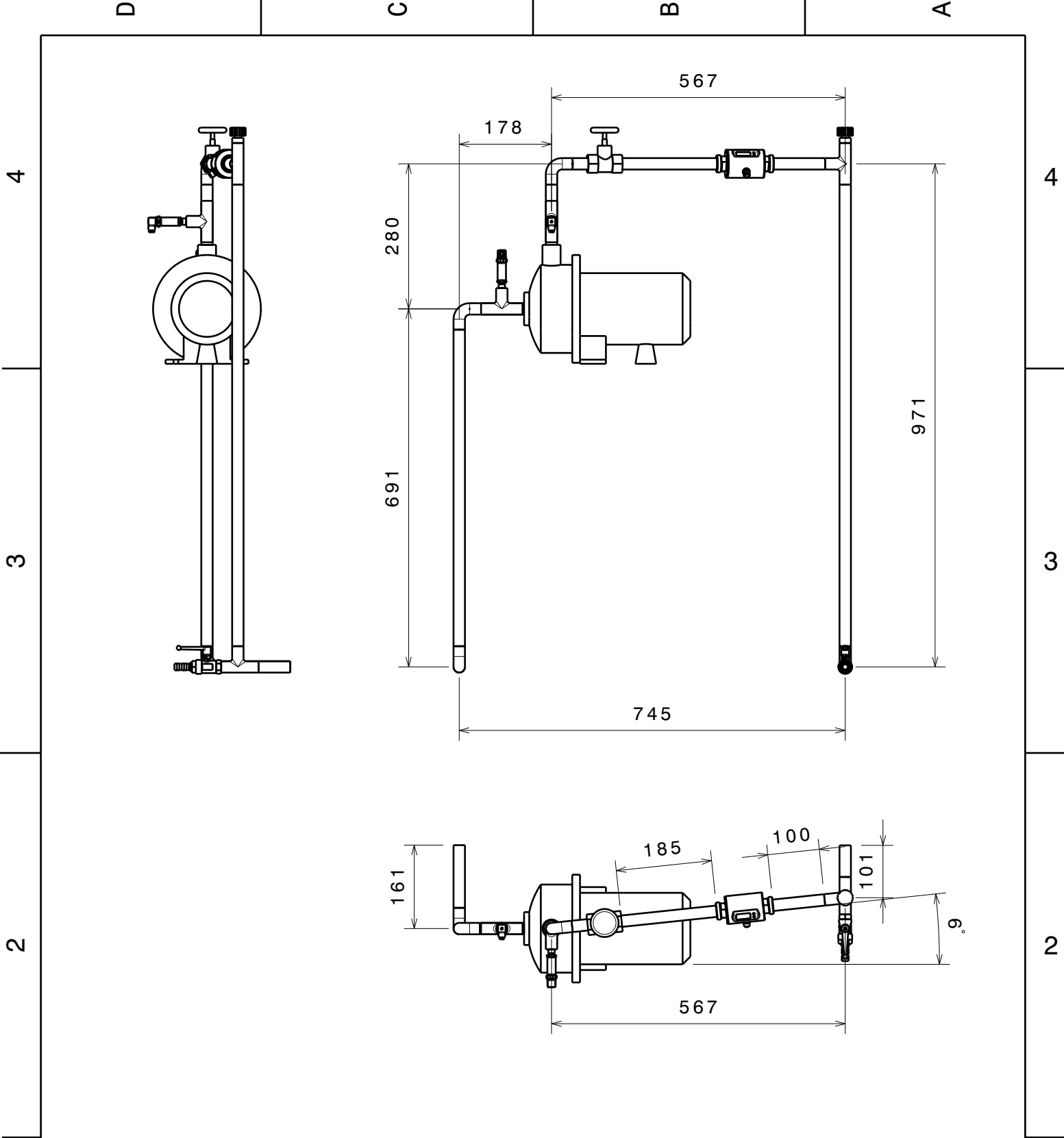
Todos los perfiles de aluminio de 45x 45 salvo los dos señalados como 90 x 45

DESIGNED BY: Pedro Barcina	
DATE: 15/04/2016	
CHECKED BY:	
DATE:	
SIZE A4	
SCALE 1:12	WEIGHT (kg)

TFG	Diseño y puesta a punto práctica de cavitación
Universidad de Valladolid	
DRAWING NUMBER Estructura	SHEET 7/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D A

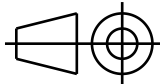


DESIGNED BY:
Pedro Barcina
 DATE:
14/04/2016

CHECKED BY:
 DATE:

TFG
Diseño y puesta a punto
práctica de cavitación

SIZE
A4



Universidad de Valladolid

SCALE
1:10

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER
Hidraulica

SHEET
8/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D

A

1

1

D

C

B

A

4

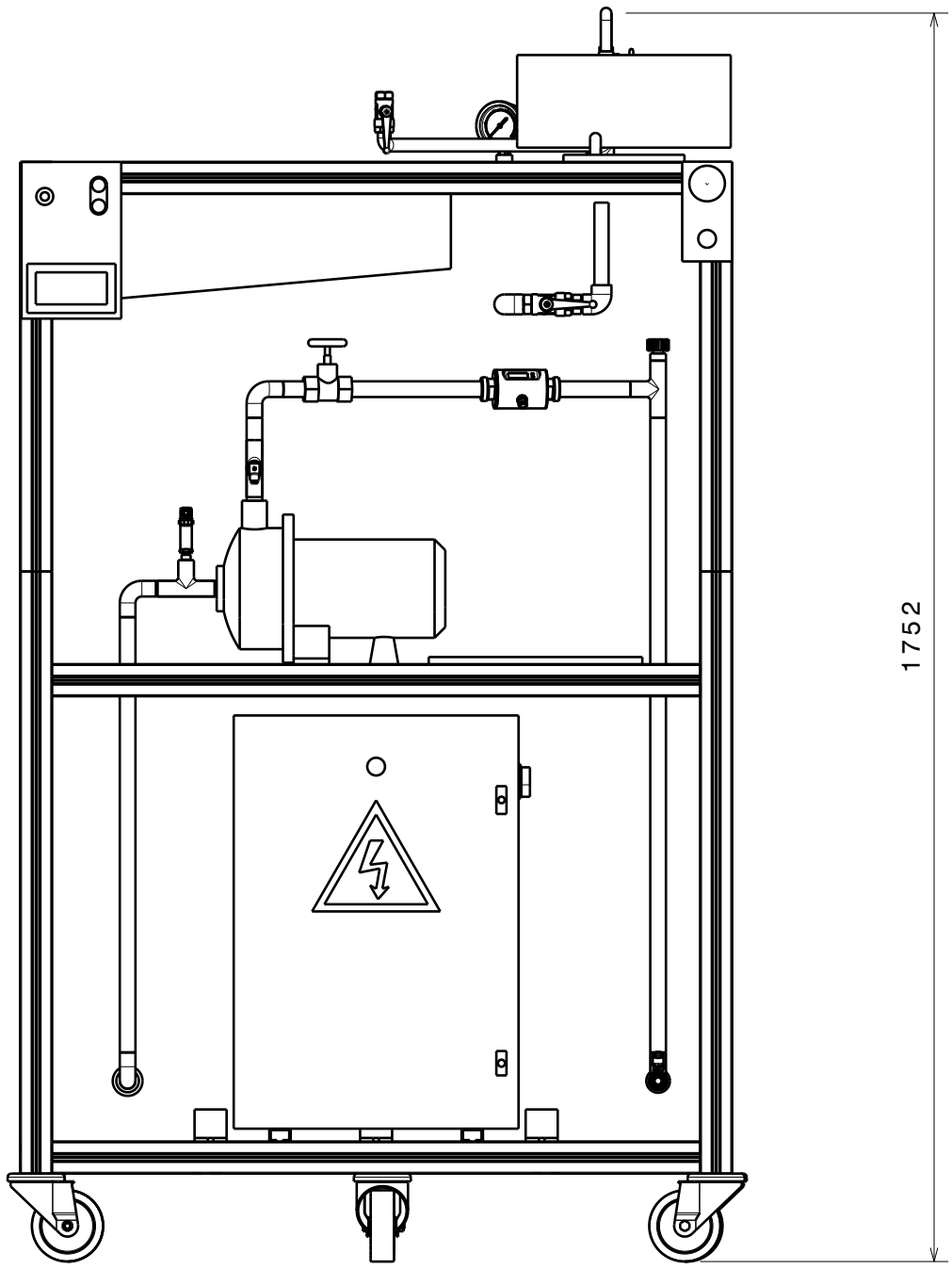
4

3

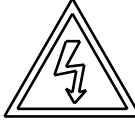
3

2

2



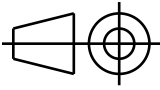
1752



DESIGNED BY:
Pedro Barcina
 DATE:
14/04/2016

CHECKED BY:
 DATE:

SIZE
A4



TFG
Diseño y puesta a punto
práctica de cavitación

Universidad de Valladolid

SCALE
1:10

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER
VISTA FRONTAL

SHEET
9/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D

A

1

1

D

C

B

A

4

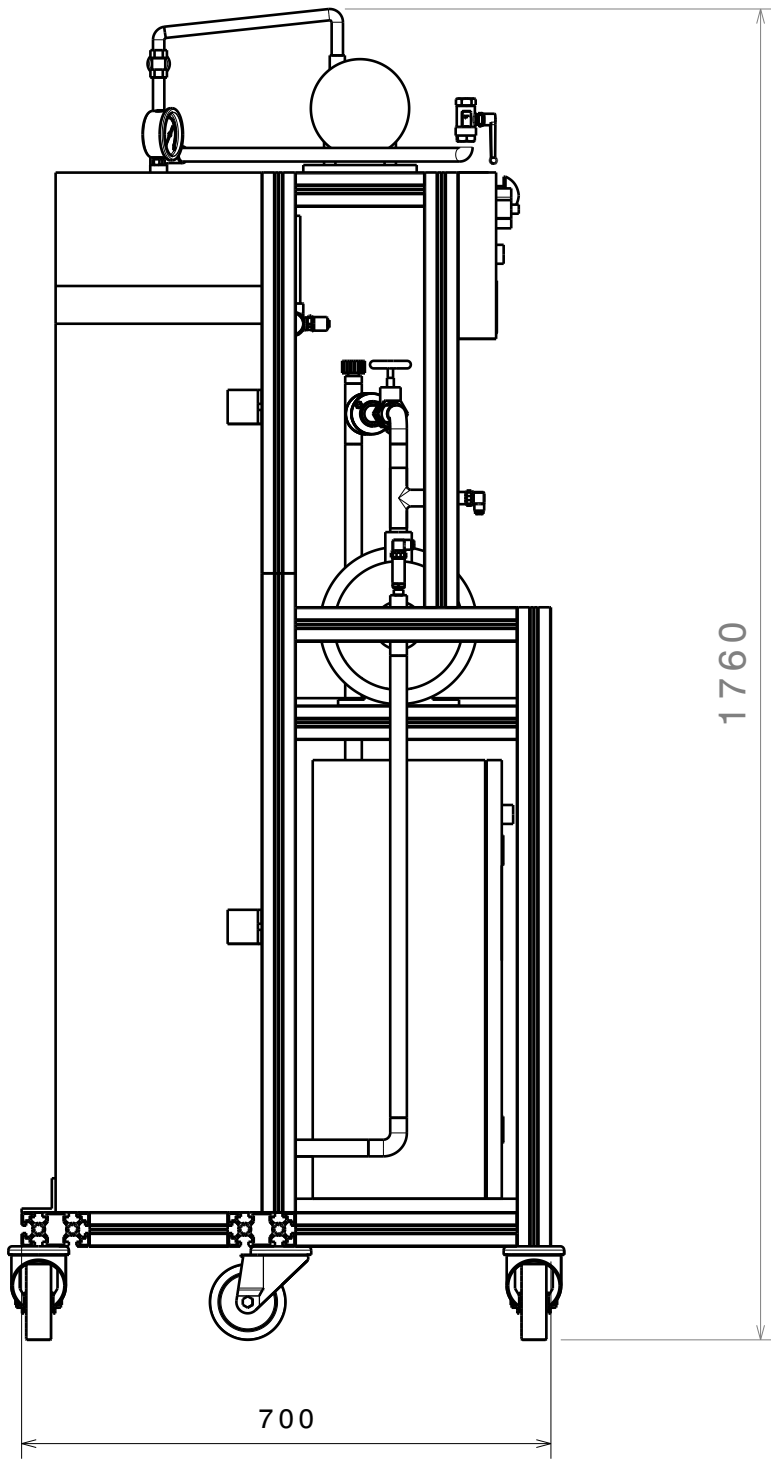
4

3

3

2

2



700

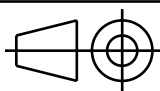
1760

DESIGNED BY:
Pedro Barcina
 DATE:
14/04/2016
 CHECKED BY:
 DATE:

TFG
Diseño y puesta a punto
práctica de cavitación

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

SIZE
A4



Universidad de Valladolid

SCALE
1:10

WEIGHT (kg)
 DRAWING NUMBER
Vista Lateral

SHEET
10/11

D

A

1

1

D

C

B

A

4

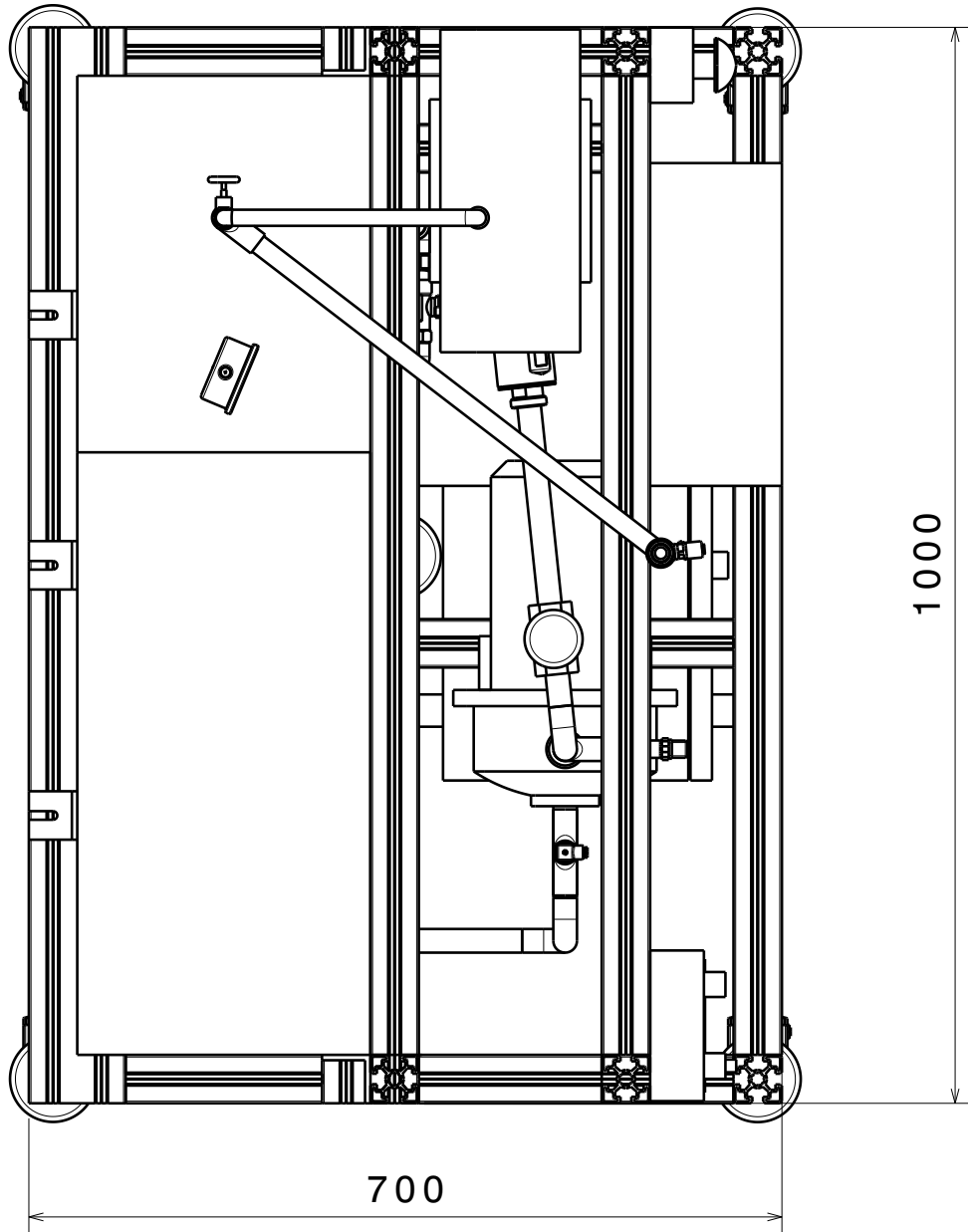
4

3

3

2

2



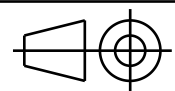
1

1

DESIGNED BY:
Pedro Barcina
 DATE:
16/04/2016

CHECKED BY:
 DATE:

SIZE
A4



TFG
 Diseño y puesta a punto
 práctica de cavitación

Universidad de Valladolid

SCALE
1:7

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER
Planta

SHEET
11/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D

A

Anexo II - Tablas de calibración de elementos de medida

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Caudalímetro

Q1		20l/min	
tiempo	litros	Q_{real}	Q_{caudalímetro}
15,99	5	18,76	19,7
16,9	5	17,75	19,7
14,4	5	20,83	20,2
15,02	5	19,97	20,8
14,5	5	20,68	20,8
Media:		19,56	20,23

Q5		60 l/min	
tiempo	litros	Q_{real}	Q_{caudalímetro}
10,15	10	59,11	60,2
10,19	10	58,88	60,1
11,02	10	54,44	60,2
10,36	10	57,91	60
10,09	10	59,46	60,1
Media:		57,93	60,11

Q2		30 l/min	
tiempo	litros	Q_{real}	Q_{caudalímetro}
9,56	5	31,38	30,3
10,2	5	29,41	30,3
9,85	5	30,45	30,4
11,6	5	25,86	30,5
10,23	5	29,32	30,5
Media:		29,22	30,39

Q6		70 l/min	
tiempo	litros	Q_{real}	Q_{caudalímetro}
12,44	15	72,34	70,6
13,29	15	67,72	70,4
13,51	15	66,61	70,5
12,58	15	71,54	70,6
13,83	15	65,07	70,3
Media:		68,60	70,47

Q3		40 l/min	
tiempo	litros	Q_{real}	Q_{caudalímetro}
7,38	5	40,65	40
7,7	5	38,96	40,1
7,68	5	39,06	40
7,79	5	38,51	39,9
7,16	5	41,89	40
Media:		39,79	39,99

Q7		80 l/min	
tiempo	litros	Q_{real}	Q_{caudalímetro}
14,91	20	80,48	79,9
14,57	20	82,36	80
16,14	20	74,34	79,9
14,91	20	80,48	79,8
16,33	20	73,48	80
Media:		78,14	79,91

Q4		50 l/min	
tiempo	litros	Q_{real}	Q_{caudalímetro}
11,81	10	50,80	49,6
12,92	10	46,43	49,7
12,7	10	47,24	49,6
12,08	10	49,66	50,3
12,4	10	48,38	49,5
Media:		48,48	49,73

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Caudalímetro y medida llevada al display

Q caudalím	Qdisplay
0	-0,25
5	4,88
10	9,88
15	15
21,3	21,63
25,3	25,63

Q caudalím	Qdisplay
30,1	30,63
35,3	35,88
40	40,75
45	45,88
50	51,13
55	56,13

Q caudalím	Qdisplay
60	61,38
65	66,63
70	71,75
75	76,88
80	82
82	84,25

Curva Q-H experimental de la bomba

P (bar)	Hman (m)	Q (l/min)
2,12	20,13	0
2,1	19,93	5
2,08	19,73	10
2,04	19,33	15
2	18,93	20
1,98	18,73	25
1,94	18,33	30
1,9	17,93	35
1,85	17,43	40
1,8	16,93	45
1,75	16,43	50

P (bar)	Hman (m)	Q (l/min)
1,7	15,93	55
1,64	15,33	60
1,6	14,93	65
1,52	14,13	70
1,5	13,93	75
1,4	12,93	80
1,35	12,43	85
1,3	11,93	90
1,22	11,13	95
1,19	10,83	98

Anexo III - Tablas de presión de vapor

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

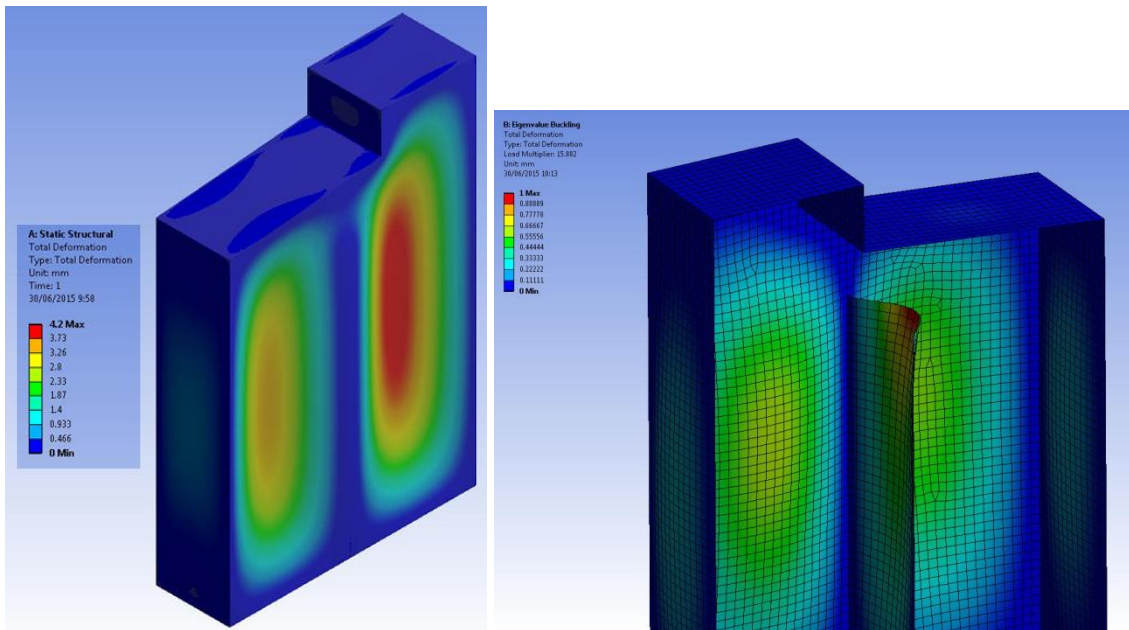
Tabla A.2 Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

Temp. °C	Presión bar	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg · K		Temp. °C
		Líquido sat. v _f × 10 ³	Vapor sat. v _g	Líquido sat. u _f	Vapor sat. u _g	Líquido sat. h _f	Vaporización h _{fg}	Vapor sat. h _g	Líquido sat. s _f	Vapor sat. s _g	
,01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562	,01
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514	4
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257	5
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003	6
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501	8
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008	10
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765	11
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524	12
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285	13
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048	14
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814	15
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582	16
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351	17
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123	18
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897	19
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672	20
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450	21
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229	22
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011	23
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794	24
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580	25
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5367	26
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156	27
28	0,03782	1,0037	36,690	117,42	2413,9	117,43	2435,2	2552,6	0,4093	8,4946	28
29	0,04008	1,0040	34,733	121,60	2415,2	121,61	2432,8	2554,5	0,4231	8,4739	29
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,4533	30
31	0,04496	1,0046	31,165	129,96	2418,0	129,97	2428,1	2558,1	0,4507	8,4329	31
32	0,04759	1,0050	29,540	134,14	2419,3	134,15	2425,7	2559,9	0,4644	8,4127	32
33	0,05034	1,0053	28,011	138,32	2420,7	138,33	2423,4	2561,7	0,4781	8,3927	33
34	0,05324	1,0056	26,571	142,50	2422,0	142,50	2421,0	2563,5	0,4917	8,3728	34
35	0,05628	1,0060	25,216	146,67	2423,4	146,68	2418,6	2565,3	0,5053	8,3531	35
36	0,05947	1,0063	23,940	150,85	2424,7	150,86	2416,2	2567,1	0,5188	8,3336	36
38	0,06632	1,0071	21,602	159,20	2427,4	159,21	2411,5	2570,7	0,5458	8,2950	38
40	0,07384	1,0078	19,523	167,56	2430,1	167,57	2406,7	2574,3	0,5725	8,2570	40
45	0,09593	1,0099	15,258	188,44	2436,8	188,45	2394,8	2583,2	0,6387	8,1648	45

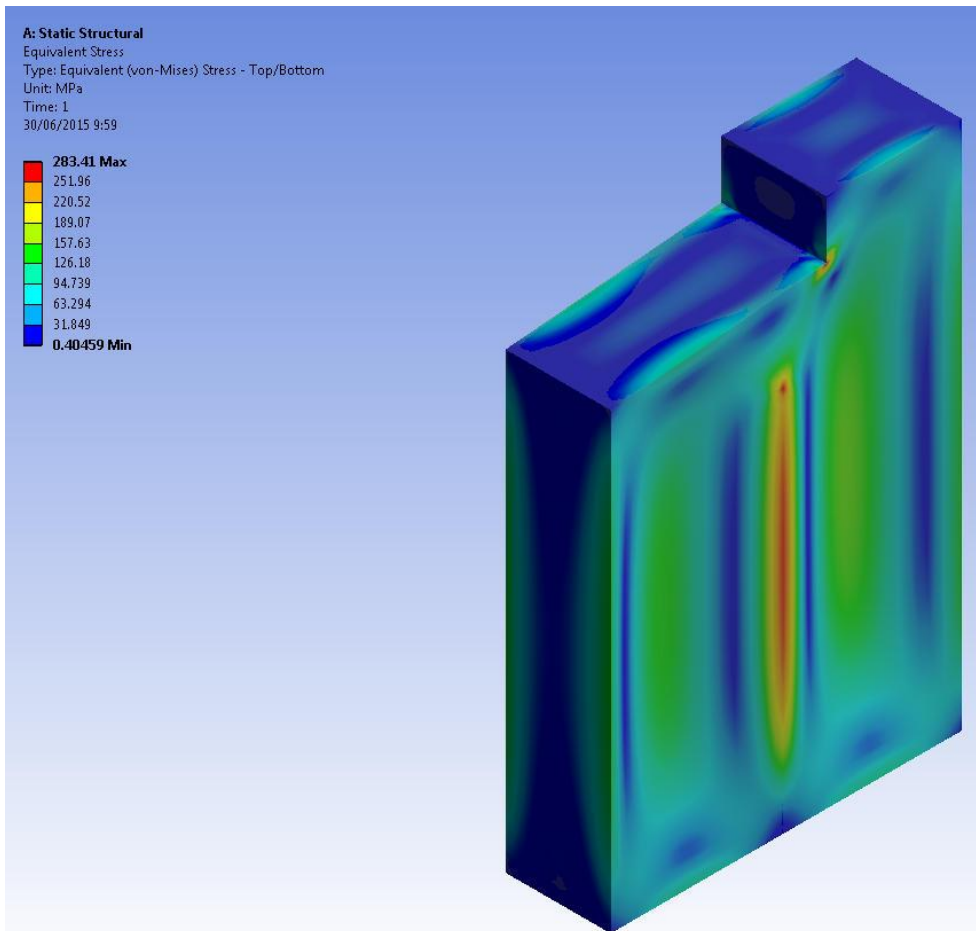
Anexo IV – Gráficos del cálculo plástico del depósito

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Representación de la deformación total en el depósito (exterior e interior)



Representación de la tensión equivalente



Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

Anexo V - Guía técnica del caudalímetro, presostatos, bomba y bomba de vacío.

Diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la determinación de la cavitación en bombas centrífugas.

CDX (L)

SINGLE IMPELLER CENTRIFUGAL ELECTRIC PUMPS

in AISI 304 and AISI 316



Single impeller centrifugal electric pumps with hydraulic parts in AISI 304 and AISI 316 stainless steel.

APPLICATIONS

- Domestic pressure boosting
- Small-scale garden irrigation
- Washing
- Treating water
- Cooling towers
- Moving clean water in general

TECHNICAL DETAILS

- Solid hydraulic structure
- Small dimensions

PUMP TECHNICAL DATA

- Maximum working pressure: 8 bar
 - Maximum temperature of the liquid:
 - 5°C ÷ +60°C for CDX (L) 70/05-70/07-90/10
 - 5°C ÷ +90°C for the rest of CDX range
 - 5°C ÷ +110°C in the H-HS-HW-HSW-E version
 - G1½ suction connection for CDX (L) 200, G1¼ for the rest of the range
 - G1 discharge connection
 - MEI > 0,1
- For further information please see our Data Book on the web site www.ebara.com

MOTOR TECHNICAL DATA

- High efficiency IE2 motors starting from 0,75kW
- Self-ventilated 2 pole asynchronous motor
- Class of insulation F
- IP55 Protection degree
- 230V ±10%, 50Hz single phase voltage
- 230/400V ±10%, 50Hz three phase voltage
- Permanent capacitor inserted and thermo-amperometric protection with automatic restart incorporated for the single phase motor
- Protection under user's responsibility for the three phase version

MATERIALS

AISI 304 version

- Pump casing, impeller, diffuser and casing cover in AISI 304
- Shaft in AISI 303 (part in contact with the liquid)

AISI 316 version

- Pump casing, impeller, diffuser and casing cover in AISI 316
- Shaft in AISI 303 (part in contact with the liquid)

- Bracket and motor frame in aluminium

Mechanical seal in:

- Ceramic/Carbon/NBR (standard)
- Ceramic/Carbon/FPM (H version)
- SiC/SiC/FPM (HS version)
- Tungsten Carbide/Tungsten Carbide/FPM (HW version)
- SiC/Tungsten Carbide/FPM (HSW version)
- Ceramic/Graphite/EPDM (E version)
- Tungsten Carbide/Special Carbon/EPDM (U3CEGG version)

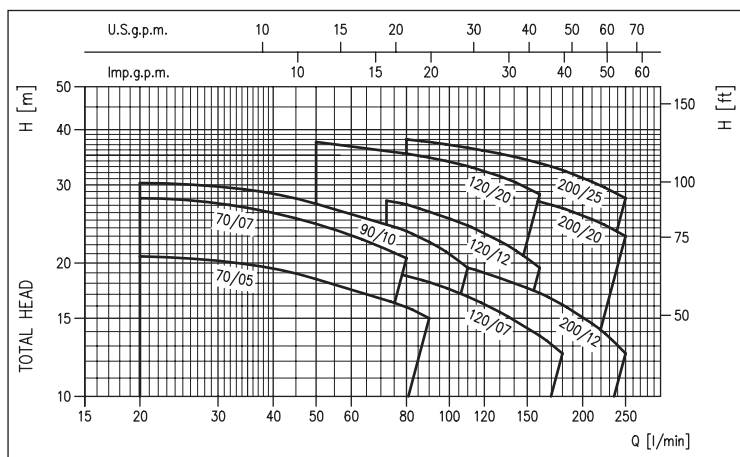
CONTROL PANELS

- 1EP
- 1EPBH

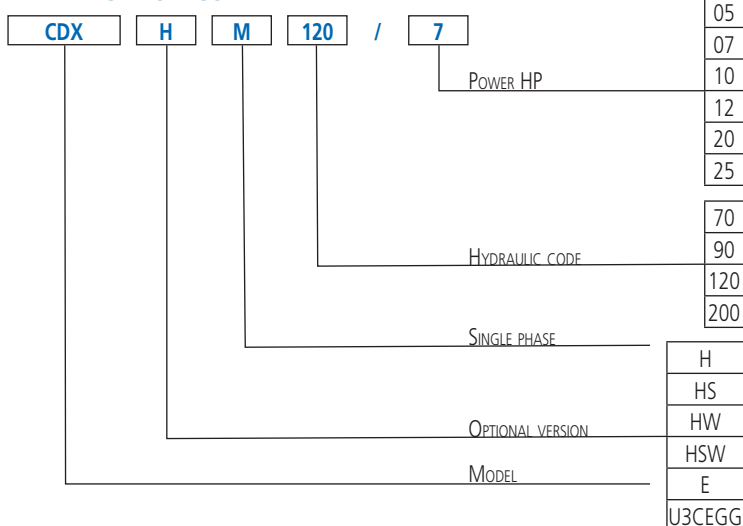
ACCESSORIES (On request)

- 5 litres 10 bar ¾" EPDM vessel
- 24 litres 8 bar 1" EPDM vessel
- 24 litres 10 bar 1" EPDM vessel
- PVC 5m key float with counter-weight
- PVC 10m key float with counter-weight
- SQUARE-D FSG-2 1.4÷4.6 bar G¼ F pressure switch
- FYG-22 2.8÷7 bar G¼ F pressure switch
- Presscomfort - Pressure regulator

PERFORMANCE RANGE (according to ISO 9906 Attachment A)

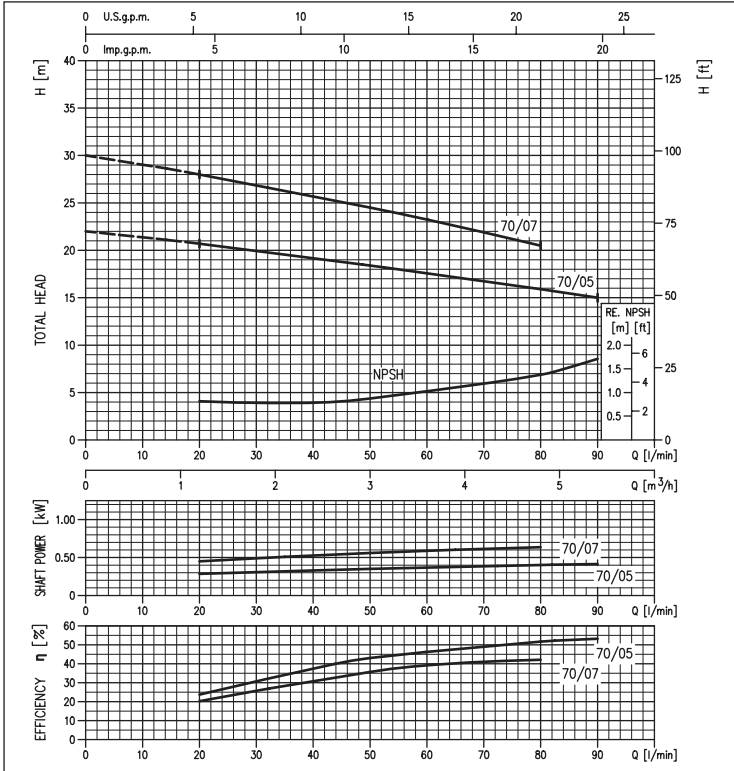


IDENTIFICATION CODE

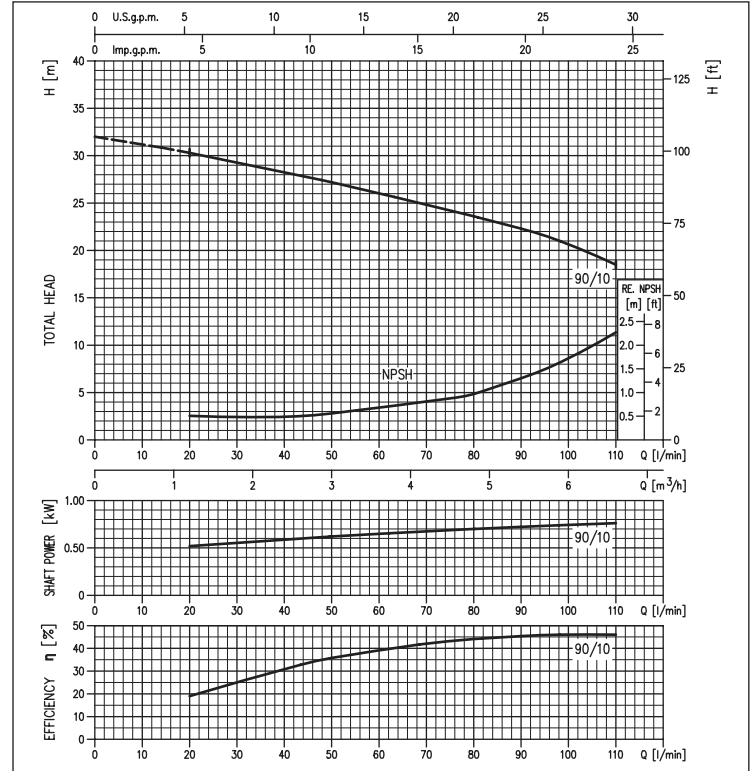


SINGLE IMPELLER CENTRIFUGAL ELECTRIC PUMPS in AISI 304

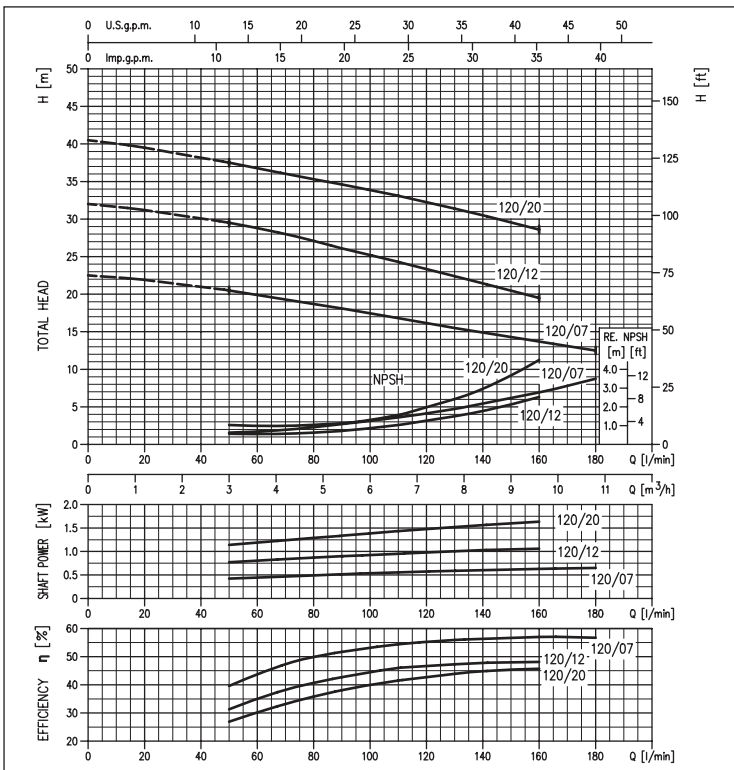
PERFORMANCE CURVES CDX 70 series
(according to ISO 9906 Attachment A)



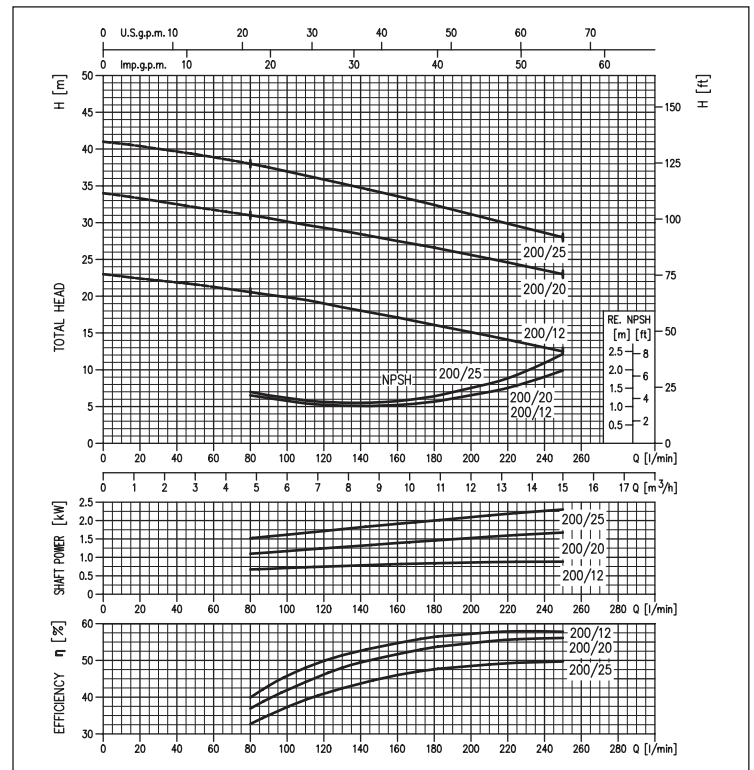
PERFORMANCE CURVES CDX 90 series
(according to ISO 9906 Attachment A)



PERFORMANCE CURVES CDX 120 series
(according to ISO 9906 Attachment A)



PERFORMANCE CURVES CDX 200 series
(according to ISO 9906 Attachment A)



The contents of this publication must not be regarded as binding. EBARA Pumps Europe S.p.A. reserves the right to effect any modification it deems necessary, without prior notice.

CDX (L)

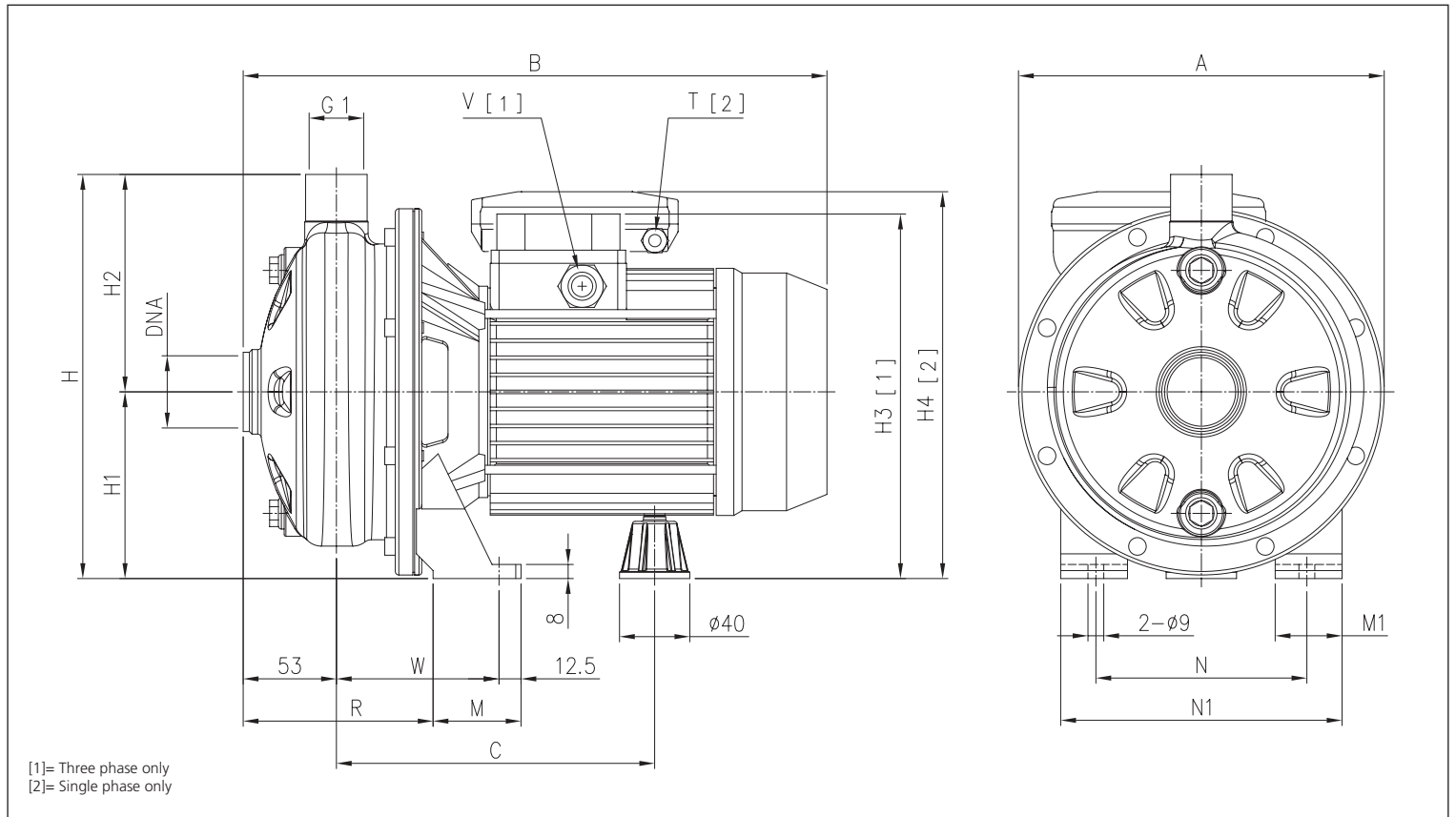
SINGLE IMPELLER CENTRIFUGAL ELECTRIC PUMPS

in AISI 304

PERFORMANCE TABLE

Model		P ₂		Q=Flow rate										
Single phase 230V	Three phase 230/400V	[HP]	[kW]	l/min	20	50	80	90	110	130	160	180	210	250
				m ³ /h	1,2	3	4,8	5,4	6,6	7,8	9,6	10,8	12,6	15,0
				H=Head [m]										
CDXM 70/05	CDX 70/05	0,5	0,37	20,7	18,4	15,9	15,0	-	-	-	-	-	-	-
CDXM 70/07	CDX 70/07	0,8	0,55	28,0	24,5	20,5	-	-	-	-	-	-	-	-
CDXM 90/10	CDX 90/10	1	0,75	30,3	27,2	23,6	22,3	19,5	-	-	-	-	-	-
CDXM 120/07	CDX 120/07	0,8	0,55	-	20,5	18,7	18,1	16,8	15,5	13,7	12,5	-	-	-
CDXM 120/12	CDX 120/12	1,2	0,9	-	29,5	27,1	26,1	24,3	22,4	19,5	-	-	-	-
CDXM 120/20	CDX 120/20	2	1,5	-	37,5	35,3	34,6	33,1	31,4	28,6	-	-	-	-
CDXM 200/12	CDX 200/12	1,2	0,9	-	-	20,7	20,2	19,5	18,5	17,1	16,1	14,6	12,5	-
CDXM 200/20	CDX 200/20	2	1,5	-	-	31,0	30,6	29,7	28,9	27,5	26,6	25,1	23,0	-
-	CDX 200/25	2,5	1,8	-	-	38,0	37,5	36,4	35,3	33,6	32,4	30,5	28,0	-

DIMENSIONS

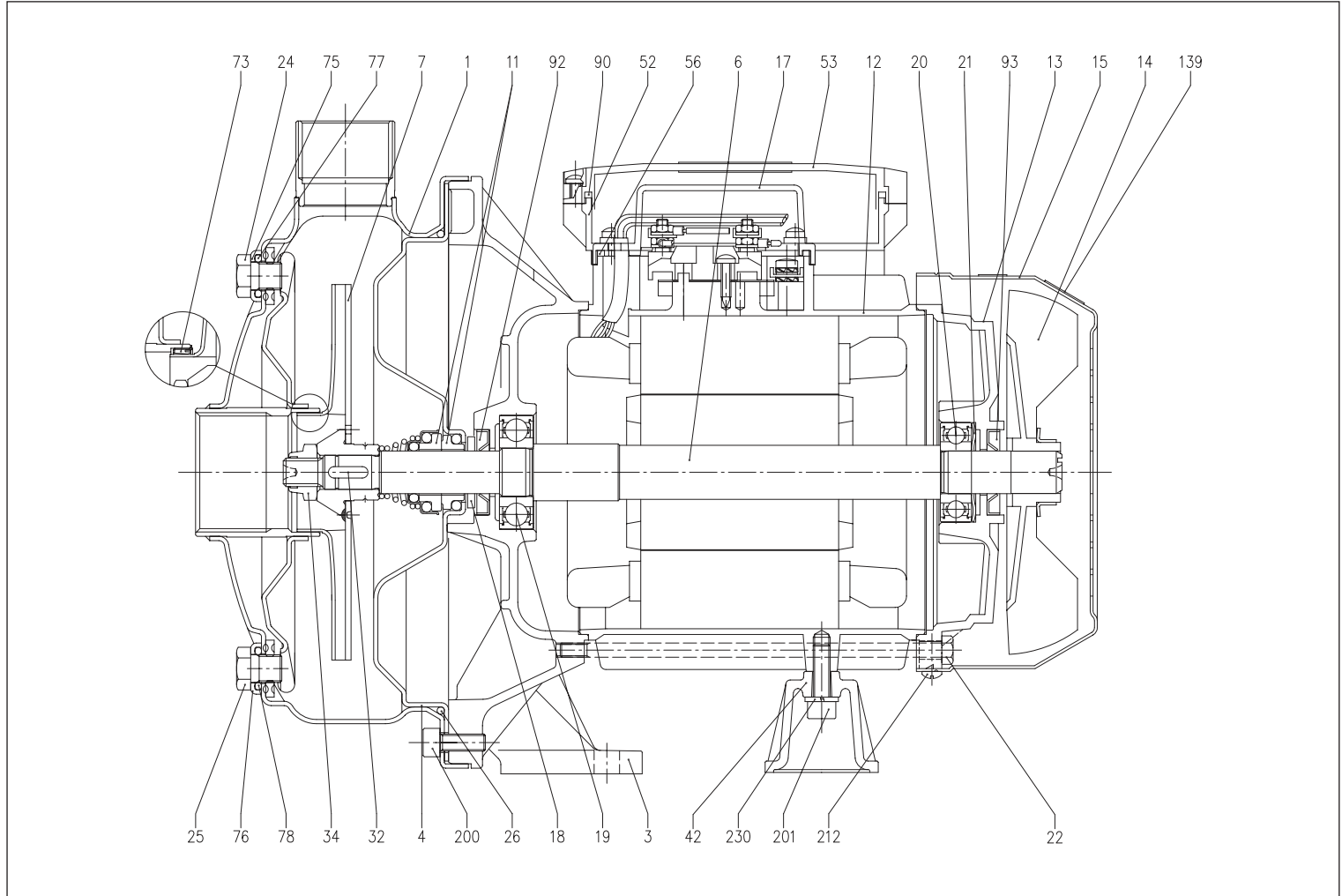


DIMENSIONAL TABLE

Model	Dimensions [mm]																Weight [kg]			
	A	B [2]	B [1]	C	H	H1	H2	H3 [1]	H4 [2]	M	M1	N	N1	R	T [2]	V [1]	W	DNA	[2]	[1]
CDX(M) 70/05	208	321	320	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG11	PG11	92,5	G1 ¼	8,3	8,3
CDX(M) 70/07	208	321	320	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG11	PG11	92,5	G1 ¼	9,8	9,7
CDX(M) 90/10	208	321	320	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG11	PG11	92,5	G1 ¼	11,0	11,0
CDX(M) 120/07	208	321	320	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG11	PG11	92,5	G1 ¼	9,6	9,5
CDX(M) 120/12	208	321	332	181	229,5	106	123,5	207	235	50	38	120	160	108	PG11	PG11	92,5	G1 ¼	11,8	12,4
CDX(M) 120/20	232	346,5	359	198,5	250	118	132	237	248,5	55	40	140	180	105,5	PG13,5	PG11	95	G1 ¼	16,5	17,2
CDX(M) 200/12	208	321	332	181	229,5	106	123,5	207	235	50	38	120	160	108	PG13,5	PG11	92,5	G1 ½	11,4	12,2
CDX(M) 200/20	208	346,5	359	198,5	229,5	106	123,5	225	236,5	55	40	140	180	105,5	PG13,5	PG11	95	G1 ½	15,3	16,1
CDX 200/25	232	-	359	198,5	250	118	132	237	-	55	40	140	180	105,5	-	PG11	95	G1 ½	-	15,9

[1]= Three phase only
[2]= Single phase only

SECTIONAL VIEW



MATERIALS TABLE

Ref.	Name	Materials	Ref.	Name	Materials
1	Pump casing	EN 1.4301 (AISI 304)/AISI 316	25	Plug	AISI 303/AISI 316
3	Motor bracket	Aluminium	26	O-Ring [3]	NBR
4	Casing cover	EN 1.4301 (AISI 304)/AISI 316	32	Key	AISI 316
6	Shaft	AISI 303 Part in contact with the liquid	34	Impeller nut	EN 1.4301 (AISI 304)/AISI 316
7	Impeller	EN 1.4301 (AISI 304)/AISI 316	42	Motor support	Aluminium
11	Mechanical seal [3]	Ceramic/Carbon/NBR	52	Terminal box [2]	ABS
12	Motor frame	-	53	Terminal box cover [2]	ABS
13	Motor cover	Aluminium	56	Terminal box cover gasket	NBR
14	Fan	PA	73	Casing ring [4]	EN 1.4301 (AISI 304)
15	Fan cover	Galvanised Fe P04	75	Washer	EN 1.4301 (AISI 304)/AISI 316
16	Terminal box	-	76	Washer	EN 1.4301 (AISI 304)/AISI 316
17	Terminal box cover [1]	Aluminium	77	O-Ring [3]	NBR
18	Splash ring	NBR	78	O-Ring [3]	NBR
19	Bearing (pump side)	-	90	Gasket [2]	NBR
20	Bearing (motor side)	-	92	Seal ring	-
21	Adjusting ring	Steel C70	93	Seal ring	-
22	Tie-rod	Galvanised Fe 42	110	Motorprotector [2]	-
23	Capacitor [2]	-	200	Screw (pump body)	Stainless steel A2 UNI7323
24	Plug	AISI 303/AISI 316			

[1]= Three phase only [2]= Single phase only

[3]= FPM for CDXH, CDXHS, CDXHW, CDXHSW, EPDM for CDE

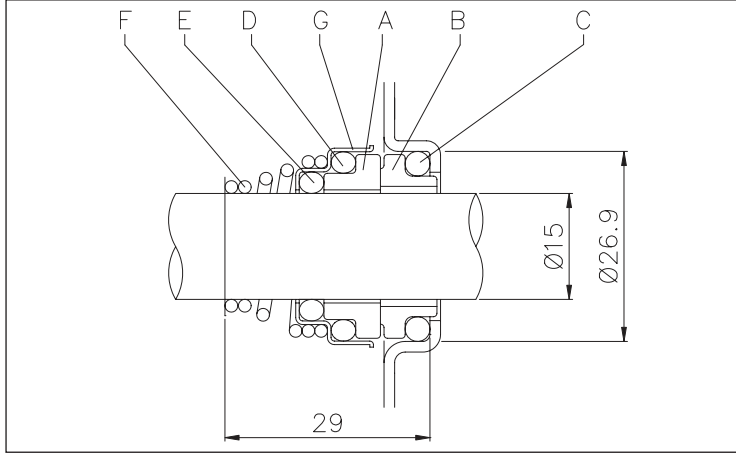
[4]= NBR for CDX 70/05, 70/07, 90/10, FPM for CDX H-HS-HW-HSW 70/05, 70/07, 90/10

CDX (L)

SINGLE IMPELLER CENTRIFUGAL ELECTRIC PUMPS

in AISI 304

MECHANICAL SEAL standard



MATERIALS TABLE

Ref.	Name	Materials
A	Rotating part	Ceramic
B	Fixed part	Carbon
C	O-Ring	NBR
D	O-Ring	NBR
E	O-Ring	NBR
F	Spring	AISI 316
G	Structure/frame	AISI 304

SPECIAL MECHANICAL SEALS (on request)

Ref.	Name	Materials					
		H version	HS version	HW version	HSW version	E version	U3CEGG version
A	Rotating part	Ceramic	SiC	Tungsten Carbide	SiC	Ceramic	Tungsten Carbide
B	Fixed part	Carbon	SiC	Tungsten Carbide	Tungsten Carbide	Carbon	Special Carbon
C	O-Ring	FPM	FPM	FPM	FPM	EPDM	EPDM
D	O-Ring	FPM	FPM	FPM	FPM	EPDM	EPDM
E	O-Ring	FPM	FPM	FPM	FPM	EPDM	EPDM
F	Spring	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316
G	Structure/frame	AISI 304	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316	AISI 316

ELECTRIC DATA TABLE

Model	Single phase 230V	Three phase 230/400V	P ₁		Efficiency		Capacitor		Efficiency (%)			P ₂		Absorbed Current [A]		
			[HP]	[kW]	Single phase	Three phase	Single phase µF	Three phase V	50%	75%	100%	Single phase [kW]	Three phase [kW]	Single phase 230V	Three phase 230V	Three phase 400V
CDXM 70/05	CDX 70/05	CDX 70/05	0,5	0,37	-	-	12,5	450	-	-	-	0,75	0,68	3,4	2,4	1,4
CDXM 70/07	CDX 70/07	CDX 70/07	0,75	0,55	-	-	16	450	-	-	-	1,1	1,0	5,0	3,5	2,0
CDXM 90/10	CDX 90/10	CDX 90/10	1	0,75	-	IE2	20	450	77,2	80,9	81,3	1,2	1,05	5,6	3,3	1,9
CDXM 120/07	CDX 120/07	CDX 120/07	0,75	0,55	-	IE2	16	450	-	-	-	1,0	1,0	4,6	3,2	1,85
CDXM 120/12	CDX 120/12	CDX 120/12	1,2	0,9	-	IE2	31,5	450	79,0	81,7	81,6	1,6	1,45	6,9	4,5	2,6
CDXM 120/20	CDX 120/20	CDX 120/20	2	1,5	-	IE2	40	450	80,3	83,4	83,8	2,1	2,09	9,3	7,0	4,0
CDXM 200/12	CDX 200/12	CDX 200/12	1,2	0,9	-	IE2	31,5	450	79,0	81,7	81,6	1,4	1,35	6,3	4,3	2,5
CDXM 200/20	CDX 200/20	CDX 200/20	2	1,5	-	IE2	40	450	80,3	83,4	83,8	2,3	2,22	10,2	7,4	4,3
-	CDX 200/25	CDX 200/25	2,5	1,8	-	IE2	-	-	83,0	84,4	83,8	-	2,87	-	8,7	5,0

NOISE DATA TABLE

Model	Single phase 230V	Three phase 230/400V	P ₂		L _{pa} - dB(A)*
			[HP]	[kW]	
CDXM 70/05	CDX 70/05	CDX 70/05	0,5	0,37	61
CDXM 70/07	CDX 70/07	CDX 70/07	0,75	0,55	62
CDXM 90/10	CDX 90/10	CDX 90/10	1	0,75	62
CDXM 120/07	CDX 120/07	CDX 120/07	0,75	0,55	62
CDXM 120/12	CDX 120/12	CDX 120/12	1,2	0,9	
CDXM 120/20	CDX 120/20	CDX 120/20	2	1,5	64
CDXM 200/12	CDX 200/12	CDX 200/12	1,2	0,9	62
CDXM 200/20	CDX 200/20	CDX 200/20	2	1,5	64
-	CDX 200/25	CDX 200/25	2,5	1,8	65

* Mean value of several measures at 1m distance around the pump.
Tolerance ± 2.5 dB.

**P2
DIP
MV
RB**

Pompe per alto vuoto
Istruzioni d'uso e manutenzione

High vacuum pumps
User and service manual

Hochvakuumpumpen
Betriebs- und Wartungsanleitung

Pompes à haut vide
Mode d'emploi et maintenance

Bombas de alto vacío
Instrucciones de uso y mantenimiento

Bomba de alto vácuo
Instruções de uso e manutenção



Numero di serie
Serial number
Seriennummer
Número de série
Número de serie



Sistemi e strumenti per condizionamento e refrigerazione
Air conditioning and refrigeration systems and instruments
Anlagen und Geräte für Klima- und Kälteanlagen
Systèmes et instruments pour conditionnement et réfrigération
Sistemas e instrumentos para el acondicionamiento y refrigeración
Sistemas e instrumentos para ar-condicionado e refrigeração

Indice

1. Introducción a las bombas de alto vacío WIGAM	31
1.1 Características generales.....	31
1.2 La válvula de contrapeso	31
2. Instalación.....	31
2.1 Carga de aceite.....	31
2.2 Conexiones de la aspiración	31
2.3 Descarga de vapores	31
2.4 Conexión eléctrica.....	32
2.5 Precauciones generales.....	32
3. Uso de la bomba.....	32
3.1 Puesta en marcha	32
3.2 Paro de la bomba.....	32
4. Mantenimiento ordinario	32
4.1 Lubricación.....	32
4.2 Sustitución del aceite	33
5. Mantenimiento extraordinario.....	33
Piezas de ricambio	41
P2S	42
DIP401	42
P2D	43
DIP402	43
MV6/2.....	44
MV12/2	44
RV25B	45

ESPAÑOL



ATENCIÓN

Normas de seguridad

- a) este aparato está destinado exclusivamente para operarios profesionalmente preparados que han de conocer los fundamentos de la refrigeración, los sistemas frigoríficos, los gases refrigerantes y los posibles daños que pueden provocar los aparatos bajo presión
- b) leer atentamente el presente manual, el seguimiento riguroso de los pasos aquí indicados es condición indispensable para la seguridad del usuario y la integridad de la maquinaria, así como para el mantenimiento de las prestaciones declaradas
- c) utilizar las correspondientes protecciones, como gafas y guantes; el contacto con el refrigerante puede provocar ceguera y otros daños físicos al usuario
- d) trabaje a distancia de las flamas libres y superficies calientes; a altas temperaturas, el gas refrigerante se decompone, liberando sustancias tóxicas y agresivas, dañinas para el usuario y para el ambiente
- e) evite el contacto con la piel; la baja temperatura de ebullición del refrigerante (unos -40°C), puede provocar congelaciones
- f) evite la inhalación de los vapores del gas refrigerante
- g) compruebe siempre que la bomba se halla conectada a una red eléctrica de alimentación con la línea de tierra
- h) aunque la temperatura de la bomba no alcanza nunca valores elevados, asegúrese de que, durante el funcionamiento, la bomba se halla en una posición que no cause daños como pequeños quemazos a personas
- i) el enfriamiento del motor de la bomba se produce mediante circulación forzada del aire; por tanto, la bomba ha de funcionar en un ambiente suficientemente aireado
- j) antes de desconectar la bomba, verificar que el ciclo ha sido completado y que todas las válvulas están cerradas, se evitará de esta forma dispensar el refrigerante en la atmósfera
- k) no llenar los envases con refrigerante líquido más allá del 75% de su capacidad máxima
- l) desconectar la bomba de la alimentación eléctrica de la red si no se tiene previsto un uso inmediato de la misma
- m) durante el funcionamiento evitar pérdidas de refrigerante en la atmósfera. La presencia de refrigerante en el ambiente en que se trabaja hace particularmente difícil la localización de posibles pérdidas en el circuito frigorífico.

1. Introducción a las bombas de alto vacío WIGAM

Las bombas para alto vacío WIGAM son bombas rotativas con paletas lubricadas por inyección de aceite, de efecto simple y doble, con válvula de contrapeso para la eliminación de los gases condensables residuales. Cada efecto posee un rotor de paletas ensamblado en el eje del motor eléctrico sin interposición de juntas; en las bombas de doble efecto, los dos rotores se hallan conectados entre ellos en serie para garantizar el mejor grado de vacío posible.

1.1 Características generales

Modelo de la bomba		P2S	DIP401	P2D	DIP402	MV6/2	MV12/2	RV25B
Caudal nominal	l/min	42	80	42	80	150	230	440
Vacío final	mbar	6x10 ⁻²	6x10 ⁻²	1x10 ⁻²	1x10 ⁻²	1x10 ⁻²	1x10 ⁻²	1x10 ⁻⁴
Potencia instalada	W	120	180	120	240	300	550	550
Velocidad de rotación	r.p.m.	2.800	2800	2.800	2800	1.450	1.450	1.450
Carga de aceite	cc	500	210	400	300	400	700	1.000
Temperatura trabajo	°C	0/+40	0/+40	0/+40	0/+40	0/+40	0/+40	0/+40
Temperatura almacenamiento	°C	-25/+50	-25/+50	-25/+50	-25/+50	-25/+50	-25/+50	-25/+50
Peso	kg	6,5	7,2	6,7	8,2	15,10	18,00	29,50
Características eléctricas*		230/1/50	230/1/50	230/1/50	230/1/50	230/1/50	230/1/50	**

* Otros voltajes y frecuencias bajo pedido

** Voltajes y frecuencias standard 230/1/50 y 380/3/50

1.2 La válvula de contrapeso

Todas las bombas WIGAM poseen una válvula de contrapeso (*) (excepto el modelo P25) que se abre 3 minutos durante la primera fase del vacío; dicho dispositivo, además de prevenir la condensación de vapores contaminantes en el lubricante, favorece el arranque de la bomba en frío .

2. Instalación

La bomba se suministra sin carga lubricante; antes de ponerla en funcionamiento hay que efectuar la carga de aceite en la cantidad exacta sugerida por el constructor.

2.1 Carga de aceite

Todas las operaciones de carga de aceite y de control del nivel se realizan con la bomba parada.

La bomba se suministra sin lubricante; por lo tanto, antes de ponerla en funcionamiento, hay que introducir en el cárter de la bomba aceite en la cantidad y tipo sugerido por el constructor; el uso de lubricantes distintos puede disminuir las prestaciones y causar daños irreversibles a las piezas mecánicas.

Se suministra con la bomba un envase de 500cc (dos envases para el modelo MV12/2 y RV25B) de aceite mineral.

Para efectuar la carga de aceite siga el procedimiento que describimos a continuación:

- desenrosque el tapón del aceite situado en la parte superior de la bomba
- vierta lentamente el aceite hasta que el nivel alcance la mitad del visor situada a un lado de la bomba
- enrosque el tapón del aceite

Para evitar un lleno excesivo, sugerimos en primer lugar que vierta el aceite en un recipiente graduado para poder comprobar con exactitud la cantidad; en caso de haber llenado en exceso, hay que vaciar la bomba y repetir las operaciones de carga.

⚠ ATENCIÓN

El lubricante utilizado no ha de ser vertido en el ambiente; es un deshecho especial y como tal ha de ser eliminado siguiendo las normas en vigor.

2.2 Conexiones de la aspiración

Para reducir el tiempo de vaciado, hay que reducir en la medida de lo posible la longitud del tubo de aspiración, aumentar su diámetro interno y mantener su recorrido lo más rectilíneo posible.

Bajo pedido, el racor de aspiración puede contar con válvula electromagnética (standard para la bomba modelo MV12/2 y RV25B) para evitar el reflujó de lubricante desde la bomba al circuito evacuado en caso de que se produjera una repentina interrupción de la alimentación eléctrica.

2.3 Descarga de vapores

La bomba puede funcionar sin racor alguno de descarga; en el caso de que tuvieran que vaciarse circuitos de gran volumen interno, o si los arranques y paros de la bomba fueran muy frecuentes, aconsejamos instalar en el lugar del tapón suministrado un filtro desaceitador realizado expresamente con un recipiente para la recogida de aceite.

⚠ ATENCIÓN

Deje siempre libre el desagüe de la bomba; si se tapase provocaría peligrosas subidas de presión en el interior del cárter.

2.4 Conexión eléctrica

Compruebe que las características de la red eléctrica de alimentación son compatibles con las indicadas en la etiqueta de la bomba.

En el caso de una bomba con motor eléctrico trifásico, compruebe que el sentido de rotación sea el horario, observando el ventilador de enfriamiento del motor.

La bobina eléctrica del motor de la bomba cuenta con protector térmico de rearme automático que interrumpe la alimentación eléctrica al alcanzar una temperatura de +130°C.

2.5 Precauciones generales

Compruebe siempre que la bomba se halla conectada a una red eléctrica de alimentación que cuente con una eficaz línea de masa a tierra.

Aunque la temperatura no alcance nunca valores elevados, asegúrese de que, durante el funcionamiento, la bomba se encuentra en una posición que no cause daños, como pequeños quemazos a personas.

En caso de que la bomba se instale sobre otras estructuras o instalaciones, el instalador ha de encargarse de comprobar que la sujeción resulte segura y que no sea fuente de peligros para el usuario.

El enfriamiento del motor de la bomba se realiza por circulación forzada de aire; la bomba ha de funcionar en un ambiente suficientemente aireado y cualquier pared u obstáculo ha de quedar al menos a 4 cm de la tapa del ventilador.

3. Uso de la bomba

Para garantizar eficacia y un elevado nivel cualitativo, cada bomba es sometida a escrupulosas pruebas y es sometida al adecuado rodaje preliminar.

La constancia en las prestaciones de la bomba y su larga vida de trabajo quedan garantizadas si se siguen escrupulosamente los siguientes procedimientos.

3.1 Puesta en marcha

En la primera puesta en marcha es indispensable:

- cargar la bomba de aceite lubricante (ver "2.1 Carga de aceite")
- hacer funcionar la bomba durante algunos minutos con la junta de aspiración cerrada

Para las puestas en marcha siguientes, será suficiente controlar el nivel de aceite.

En caso de irregularidades, pare la bomba y diríjase a su Servicio de Asistencia Técnica.

3.2 Paro de la bomba

Es una operación que requiere como única precaución la de cerrar el conducto de aspiración antes de parar la bomba (solo para las bombas sin solenoide).

Todo esto se hace con el fin de evitar que, al parar la bomba, la presión atmosférica existente en la junta de descarga empuje el aceite lubricante desde la bomba al exterior del circuito evacuado.

La mezcla entre aceites no compatibles (aceite de la bomba y aceite del compresor frigorífico) perjudicaría el buen funcionamiento del compresor.

En caso de frecuentes ciclos del tipo marcha-paro, aconsejamos no detener la bomba; en vez de ello cierre el grifo situado en el extremo del tubo de aspiración; de este modo es posible desconectarlo del circuito evacuado dejando la bomba en funcionamiento.

Antes de parar la bomba, déjela funcionar durante algunos minutos con la aspiración cerrada y la válvula de contrapeso abierta; desaparecerán los restos de humedad y de refrigerante que eventualmente se encuentren en solución con el aceite de la bomba.

4. Mantenimiento ordinario

El metódico y correcto mantenimiento de la bomba de alto vacío garantiza para ella una larga vida de trabajo y que las prestaciones declaradas se mantendrán constantes.

4.1 Lubricación

El lubricante suministrado ha sido particularmente realizado para la lubricación de las bombas de alto vacío; se caracteriza por una variación mínima de su viscosidad en un campo de temperatura de +10°C a +100°C.

El tipo de lubricante suministrado con la bomba permite realizar las operaciones de vaciado de circuitos frigoríficos con refrigerante CFC o HCFC (R12, R22, R502, etc.); en el caso de vaciar circuitos que funcionan con refrigerante HFC (R134a, R404a, etc.), aconsejamos cargar la bomba con lubricante sintético, disponible por separado bajo pedido.

P.S. Las bombas con solenoide permiten el uso de aceite mineral para cualquier tipo de refrigerante.

La cantidad de aceite necesaria para los distintos modelos de bomba se indica en el párrafo "1.1 Características generales".

La primera carga de aceite ha de sustituirse tras unas 150-200 horas de funcionamiento; los cambios siguientes se efectuarán cada 400-500 horas o bien cada 3-4 meses.

Aceites lubricantes - tipos y envases disponibles para el mantenimiento periódico	
Aceite mineral	Aceite sintético a base de ésteres de poliaceite POE
Modelo: K1-L	Modelo: SW68
Código: 12002003	Código: 12002004
Viscosidad: ISO68	Viscosidad: ISO68
Envase: 1.000cc	Envase: 1.000cc

4.2 Sustitución del aceite

Sustituy el aceite lubricante de la bomba periódicamente o en cuanto el contenido de contaminantes lo vuelva turbio; el aceite contaminado, además de impedir que la bomba alcance valores aceptables de vacío, daña de modo irreversible las piezas mecánicas.

Todas las operaciones de vacío y su consiguiente recarga se realizan con la bomba parada.

Para realizar la sustitución del aceite siga el siguiente procedimiento:

- a) desenrosque el tapón de desagüe situado en la parte inferior de la bomba
- b) deje que salga completamente el aceite
- c) enrosque bien el tapón de desagüe
- d) efectúe la carga de aceite (ver "2.1 Carga de aceite")

⚠ ATENCIÓN

El lubricante utilizado no ha de ser vertido en el ambiente; es un deshecho especial y como tal ha de ser eliminado siguiendo las normas en vigor.

5. Mantenimiento extraordinario

Habrà de realizarse intervenciones de mantenimiento extraordinario siempre que se produzcan graves anomalías, como recalentamientos de la bomba, un inaceptable grado de vacío, ruido persistente, bloqueo de la bomba y cualquier otro fenómeno ajeno al funcionamiento regular de la bomba.

En dichas situaciones hay que desmontar la bomba, lavar con cuidado sus piezas y si fuera el caso reparar o sustituir las dañadas.

La intervención sobre la bomba ha de ser realizada por personal cualificado, siguiendo los procedimientos anteriormente descritos y tomando como referencia los dibujos que constan en el apéndice para la identificación de las piezas; sólo de este modo será posible identificar exactamente la pieza que ha de pedirse como recambio y su correcta colocación.

En todo caso póngase en contacto con nuestro Servicio de Asistencia si fuera necesario.

(*) Ver listado recambios al final del manual:

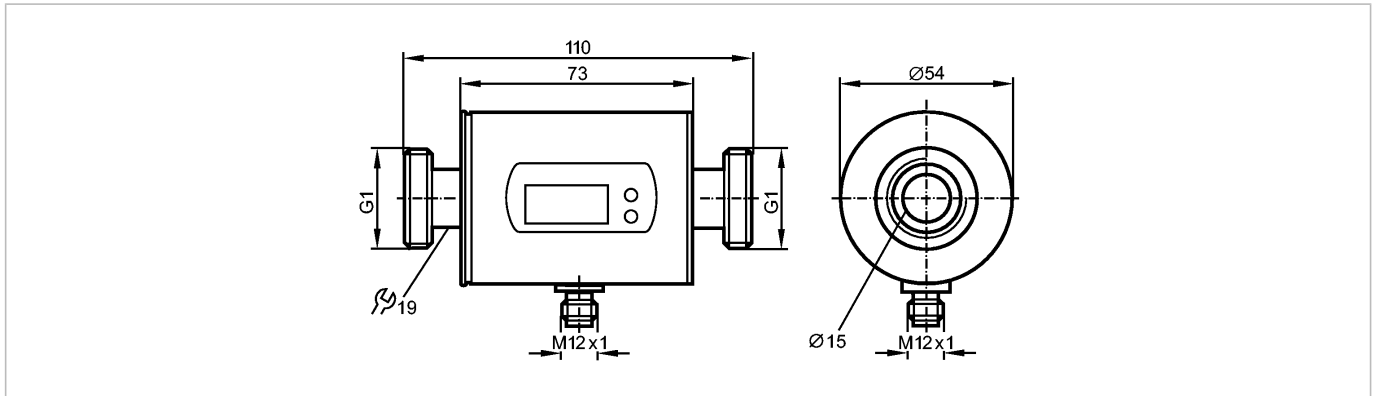
P2D:	Ref. 62
DIP401:	Ref. 34
DIP402:	Ref. 34
MV6/2:	Ref. 16
MV12/2:	Ref. 28
RV25B:	Ref. 51

ESPAÑOL

SM8000

SMR11GGXFRKG/US-100

Sensores de caudal



Características del producto

Caudalímetro magneto-inductivo
Conexión por conector
Conexión de proceso: G1 con junta plana
Conexión a la tubería mediante adaptador
Función programable
Función totalizador
2 salidas
OUT1 = Control de caudal (binario), contador volumétrico de caudal (impulsos), contador de preselección (binario)
OUT2 = Control de caudal o de temperatura (analógico o binario)
Entrada para reseteo del contador
Rango de medición
0,2...100 l/min

Aplicación

Aplicación	Fluidos líquidos conductores (Conductividad: $\geq 20 \mu\text{S/cm}$ / Viscosidad: $< 70 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 40°C)
Resistencia a la presión [bar]	16
Temperatura del fluido [°C]	-10...70

Datos eléctricos

Alimentación	DC PNP/NPN
Tensión de alimentación [V]	19...30 DC ¹⁾
Consumo [mA]	120
Resistencia de aislamiento [MΩ]	> 100 (500 V DC)
Clase de protección	III
Protección contra inversiones de polaridad	sí

Salidas

Función de salida	OUT1: normalmente abierto / normalmente cerrado programable o impulso OUT2: normalmente abierto / normalmente cerrado programable o analógico (4...20 mA / 0...10 V, graduable en escala)
Corriente de salida [mA]	2 x 200
Caída de tensión [V]	< 2
Protección contra cortocircuitos	pulsada
Resistente a sobrecargas	sí
Salida analógica	4...20 mA; 0...10 V
Carga máx. [Ω]	500 (4...20 mA)

SM8000

SMR11GGXFRKG/US-100

Sensores de caudal

Carga mínima	[Ω]	2000 (0...10 V)
Salida de impulsos		Caudalómetro

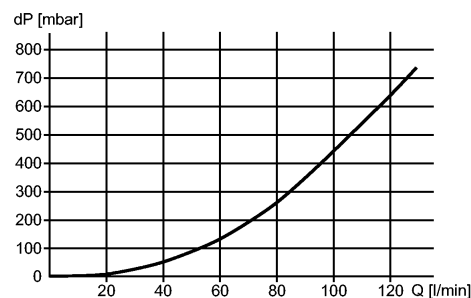
Rango de configuración / medición

Control de caudal		
Rango de medición	0,2...100,0 l/min	0,010...6,000 m³/h
Rango de visualización	-120...120 l/min	-7,2...7,2 m³/h
Resolución	0,1 l/min	0,005 m³/h
Punto de consigna alto, SP	0,7...100,0 l/min	0,040...6,000 m³/h
Punto de consigna bajo, rP	0,2...99,5 l/min	0,010...5,970 m³/h
Punto inicial analógico, ASP	0,0...80,0 l/min	0,000...4,800 m³/h
Punto final analógico AEP	20,0...100,0 l/min	1,200...6,000 m³/h
en intervalos de	0,1 l/min	0,005 m³/h
Supervisión de cantidades de caudal		
Valor de impulso		0,01 l...100 000 m³
Longitud de pulso	[s]	0,0025...2
Supervisión de temperatura		
Rango de medición	[°C]	-20...80
Resolución	[°C]	0,2
Punto de consigna alto, SP	[°C]	-19,2...80,0
Punto de consigna bajo, rP	[°C]	-19,6...79,6
Punto inicial analógico, ASP	[°C]	-20,0...60,0
Punto final analógico AEP	[°C]	0,0...80,0
en intervalos de	[°C]	0,2

Precisión / diferencias

Control de caudal	
Exactitud	± (2% MW + 0,5% MEW)
Repetibilidad	± 0,2% MEW

Pérdida de presión (dP) / volumen del caudal (Q)



Supervisión de temperatura	
Exactitud	[K] ± 2,5 (Q > 5 l/min)

Tiempos de reacción

Retardo a la disponibilidad	[s]	5
Control de caudal		
Temporización de arranque	[s]	0...50
Tiempo de respuesta	[s]	< 0,150 (dAP = 0)
Amortiguamiento, dAP	[s]	0,0...5,0
Supervisión de temperatura		
Tiempo de respuesta	[s]	T09 = 20 (Q > 5 l/min)

SM8000

SMR11GGXFRKG/US-100

Sensores de caudal

Software / programación

Posibilidades de programación	Histéresis / ventana; normalmente abierto / normalmente cerrado; lógica de conmutación; salida de corriente / tensión / por impulsos; tiempo de espera al arranque; la pantalla se puede desactivar; unidad de indicación
-------------------------------	---

Condiciones ambientales

Temperatura ambiente [°C]	-10...60
Temperatura de almacenamiento[°C]	-25...80
Grado de protección	IP 67

Homologaciones / pruebas

Directiva sobre equipos a presión	Artículo 3, apartado (3) - Buenas prácticas de la técnica al uso
CEM	EN 61000-4-2 ESD: 4 kV CD / 8 kV AD EN 61000-4-3 HF radiado: 10 V/m EN 61000-4-4 Burst: 2 kV EN 61000-4-5 Surge: 0,5 kV EN 61000-4-6 HF guiado: 10 V
Resistencia a choques	DIN IEC 68-2-27: 20 g (11 ms)
Resistencia a las vibraciones	DIN IEC 68-2-6: 5 g (10...2000 Hz)
MTTF [años]	151

Datos mecánicos

Conexión de proceso	G1 con junta plana
Materiales en contacto con el fluido	inox (1.4404 / 316L); PEEK; FKM
Materiales de la carcasa	inox (1.4404 / 316L); PBT-GF 20; PC; FKM; TPE
Peso [kg]	0,631

Indicaciones / elementos de mando

Indicador	Unidad de indicación 6 x LED verde (l/min, m ³ /h, l, m ³ , 10 ³ , °C) Estado de conmutación 2 x LED amarillo Valores de medición Display alfanumérico de 4 dígitos Programación Display alfanumérico de 4 dígitos
-----------	--

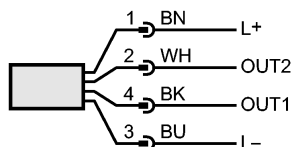
Conexión eléctrica

Conexionado	Conector M12; contactos dorados
-------------	---------------------------------

Conexionado

Colores de los hilos

BK	negro
BN	marrón
BU	azul
WH	blanco



Identificación de colores según DIN EN 60947-5-2

OUT1: 3 opciones de selección

Salida digital para supervisión de caudal

Salida por impulsos para el contador de caudal

Salida de señal para el contador con preselección

OUT2: 5 opciones de selección

Salida digital para supervisión de caudal

Salida digital para supervisión de temperatura

Salida analógica para caudal

Salida analógica para temperatura

Entrada para reseteo del contador

**SM8000**

SMR11GGXFRKG/US-100

Sensores de caudal**Notas**

Notas

1) según EN50178, SELV, PELV
MW = valor de medición
MEW = valor límite del rango de medición

Cantidad por pack

[Pieza]

1

3100 Series and 3200 Heavy Duty Series Compact OEM Pressure Transmitters

- ▶ 0–100 psi to 0-30,000 psi ranges (0-7 bar to 0-2,200 bar)
- ▶ High Proof Pressures
- ▶ Broad Choice of Outputs
- ▶ RoHS Compliant

For OEMs that need consistent high levels of performance, reliability and stability the 3100 and 3200 Series sputtered thin film units offer unbeatable price performance ratio in a small package size. They feature all-stainless steel wetted parts, a broad selection of electrical and pressure connections, and wide choice of electrical outputs to allow stock configurations suitable for most applications without modification. At the heart of both these series is a sputter element that also provides exceptional temperature specifications. Plus, our manufacturing process for the 3100 and 3200 Series include the latest automated equipment, producing the most consistent and best price to performance sensor on the market today.

Additionally, 3200 Series transmitters feature thicker diaphragms and a pressure restrictor to withstand the rigors of cavitations or extreme pressure spikes, delivering years of reliable and stable performance in pulsating applications.

The compact construction of both these series makes them ideal for installation where space is at a premium. And they are fully RoHS compliant.

Specifications

Performance	
Long Term Drift	0.2% FS/YR (non-cumulative)
Accuracy	
3100	0.25% FS
3200	0.5% FS for <1000 psi (60 bar)
Thermal Error	
3100	0.83% FS/100°F (1.5% FS/100°C)
3200	2% FS/100°C for <1000 psi (60 bar)
Compensated Temperatures	
-40°F to +257°F (-40°C to +125°C)	
Operating Temperatures	
-40°F to +257°F (-40°C to +125°C)	
Zero Tolerance	
3100	0.5% of span
3200	1% FS for <1000 psi (60 bar)
Span Tolerance	
3100	0.5% of span
3200	1% FS for <1000 psi (60 bar)
Response Time	
1 ms	
Fatigue Life	
Designed for more than 100 M cycles	
Mechanical Configuration	
Pressure Port	See under "How to Order," last page
Wetted Parts	17-4 PH Stainless Steel
Electrical Connection	See under "How to Order," last page
Enclosure	IP67 (IP65 for electrical code G)
Vibration	40G peak to peak sinusoidal, (Random Vibration: 20 to 1000 Hz @ approx. 40G peak per MIL-STD-810E)
Shock	Withstands free fall to IEC 68-2-32 procedure 1
EMC (Radiated Immunity)	100 V/m
Approvals	CE, conforms to European Pressure Directive, Fully RoHS compliant, UL recognized files # E219842 & E174228
Weight	35 grams



Individual Specifications

Voltage	
Output (3-wire)	0 V min. to 10 V max. See under "How to Order," last page
Supply Voltage	2 Volts above full scale to 30 Vdc max @ 4.5 mA (6.5 mA on dual output version)
Source and Sinks	2 mA
Current	
Output (2-wire)	4-20 mA
Supply Voltage	8-30 Vdc
Maximum Loop Resistance (Supply Voltage-8) x 50 ohms	
Ratiometric	
Output	0.5 to 4.5 Vdc @ 4 mA (6.5 mA on dual output version)
Supply Voltage	5 Vdc ±10%

Pressure Capability

Pressure Range PSI (Bar)	Proof Pressure (x Full Scale)		Burst Pressure (x Full Scale)	
	3100	3200	3100	3200
100-300 (7-25)	3.00 x FS	3.00 x FS	40 x FS	
500-1,500 (40-100)			20 x FS	
2,000-6,000 (160-400)			10 x FS	
7,500-9,000 (600)			4 x FS	10 x FS
10,000 (700)	>60,000 PSI (4,000 bar)			
15,000 (1,000)			2.50 x FS	1.8 x FS
25,000 (1,800)	1.5 x FS			—
30,000 (2,200)	1.40 x FS	—	—	

Pressure Ports

SAE Dimensions in Inches				
Fitting Code	08 = 1/8"-27 NPT	4D = 1/8"-27 NPTF Dryseal	02 = 1/4"-18 NPT	0E = 1/4"-18 NPT Internal
Torque	2-3 TFFT*	2-3 TFFT*	2-3 TFFT*	2-3 TFFT*
Fitting Code	4C = 1/4"-18 NPTF Dryseal	4N = SAE J1926/2:3/8-24	1J = 7/16"-20 UNF with O-Ring	04 = 7/16"-20 UNF with 37° Flare
Torque	2-3 TFFT*	18-20 NM	18-20 NM	15-16 NM
			Metric Dimensions in MM →	
Fitting Code	1G = SAE 4 Female 7/16" Schraeder	1P = 9/16-18 "Heavy Duty"		01 = G1/4"-27 External
Torque	18-20 NM	18-20 NM		30-35NM
Fitting Code	05 = G1/4" A Integral Face Seal	0L = M12 x 1.5	2T = M12x1.5 HP Metal Washer Seal	0K = M14 x 1.5
Torque	30-35 NM	28-30 NM	30-35 NM	2-3 TFFT*

*NPT Threads 2-3 turns from finger tight. Wrench tighten 2-3 turns.

- General Notes:
1. The diameter of all cans is 19 mm (0.748")
 2. Hex is 22 mm (0.866") Across Flats (A/F) for deep socket mounting
 3. O-Ring material, where applicable, is Nitrile® unless otherwise specified.

How to Order

Use the **bold** characters from the chart below to construct a product code

	3100	B	200PG	02	B	R	01	
Series	3100 / 3200 - Pressure Transducer – Combination Pressure and Temperature ¹ 3101 / 3201 - Temp. Output Range -40°C to 125°C 3102 / 3202 - Temp. Output Range 0°C to 100°C 3103 / 3203 - Temp. Output Range 0°C to 80°C						Cable Length (For electrical connections F & 3 only)	
Output	B - 4-20 mA C - 1-6 V H - 1-5 V N - 0.5-4.5 V R - 0-5 V ² S - 0-10 V ² T - 0.5-4.5 V Ratiometric						Optional Restrictor (3200 only)	
Pressure Range – psi	100PG - 0-100 psiG 10CPG - 0-1,000 psiG 10KPS = 0-10,000 psiS 150PG - 0-150 psiG 15CPG - 0-1,500 psiG 15KPS - 0-15,000 psiS ³ 200PG - 0-200 psiG 20CPS - 0-2,000 psiS 20KPS - 0-20,000 psiS ³ 300PG - 0-300 psiG 25CPS - 0-2,500 psiS 25KPS - 0-25,000 psiS ³ 500PG - 0-500 psiG 30CPS - 0-3,000 psiS 600PG - 0-600 psiG 35CPS - 0-3,500 psiS 750PG - 0-750 psiG 40CPS - 0-4,000 psiS 50CPS - 0-5,000 psiS 60CPS - 0-6,000 psiS 75CPS - 0-7,500 psiS						Electrical Connection ⁵	
Pressure Range - bar	0007G - 0-7 barG 0160S - 0-160 barS 1000S - 1,000 barS ³ 0010G - 0-10 barG 0250S - 0-250 barS 1600S - 1,600 barS ³ 0016G - 0-16 barG 0400S - 0-400 barS 0025G - 0-25 barG 0600S - 0-600 barS 0040G - 0-40 barG 0060G - 0-60 barG 0100G - 0-100 barG						Pressure Port ⁴	
							00 - No Cable 01 - 1 meter 02 - 2 meters 03 - 3 meters 04 - 4 meters 05 - 5 meters R - Restrictor 0 - No Restrictor B - Industrial DIN 9.4 mm (mating connector not supplied) E - M12 x 1P (4-Pin) F - Cable version G - Large DIN R - Industrial DIN 9.4 mm (alternate pin out) 3 - 1/2" NPT Male Conduit 6 - Amp - Superseal 1.5 Series 8 - Deutsch DT04-4P 9 - Packard MetriPack 08 - 1/8-27 NPT External 02 - 1/4-18 NPT External 04 - 7/16-20 External (SAE #4, J514) 1J - 7/16-20 External (SAE #4, J1926-2) 0E - 1/4"-18 NPT Internal 0K - M14 x 1.5 Straight 1G - Schrader SAE #4, 7/16" Internal 1P - SAE 6 (9/16"-18 UNF 2A) 4C - 1/4-18 NPTF External (Dryseal) 4D - 1/8-27 NPTF External (Dryseal) 4N - SAE 3 (3/8-24 UNF External) European Threads 01 - G1/4 External 05 - G1/4 External Soft Seal 0L - M12 x 1.5 (<1,000 bar, 15,000 psi) 2T - M12 x 1.5 (6g) (≥1,000 bar, 15,000 psi)	

Notes:

- Temperature outputs are for voltage output pressure sensors only (applies to codes **-C**, **-H**, **-N**, and **-T** only) and limited to connections that have 4 pins (Electrical codes **-B**, **-E** and **-R**). Accuracy is 3.5% of temperature span. Requires additional 2mA of power.
- For use with pull-up or pull-down resistors, contact factory.
- Ranges 15,000 psi (1,000 bar) and above available with **-2T** pressure port only.
- Pressure ports **0E** and **1G** are NOT available with the Restrictor option.
- For electrical codes **F** & **3**, specify cable length in meters.

