



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

CURSO 2020/21

*CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN PLACA DE
ORIFICIO*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

ALUMNA

Patricia López Morais

TUTOR

Marcos Lema Rodríguez

FECHA

Septiembre 2021

1 TÍTULO Y RESUMEN

CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN PLACA DE ORIFICIO

En este trabajo se lleva a cabo la caracterización del flujo en dos placas de orificio a través de la obtención de sus curvas características y de un estudio dinámico, prestando especial atención al fenómeno de cavitación, muy perjudicial en los sistemas hidráulicos industriales debido a los efectos negativos (vibraciones, ruido y daños materiales) que provoca. La intensidad de estos es máxima justo antes del bloqueo total del flujo por lo que resulta interesante conocer el inicio de tal condición, siendo posible identificarlo fácilmente gracias a las curvas características. Además, con los datos proporcionados por la literatura acerca de la relación de presión a la que tiene lugar en diferentes dispositivos, se propone una ecuación que permita estimar la condición de flujo totalmente bloqueado para cualquier placa de orificio delgada en función de su relación de contracción.

Por otro lado, gracias al estudio dinámico del flujo se puede estimar el inicio de la cavitación debido al singular comportamiento del fluido bajo este fenómeno. También es posible identificar la condición de trabajo más crítica en una placa de orificio con el fin de evitarla o proteger las zonas más propensas si no es posible.

CARACTERIZACIÓN DO FLUXO EN PLACA DE ORIFICIO

Neste traballo lévase a cabo a caracterización do fluxo en dúas placas de orificio a través da obtención das súas curvas características e dun estudo dinámico, prestando especial atención ao fenómeno de cavitación, moi perxudicial nos sistemas hidráulicos industriais debido aos efectos negativos (vibracións, ruído e danos materiais) que provoca. A intensidade destes é máxima xusto antes do bloqueo total do fluxo polo que resulta interesante coñecer o inicio de tal condición, sendo posible identificalo fácilmente grazas ás curvas características. Ademais, cos datos proporcionados pola literatura acerca da relación de presión á que ten lugar en diferentes dispositivos, propónse una ecuación que permita estimar a condición de fluxo totalmente bloqueado para calquera placa de orificio delgada en función da súa relación de contracción.

Por outro lado, grazas ao estudo dinámico do fluxo pódese estimar o inicio da cavitación debido ao singular comportamento do fluido baixo este fenómeno. Tamén é posible identificar a condición de traballo máis crítica nunha placa de orificio co fin de evitala ou protexer as zonas máis propensas se non é posible.

FLOW CHARACTERISATION IN AN ORIFICE PLATE

In this work, the flow characterisation in two orifice plates is carried out by obtaining their characteristic curves and a dynamic study, paying special attention to the cavitation phenomenon, which is very harmful in industrial hydraulic systems due to the negative effects (vibrations, noise and material damages) that it causes. The intensity of these is maximum just before the total blockage of the flow so it is interesting to know the onset of that condition, which can be easily identified in the characteristic curves. In addition, thanks to the data provided by the literatura on the pressure ratio at which it happens in different devices, an equation is proposed to estimate the totally choked flow condition for any thin orifice plate as a function of its contraction ratio.

On the other hand, thanks to the dynamic study of the flow it is possible to estimate the onset of cavitation because of the unique behavior of the fluid under the influence of this phenomenon. It is also possible to identify the most critical working condition in an orifice plate in order to avoid it or to protect the most prone areas if it is not possible.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2020/21**

*CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN PLACA DE
ORIFICIO*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Documento I

MEMORIA

ÍNDICE

1 Título y Resumen.....	2
2 Introducción	13
3 Objetivos.....	14
4 Estudio Bibliográfico.....	15
4.1 Fundamentos de mecánica de fluidos.....	15
4.1.1 Propiedades de los fluidos.....	15
4.1.1.1 Presión	15
4.1.1.2 Densidad	17
4.1.1.3 Viscosidad	17
4.1.2 Conceptos básicos	18
4.1.3 Número de Reynolds	19
4.1.4 Ecuación de continuidad.....	21
4.1.5 Principio de Bernoulli	22
4.1.5.1 Ecuación de Bernoulli generalizada.....	24
4.2 Medidores de caudal volumétrico.....	26
4.3 Placas de orificio.....	29
4.3.1 Definición.....	29
4.3.2 Descripción.....	30
4.3.3 Principio de funcionamiento.....	33
4.3.4 Tomas de presión	36
4.3.5 Clasificación	39
4.3.5.1 Clasificación según la ubicación y forma del orificio.....	39
4.3.5.2 Clasificación según la relación L/d	42
4.3.6 Parámetros característicos	44
4.3.6.1 Relación de contracción	44
4.3.6.2 Coeficiente de descarga	44
4.3.6.3 Coeficiente de caudal	47
4.3.7 Ventajas y desventajas	49
4.4 Cavitación.....	51
4.4.1 Naturaleza del fenómeno.....	52
4.4.2 Ciclo de las burbujas de vapor.....	52
4.4.3 Cavitación en placas de orificio.....	53
4.4.4 Curva característica $Q - \Delta P$	56

4.4.5 Número de cavitación	57
4.4.6 Clasificación de la intensidad de cavitación	58
4.4.6.1 Cavitación incipiente.....	58
4.4.6.2 Cavitación crítica o constante	61
4.4.6.3 Cavitación moderada o de daño incipiente	61
4.4.6.4 Cavitación por asfixia.....	62
4.4.7 Efectos de la cavitación	66
5 Instalación Experimental	69
5.1 Banco de ensayos hidráulicos	72
5.1.1 Sección de pruebas	73
5.1.2 Placas de orificio.....	76
5.1.3 Depósitos.....	79
5.1.3.1 Depósito grande	79
5.1.3.2 Depósito pequeño	82
5.1.4 Bombas	82
5.1.4.1 Bomba centrífuga	83
5.1.4.2 Bomba de vacío.....	84
5.1.5 Válvulas de estrangulamiento	85
5.1.6 Sistema de seguridad	87
5.2 Sistema de adquisición de datos.....	87
5.2.1 Sensores	90
5.2.1.1 Presión	90
5.2.1.2 Temperatura	98
5.2.1.3 Caudal.....	99
5.2.2 Dispositivo de adquisición de datos	101
5.2.3 Elemento computacional.....	104
5.2.4 Muestreo de señales	104
6 Metodología	107
6.1 Caracterización de las placas de orificio	107
6.1.1 Condiciones de ensayo.....	107
6.1.2 Obtención de los datos	108
6.1.3 Procesamiento de los datos.....	110
6.1.3.1 Curvas características $Q - \Delta P$	110
6.1.3.2 Curvas características $Q - P_2/P_1$	110
6.2 Dinámica del flujo.....	110
6.2.1 Condiciones de ensayo.....	111
6.2.2 Obtención de los datos	111

6.2.3 Procesamiento de los datos.....	112
6.3 Ecuación $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{crit} = f(\beta)$	115
6.4 Análisis de incertidumbre.....	116
6.4.1 Incertidumbre aleatoria.....	117
6.4.2 Incertidumbre sistemática.....	119
6.4.3 Incertidumbre total.....	119
7 Resultados y Discusión.....	121
7.1 Caracterización de las placas de orificio.....	121
7.1.1 Curvas características $Q - \Delta P$	121
7.1.2 Curvas características $Q - P_2/P_1$	126
7.2 Dinámica del flujo.....	131
7.3 Ecuación $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{crit} = f(\beta)$	135
8 Conclusiones.....	139
9 Bibliografía.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Relación entre los tipos de presión según el punto de referencia. Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.....	16
Figura 2 Línea de corriente y tubo de corriente. Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.....	18
Figura 3 Comportamiento del fluido en régimen laminar y perfil de velocidades. Thermal Engineering y Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.....	20
Figura 4 Comportamiento del fluido en régimen transicional. Imagen modificada de Semantic Scholar.....	20
Figura 5 Comportamiento del fluido en régimen turbulento y perfil de velocidades. Thermal Engineering y Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.....	20
Figura 6 Tubo de corriente estrecho. Imagen modificada de Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Madrid.....	21
Figura 7 Tubo de corriente estrecho. Imagen modificada de Hidrostática - Hidrodinámica blog.....	22
Figura 8 Balance energético entre los puntos 1 y 2 de un fluido real viscoso. Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.....	25
Figura 9 Medidores de presión diferencial: a) Placa de orificio; b) Tubo Venturi; c) Boquilla de flujo; d) Tubo de flujo Dall. Flow Measurement. Alan S. Morris and Reza Langari.....	27
Figura 10 Rotámetro. Manometría Instrumentación y Flow Measurement. Alan S. Morris and Reza Langari.....	27
Figura 11 Caudalímetro de turbina. Flow Measurement. Alan S. Morris and Reza Langari.....	28
Figura 12 Caudalímetro electromagnético. Flow Measurement. Alan S. Morris and Reza Langari.....	28
Figura 13 Placas de orificio. Serie de caudalímetros de orificio compacto de Rosemount.....	30
Figura 14 Sección transversal de una placa de orificio normalizada. Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003.....	31
Figura 15 Medida de la planeidad de una placa de orificio. Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003.....	32
Figura 16 (a) Paso del fluido a través de una placa de orificio. (b) Líneas de corriente. (c) Distribución de la presión. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.....	34
Figura 17 Flujo a través de una placa de orificio y evolución de la presión estática. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. P. Testud et al.....	36
Figura 18 Placa de orificio con tomas de presión a D y $D/2$ y en las bridas. Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003.....	37
Figura 19 Placa de orificio con tomas de presión en ángulo. Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003.....	38
Figura 20 Placa de orificio concéntrica de borde cuadrado. Emerson y Hoja técnica WIKA FL 10.01.....	39
Figura 21 Placa de orificio cónica (1) y con abertura de cuadrante (2). Imagen modificada de Hoja técnica WIKA FL 10.01.....	40
Figura 22 Placa de orificio excéntrica. Hoja técnica WIKA FL 10.01.....	40
Figura 23 Placa de orificio concéntrica segmentada. Manómetros de proceso ETSA y Hoja técnica WIKA FL 10.01.....	41
Figura 24 Placa de orificio con orificio de ventilación (a) y con orificio de drenaje (b). Inst Tools.....	42

Figura 25 Placa de orificio delgada $L/d < 2$: readherencia simple. Dynamics of the cavitating flow downstream of the orifice plate. Pavel Rudolf.	43
Figura 26 Placa de orificio gruesa $L/d \geq 2$: readherencia en dos fases. Dynamics of the cavitating flow downstream of the orifice plate. Pavel Rudolf.	43
Figura 27 Variación del coeficiente de descarga con el número de Reynolds. Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds number. C. L. Hollingshead et al.	46
Figura 28 Variación del coeficiente de caudal con la relación de contracción.	49
Figura 29 Pérdida de presión permanente en algunos dispositivos de restricción. Fundamentals of Orifice Meter Measurement. Emerson.	50
Figura 30 Diagrama de estados y curvas de cambio de fase del agua. Apuntes de Máquinas Hidráulicas de la Universidad de Valladolid.	52
Figura 31 Esquema del ciclo de las burbujas de cavitación. Apuntes de Máquinas Hidráulicas de la Universidad de Valladolid.	53
Figura 32 Variación de la presión en el paso del fluido a través de una placa de orificio sin cavitación. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.	54
Figura 33 Variación de la presión en el paso del fluido a través de una placa de orificio con cavitación. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.	55
Figura 34 Flashing. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.	55
Figura 35 Curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.	56
Figura 36 Relación entre la presión de choque máxima y el número de cavitación. Cavitation characteristics of restriction orifices. K. Takahashi et al.	57
Figura 37 Nubes de burbujas blancas formadas aguas abajo de la placa de orificio en el nivel de cavitación incipiente. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. P. Testud et al.	59
Figura 38 Variación del número de cavitación incipiente, σ_i , en función de la relación de contracción, β . Cavitation and size scale effects for orifices. P. Tullis et al.	60
Figura 39 Bolsa de vapor aguas abajo de la placa de orificio en el régimen de cavitación por asfixia. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. P. Testud et al.	62
Figura 40 Variación del número de cavitación por asfixia, σ_{ch} , en función de la relación de contracción, β . Cavitation and size scale effects for orifices. P. Tullis et al.	63
Figura 41 Identificación de los regímenes y límites de cavitación según la norma ISA. On cavitation occurrence in perforated plates. S. Malvasi et al.	64
Figura 42 Espectros de frecuencia de la señal de presión para: (a) flujo no cavitante; (b) flujo cavitante con $\sigma = 0,72$; (c) flujo en régimen de cavitación por asfixia con $\sigma = 0,1$. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. P. Testud et al.	65
Figura 43 Curva característica $Q - P_2 / P_1$. Measurements of the flow of supercritical carbon dioxide through short orifices. John Edlebeck et al.	66
Figura 44 Daños materiales ocasionados por el fenómeno de la cavitación. AMS Steam Technology. Marc Manich.	67
Figura 45 Esquema básico de un sistema de ensayos. Norma IEC-EN 60534-2-3:2016.	69
Figura 46 Configuración estándar de la sección de pruebas. Norma IEC-EN 60534-2-3:2016.	70
Figura 47 Conexión y medidas recomendadas de las tomas de presión. Norma IEC-EN 60534-2-3:2016.	71

Figura 48 Banco de ensayos hidráulicos del Centro de Investigaciones Tecnológicas de Ferrol. 72	72
Figura 49 Recorte del plano 1 del anexo A del banco de ensayos hidráulicos del Centro de Investigaciones Tecnológicas de Ferrol. Plano realizado por D.C.M. Salorio S.L.....	73
Figura 50 Sección de pruebas del banco de ensayos hidráulicos.....	74
Figura 51 Recorte de la sección de pruebas del plano 1 del anexo A del banco de ensayos hidráulicos. Plano realizado por D.C.M. Salorio S.L.	74
Figura 52 Dimensiones de tubería según su tamaño comercial. American National Pipe.	75
Figura 53 Instalación del conjunto de placa de orificio. Spirax Sarco “M410 Orifice Plate Assemblies. Installation and Maintenance Instructions”.	76
Figura 54 . Recorte del porta placa del plano 2 del anexo A e imagen de este elemento.	77
Figura 55 Recorte del conjunto de placa de orificio del plano 2 del anexo A.	77
Figura 56 Placas de orificio de 25 mm y 15 mm empleadas.	78
Figura 57 Depósito de 700 L.....	79
Figura 58 Doble cabezal en la parte superior del depósito grande y detalle de la válvula de purga.	80
Figura 59 Termostato de varilla.....	80
Figura 60 Sistema de llenado, ojo de buey y sistema de vaciado, por este orden.....	81
Figura 61 Depósito de 50 L y válvula para purgarlo.	82
Figura 62 Bomba centrífuga y variador de frecuencia.	83
Figura 63 Curva característica de la bomba centrífuga.	84
Figura 64 Bomba de vacío y válvula del manguito de purga.	85
Figura 65 Válvula de estrangulamiento aguas arriba de la sección de pruebas: a) cerrada; b) abierta.....	86
Figura 66 Válvula de estrangulamiento aguas abajo de la sección de pruebas totalmente abierta.	86
Figura 67 Sistema de seguridad en forma de interruptor.	87
Figura 68 Partes de un sistema de adquisición de datos (DAQ). National Instruments.....	88
Figura 69 Esquema de funcionamiento de un sistema de adquisición de datos. Dewesoft X Software.....	89
Figura 70 Esquema de funcionamiento de un ADC. Dewesoft X Software.....	89
Figura 71 Muestreo y cuantificación de una señal analógica. Apuntes de “Sistemas de adquisición y Procesamiento de datos” de la Universidad de Alicante.....	90
Figura 72 Transductor de presión estática estacionario aguas arriba de la placa de orificio.	91
Figura 73 Transductor de presión estática estacionario aguas abajo de la placa de orificio con rango de presión 0 – 6 bar.	92
Figura 74 Nuevo transductor de presión estática estacionario aguas abajo de la placa de orificio con rango de presión 0 – 10 bar.	93
Figura 75 Curvas de calibración proporcionada por el fabricante y experimental del transductor de presión estática estacionario aguas abajo con rango 0 – 10 bar.....	94
Figura 76 Transductor de presión estática estacionario en el depósito de 700 L.	95
Figura 77 Transductor de presión no estacionario y amplificador externo.	96
Figura 78 Principio de funcionamiento de un termopar. Omega Engineering Spectris Company.	98
Figura 79 Termopar soldado al depósito pequeño y termopar anclado a la estructura metálica. .	99
Figura 80 Caudalímetro electromagnético.	100

Figura 81 Dispositivo de adquisición de datos.....	101
Figura 82 Chasis NI cDAQ-9174. National Instruments.	102
Figura 83 Elementos del chasis NI cDAQ-9174. National Instruments.	102
Figura 84 Vista de los cuatro módulos insertados en las ranuras del chasis NI cDAQ-9174.	103
Figura 85 Fuente de alimentación.....	104
Figura 86 Fenómeno de aliasing. Adquisición de datos de Mónica B. Agüero.	105
Figura 87 Algoritmo de MATLAB para la representación tridimensional de la dinámica del flujo.	114
Figura 88 Error en las mediciones. ASME PTC 19.1-2005.	117
Figura 89 Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ de los ensayos correspondientes a la placa de orificio con $\beta = 0,5$ para distintas condiciones de presión aguas arriba.	122
Figura 90 Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ de los ensayos correspondientes a la placa de orificio con $\beta = 0,3$ para distintas condiciones de presión aguas arriba.	122
Figura 91 Comparación de una curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$ por cada valor de presión aguas arriba para la placa de orificio con $\beta = 0,5$	123
Figura 92 Comparación de una curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$ por cada valor de presión aguas arriba para la placa de orificio con $\beta = 0,3$	124
Figura 93 Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ de una placa de orificio con $\beta = 0,223$. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.	125
Figura 94 Curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$ correspondiente a la placa de orificio con $\beta = 0,5$ bajo unas condiciones de presión a la entrada igual a 250 kPa y un margen de ± 10 kPa.	126
Figura 95 Curvas características $Q - P_2 / P_1$ correspondientes a la placa de orificio con $\beta = 0,5$	127
Figura 96 Curvas características $Q - P_2 / P_1$ correspondientes a la placa de orificio con $\beta = 0,3$	127
Figura 97 Influencia de la relación de contracción de una placa de orificio sobre el crecimiento de las burbujas de vapor. Imagen modificada de Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. V. S Moholkar y A. B Pandit.	128
Figura 98 Curvas características $Q - P_2 / P_1$ para una placa de orificio gruesa con $\beta = 0,223$. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.	129
Figura 99 Influencia del espesor relativo de una placa de orificio con $\beta = 0,223$ en el flujo cavitante. Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs. Alister Simpson y Vivek V. Ranade.	130
Figura 100 Dinámica del flujo y curva $Q - \sqrt{\Delta P}$ correspondiente a una presión aguas arriba igual a: (a) 250 kPa, (b) 300 kPa, (c) 350 kPa, (d) 400 kPa.	132
Figura 101 Identificación de las zonas de trabajo para la placa de orificio con $\beta = 0,3$	135
Figura 102 Tendencia de la relación de presión crítica, $(P_2 / P_1)_{crit}$, frente a la relación de contracción, β	136
Figura 103 Comprobación de la coherencia entre los resultados experimentales y los presentados por la literatura.....	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Empleo de cada tipo de placa de orificio en función del medio. Hoja técnica WIKA FL 10.01.....	41
Tabla 2 Comprobación cumplimiento de la norma IEC-EN 60534-2-3:2016 en la sección de pruebas.....	75
Tabla 3 Principales características de las placas de orificio utilizadas.....	78
Tabla 4 Principales características de la bomba centrífuga.....	83
Tabla 5 Principales características del transductor de presión estática estacionario aguas arriba.....	91
Tabla 6 Principales características del transductor de presión estática estacionario aguas abajo con rango de presión 0 – 6 bar.....	92
Tabla 7 Principales características del transductor de presión estática estacionario aguas abajo con rango de presión 0 – 10 bar.....	94
Tabla 8 Principales características del transductor de presión estática estacionario del depósito grande.....	96
Tabla 9 Principales características del transductor de presión estática no estacionario.....	97
Tabla 10 Principales características del amplificador conectado al transductor de presión no estacionario.....	97
Tabla 11 Principales características de los termopares.....	98
Tabla 12 Principales características del caudalímetro electromagnético.....	100
Tabla 13 Características de los módulos insertados en el chasis de adquisición de datos.....	103
Tabla 14 Frecuencias de muestreo de los sensores estacionarios.....	105
Tabla 15 Muestra de datos de caudal y presión.....	118
Tabla 16 Incertidumbre aleatoria asociada a las variables de presión y caudal.....	119
Tabla 17 Error sistemático de los sensores de presión y caudal empleados.....	119
Tabla 18 Incertidumbre sistemática en las mediciones de presión y caudal.....	119
Tabla 19 Incertidumbre total en las mediciones de presión y caudal.....	120
Tabla 20 Base de datos empleada.....	136
Tabla 21 Resultados de la relación de presión crítica obtenidos experimentalmente.....	137

2 INTRODUCCIÓN

La cavitación es un problema muy habitual en los sistemas hidráulicos, lo que la convierte en uno de los fenómenos con mayor interés en ingeniería. Es especialmente frecuente su aparición en sistemas caracterizados por diferentes secciones transversales a lo largo de la trayectoria del flujo.

Se puede considerar la cavitación como la rápida vaporización a temperatura constante de un fluido y su posterior condensación, causada por una reducción repentina de la presión hasta la presión de vapor del fluido debido al aumento de la velocidad del mismo en su paso a través de una restricción. A medida que la cavitación se intensifica a causa de un aumento en la caída de presión a través de tal restricción, dando lugar a un aumento del caudal, el volumen de vapor aguas abajo también se incrementa pudiendo llegar a aparecer una gran bolsa de vapor. Si esto sucede, el caudal deja de aumentar independientemente de un aumento de la diferencia de presión y el flujo se bloquea, alcanzándose el nivel más severo de cavitación: la cavitación por asfixia.

Asimismo, la condensación de las burbujas de vapor, que se generan a causa de este fenómeno, se traduce en implosiones cuando llegan a regiones de mayor presión, las cuales van acompañadas de microchorros de alta velocidad y ondas de choque que, al incidir en una superficie sólida, provocan daños del material, ruidos y vibraciones, lo que hace que este fenómeno sea usualmente indeseable. Los efectos negativos acabados de mencionar son máximos justo antes del bloqueo del flujo, razón por la que es especialmente interesante conocer el inicio de tal condición.

Por consiguiente, resulta de vital importancia identificar y caracterizar las condiciones del flujo sometido a cavitación con objeto de evitar tales efectos negativos puesto que estos se traducen en una reducción del rendimiento de la instalación y, por tanto, en pérdidas económicas. Para ello, es necesario llevar a cabo una caracterización del dispositivo que ocasiona la restricción. En el presente proyecto este dispositivo es una placa de orificio.

Las placas de orificio son los medidores de flujo de presión diferencial más comunes. Consisten, básicamente, en un disco de metal con un orificio, que puede ser concéntrico o no, que se aloja en la tubería que transporta el fluido de trabajo, agua dulce en este caso. Destacan por su geometría simple, ausencia de partes móviles, facilidad en su instalación, funcionamiento y mantenimiento, y bajo coste, entre otras características. Sin embargo, la pérdida de carga que generan es muy elevada en comparación con otros dispositivos de medición del caudal, aspecto que las hace susceptibles a la cavitación.

Por tanto, la finalidad de este trabajo de investigación es la caracterización del flujo a través de las placas de orificio empleadas por medio de sus curvas características y de un estudio dinámico. Además, debido al interés que tiene conocer el inicio de la condición de flujo totalmente bloqueado, se considera importante disponer de herramientas para su predicción por lo que se propone una correlación que permita estimar su inicio en función del parámetro geométrico del que más depende el fenómeno de la cavitación en una placa de orificio: la relación de contracción, es decir, la relación entre el diámetro del orificio de la placa y el diámetro de la tubería en la que se instala. Para llevar a cabo esto, se ha trabajado en el banco de ensayos hidráulicos ubicado en el Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIT) de Ferrol. Este dispone de sensores (cuatro transductores de presión, uno de los cuales es no estacionario, dos termopares y un caudalímetro electromagnético) y un sistema de adquisición de datos de National Instruments (NI), además de contar con un ordenador con el software de NI instalado y un programa informático en MATLAB que permite la adquisición y visualización de los datos gracias a una interfaz gráfica de usuario (GUI).

3 OBJETIVOS

El principal objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es la caracterización del flujo a través de una placa de orificio, gracias a la obtención de las curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ y $Q - P_2/P_1$ bajo diferentes condiciones de presión a la entrada (constantes para un mismo ensayo) y a un estudio dinámico del flujo. Esto se hace con el propósito de identificar la zona de trabajo con cavitación, especialmente el inicio del bloqueo total del flujo, y poder determinar cuál es la situación de trabajo crítica en una placa de orificio. Para ello, se dispondrá de dos placas de orificio instaladas en el banco de ensayos hidráulicos del Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIT) de Ferrol, en el Campus de Esteiro, y cuyos valores de la relación de contracción son iguales a $\beta = 0,3$ y $\beta = 0,5$.

A partir de las curvas características $Q - P_2/P_1$ se podrá obtener el valor de la relación de presión crítica, $(P_2/P_1)_{crit}$, a la que se alcanza la condición de flujo bloqueado en cada placa de orificio. Además, aprovechando el conocimiento del inicio de esta situación, se creará una base de datos experimental con los resultados de la literatura existente, con el fin de proponer una correlación entre la relación de presión crítica y la relación de contracción de una placa de orificio para predecir el bloqueo total del flujo en tal dispositivo. Esto también permitirá comprobar si los valores de la relación de presión crítica obtenidos experimentalmente se corresponden con lo que predice esa ecuación y, en consecuencia, la literatura. La propuesta de dicha ecuación es el segundo objetivo de la investigación.

4 ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

En el presente apartado se exponen los conceptos teóricos más importantes relacionados con la temática del proyecto, así como estudios, con el objeto de facilitar su comprensión y ejecución.

4.1 Fundamentos de mecánica de fluidos

Resulta imprescindible conocer ciertos aspectos básicos de la mecánica de fluidos para lograr una comprensión adecuada de la terminología y los fundamentos en los que se basa el presente proyecto de investigación. Es por este motivo por el que se han incluido cada uno de los siguientes epígrafes.

4.1.1 Propiedades de los fluidos

Un fluido es un medio continuo que, bajo el efecto de un esfuerzo cortante, toma la forma del recipiente que lo contiene, es decir, se deforma continua e indefinidamente para adaptarse a él, siendo esta deformación irreversible. Este término engloba a los líquidos y a los gases, no a los sólidos porque, a diferencia de ellos, estos se deforman una cantidad finita pudiendo recuperar su forma original si el esfuerzo cortante no ha superado un cierto umbral crítico, mientras que, si lo supera, la deformación también es irreversible pudiendo llegar a causar rotura.

Es importante conocer las propiedades del fluido de trabajo en una instalación para una selección adecuada de los elementos que forman parte de ella. Las principales propiedades de los fluidos se detallan a continuación.

4.1.1.1 Presión

La presión, P , se define como el esfuerzo normal (fuerza por unidad de superficie) que se ejerce en el seno de un fluido. Su expresión matemática es la siguiente:

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (ec. 1)$$

donde dF es el diferencial de fuerza en N y dA , el diferencial de área en m^2 .

En el Sistema Internacional, la presión se mide en pascales, Pa ($\frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m s^2}$). No obstante, como el pascal es una unidad pequeña en relación con las presiones comunes, se emplea el kilopascal, kPa ($10^3 Pa$) y el megapascal, MPa ($10^6 Pa$). La presión también se puede expresar en otras unidades como la atmósfera, atm ($1,01325 \cdot 10^5 Pa$), el bar, bar ($10^5 Pa$) o la libra por pulgada cuadrada, psi ($6,895 \cdot 10^3 Pa$).

El estudio de la presión de un fluido se debe hacer respecto a un punto de referencia, el cual, normalmente, es la presión atmosférica o el vacío perfecto (cero absoluto). Según esto, se tienen los siguientes tipos de presión:

- Presión absoluta, P_{abs} .
Es la presión real del fluido en el punto considerado. Se mide respecto al cero absoluto.

- Presión manométrica, P_{man} o P_{gage} .
Es la presión medida respecto a la presión atmosférica, P_{atm} , es decir, es la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica.

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} \quad (ec.2)$$

- Presión de vacío, P_{vac} .
Si la presión absoluta es menor que la presión atmosférica, no se habla de presión manométrica sino de presión de vacío. Se obtiene, por tanto, como la diferencia entre la presión atmosférica y la presión absoluta.

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs} \quad (ec.3)$$

La siguiente figura muestra la relación entre las presiones absoluta, manométrica, de vacío y atmosférica.

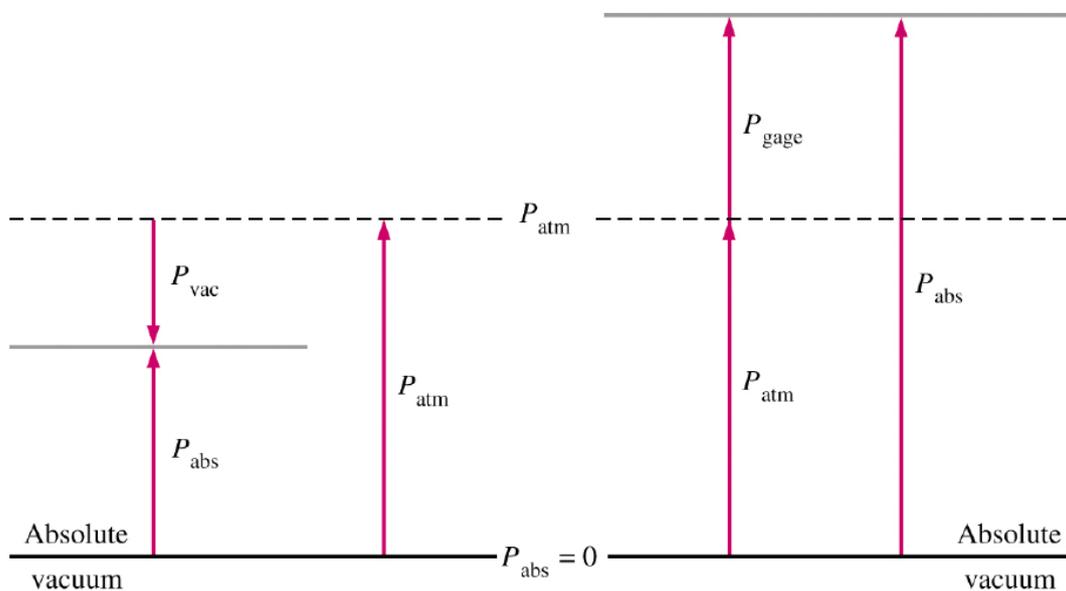


Figura 1 Relación entre los tipos de presión según el punto de referencia. Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.

Un fluido que circula por el interior de un conducto ejerce una presión total, P_T , sobre el mismo, la cual está asociada con el movimiento del fluido y es suma de los siguientes términos:

$$P_T = P_{estática} + P_{dinámica} + P_{hidrostática} \quad (ec.4)$$

El significado de cada uno de los tres factores que componen la ecuación anterior es el siguiente:

- La presión estática, $P_{estática}$, es la presión termodinámica del fluido, es decir, la debida a su constitución molecular. Es la presión que se mediría con una sonda que se mueve a la velocidad del flujo. En la práctica se mide en una región del flujo en la cual la velocidad es nula y donde las líneas de corriente son rectas y paralelas a través de una toma de presión en la pared o de una sonda de presión estática.
- La presión dinámica, $P_{dinámica}$, representa la energía cinética del fluido en movimiento, siendo, por tanto, función de la velocidad de este.

- La presión hidrostática, $P_{hidrostática}$, es la presión que ejerce un fluido en equilibrio en un punto dado dentro del mismo, debida a su propio peso. Es función de la altura de columna de fluido entre el punto en el que se quiere conocer la presión y el punto de referencia.

Las expresiones de los tres conceptos acabados de explicar serán expuestas en el apartado 4.1.5 *Principio de Bernoulli* cuando se lleve a cabo la deducción de tal ecuación.

4.1.1.2 Densidad

La densidad de un fluido, ρ , es la relación entre la masa y el volumen del mismo y sus unidades en el Sistema Internacional son kg/m^3 . En el caso general de un fluido no homogéneo, la densidad varía de un punto a otro por lo que se define como la masa por unidad de volumen en un elemento infinitesimal de volumen en torno al punto considerado:

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (ec.5)$$

Si el fluido es homogéneo, la densidad no varía de un punto a otro por lo que se define del siguiente modo:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (ec.6)$$

En ambas expresiones, las unidades del diferencial de masa, dm , y de la masa del fluido, m , son kg , y las del diferencial de volumen, dV , y del volumen, V , m^3 .

La densidad de un fluido varía con los cambios de presión y temperatura. En función del nivel de variación de la densidad con la presión, los fluidos se pueden clasificar en compresibles o incompresibles. En los líquidos la densidad no varía apreciablemente con la presión, de ahí que se consideren fluidos incompresibles (densidad constante) en la mayoría de las aplicaciones prácticas. En el caso de los gases, la densidad sí que varía significativamente con la presión por lo que se clasifican como compresibles.

Sin embargo, la consideración de fluido compresible en los gases depende del valor del número de Mach, Ma , el cual es la relación entre la velocidad del flujo, v , y la velocidad del sonido en el seno del fluido, c .

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (ec.7)$$

Los gases son compresibles cuando el número de Mach es mayor que 0,30.

4.1.1.3 Viscosidad

La viscosidad refleja la resistencia al movimiento del fluido, por lo que tiene un papel análogo al del rozamiento en el caso de los sólidos. Existen dos tipos de viscosidad, los cuales se mencionan a continuación.

Se llama viscosidad dinámica o absoluta de un fluido, μ , a la resistencia que éste opone a su deformación. Se define como la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad con que una capa de fluido se desplaza con respecto a una superficie fija o se desliza sobre una capa adyacente, e indica la mayor o menor resistencia que el fluido ofrece al movimiento de sus partículas cuando es sometido a tal esfuerzo. En un fluido que circula por un conducto, el esfuerzo cortante es máximo en la superficie de contacto, es decir, los efectos de la viscosidad del fluido son máximos en la superficie sólida. La unidad internacional de la viscosidad dinámica es $Pa \cdot s$ ($\frac{kg}{m \cdot s}$).

La viscosidad cinemática, ν , cuyas unidades son m^2/s , está relacionada con la viscosidad absoluta a través de la densidad.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{ec. 8})$$

El valor de la viscosidad en un fluido es función de la temperatura, siendo su influencia distinta en líquidos y gases, pues ante un aumento de temperatura, la viscosidad de los líquidos disminuye, mientras que en los gases aumenta.

4.1.2 Conceptos básicos

Previamente al desarrollo del resto de los epígrafes que constituyen este primer apartado de fundamentos se van a hacer una serie de definiciones básicas. Estas son las siguientes:

- Líneas de corriente y tubo de corriente.
Las líneas de corriente o de flujo son líneas que en un instante dado son tangentes en cada punto al vector velocidad.
Se denomina tubo de flujo o de corriente al conjunto de líneas de corriente.

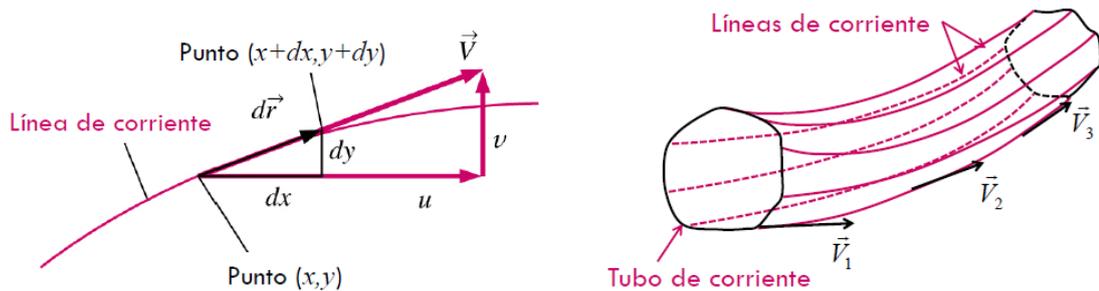


Figura 2 Línea de corriente y tubo de corriente. Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.

Debido a la condición de tangencia mencionada, las líneas de corriente cumplen lo siguiente:

$$\frac{dx}{u(\vec{x}, t)} = \frac{dy}{v(\vec{x}, t)} = \frac{dz}{w(\vec{x}, t)} \quad (\text{ec. 9})$$

donde dx , dy y dz son las componentes del vector posición \vec{dr} del punto considerado y u , v y w , las componentes del vector velocidad en las direcciones x , y y z respectivamente.

- Flujo estacionario.
Se llama flujo estacionario a aquel cuya velocidad, $\vec{v}(x, y, z)$, y densidad, $\rho(x, y, z)$, en un punto son independientes del tiempo. Esto no significa que la velocidad y la densidad tengan que ser las mismas en dos puntos distintos, sino que en un punto dado no deben variar con el tiempo. En caso contrario, se dice que el flujo es no estacionario.
- Fluido ideal.
La consideración de fluido ideal o perfecto se hace cuando las fuerzas viscosas son despreciables, es decir, no se tienen en cuenta las fuerzas de rozamiento en

el movimiento del fluido. Por el contrario, si se consideran tales fuerzas, se dice que el fluido es real.

4.1.3 Número de Reynolds

El número de Reynolds, Re , es uno de los parámetros adimensionales más importantes en la mecánica de fluidos. Se define como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Las fuerzas de inercias son aquellas que están asociadas con la velocidad y la masa o densidad del fluido, mientras que las fuerzas viscosas, lo están con la viscosidad del mismo. Si el número de Reynolds es muy superior a la unidad, entonces las fuerzas viscosas son despreciables frente a las inerciales de manera que se puede considerar que el fluido es ideal.

La expresión que permite calcular el número de Reynolds es la siguiente:

$$Re_L = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (ec. 10)$$

donde ρ es la densidad, v la velocidad media, μ la viscosidad dinámica, ν la viscosidad cinemática del fluido y L es la longitud característica del sistema [m].

De este modo, la definición concreta del número de Reynolds depende del sistema que se está estudiando. Como en el caso que se va a abordar en este proyecto, el fluido circula por el interior de una tubería de sección circular, la longitud característica es el diámetro de la tubería, D , por lo que reescribiendo la ecuación 10 se obtiene lo siguiente:

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (ec. 11)$$

El número de Reynolds juega un papel importante en la previsión del patrón de comportamiento de un fluido bajo unas ciertas condiciones, ya que sirve para determinar si este está en régimen laminar o turbulento. Cuando las fuerzas viscosas son dominantes, es decir, se obtiene un valor del número de Reynolds bajo, se dice que el régimen es laminar, mientras que cuando son las fuerzas de inercia las que dominan sobre las viscosas, el fluido estará en régimen turbulento. No obstante, el cambio de un régimen a otro no es tan brusco ni tiene lugar a un número de Reynolds perfectamente definido, sino que existe un régimen, denominado régimen de transición, en el cual el fluido tiene un comportamiento intermedio entre laminar y turbulento.

Para el caso de un fluido en un conducto de sección circular se considera que el paso de un régimen a otro tiene lugar para los siguientes valores del número de Reynolds:

- $Re < 2300 \rightarrow$ Régimen laminar.

El fluido sigue un comportamiento laminar, el cual se caracteriza por un movimiento ordenado, estratificado, suave y predecible, es decir, las líneas de corriente están alineadas, como puede verse en la figura 3. En otras palabras, el fluido fluye en capas o láminas paralelas a la pared del conducto, las cuales se mueven unas sobre otras a diferentes velocidades sin entremezclarse. Por lo general, el flujo laminar tiende a ocurrir a velocidades relativamente bajas o altas viscosidades.

En régimen laminar, el perfil de velocidades es parabólico con un flujo mínimo en las cercanías de la superficie sólida. La velocidad de flujo máxima se encuentra en el centro de la tubería y es igual al doble de la velocidad media en la sección transversal.

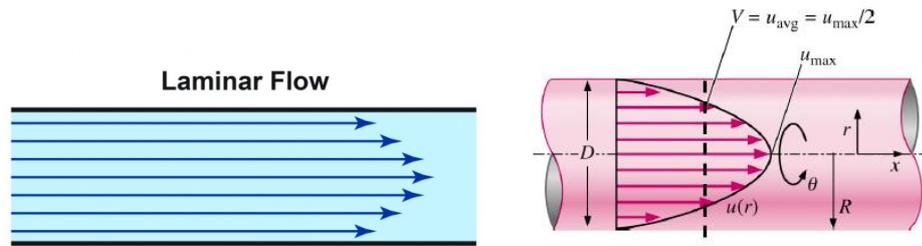


Figura 3 Comportamiento del fluido en régimen laminar y perfil de velocidades. Thermal Engineering y Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.

- $2300 \leq Re \leq 4000 \rightarrow$ Régimen de transición.
 En este caso, los regímenes laminar y turbulento cohabitan en el mismo flujo. El flujo transicional tiene lugar cuando las láminas paralelas que sigue el fluido, características del régimen laminar, comienzan a ondularse y romperse de forma brusca y difusa.

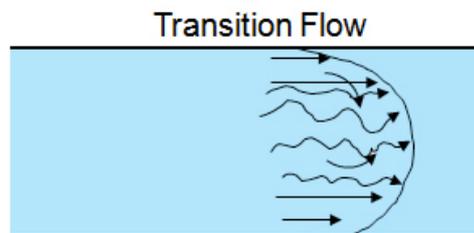


Figura 4 Comportamiento del fluido en régimen transicional. Imagen modificada de Semantic Scholar.

- $Re > 4000 \rightarrow$ Régimen turbulento.
 El comportamiento turbulento del fluido se caracteriza por un movimiento irregular, caótico e impredecible del mismo, dominado por la aparición de vórtices (remolinos). A diferencia del régimen laminar, el fluido no fluye en láminas paralelas, sino que hay una mezcla intensiva entre ellas, es decir, las líneas de corriente no están alineadas. El flujo turbulento tiende a producirse debido a velocidades relativamente altas y baja viscosidad, aunque también por la presencia de obstáculos en su camino como codos o válvulas.
 El perfil de velocidades promedio en este tipo de régimen es más llano (o cuadrado) en la sección central de la tubería que en régimen laminar y cae rápidamente cerca de las paredes. Se habla de perfil de velocidades promedio porque, en flujo turbulento, la velocidad en un punto experimenta continuos cambios en magnitud y dirección, como se ilustra en la siguiente figura.

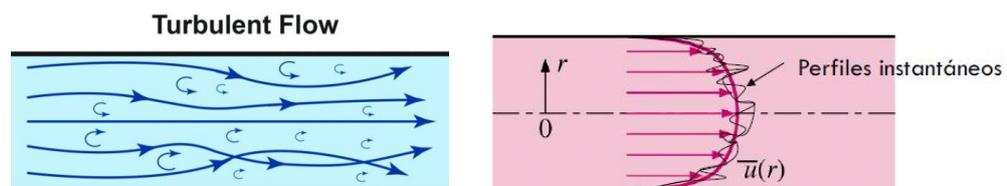


Figura 5 Comportamiento del fluido en régimen turbulento y perfil de velocidades. Thermal Engineering y Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.

4.1.4 Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad expresa el principio de conservación de la masa, es decir, establece que en un volumen fluido finito y cerrado no hay creación ni destrucción de masa. Dicho de otra forma: dado un fluido que circula por un conducto, la masa de fluido que entra es igual a la masa de fluido que sale.

Se considera un tubo de corriente estrecho, en el cual v_1 es la velocidad de una partícula fluida en el punto 1 y v_2 la velocidad de la partícula fluida en el punto 2, con A_1 y A_2 las secciones transversales del tubo en los puntos 1 y 2, tal y como muestra la figura 6.

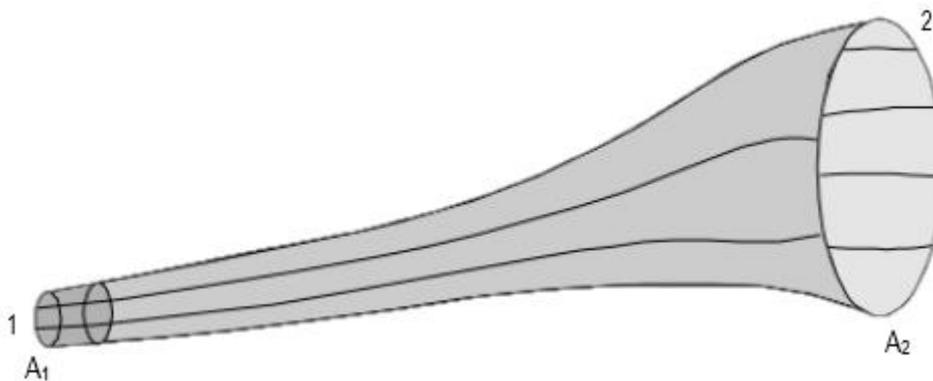


Figura 6 Tubo de corriente estrecho. Imagen modificada de Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Madrid.

En un intervalo de tiempo dt , la masa de fluido con velocidad v [m/s] que atraviesa la superficie A [m^2] es:

$$dm = \rho A v dt \quad (ec. 12)$$

donde ρ es la densidad del fluido al pasar por la sección A en kg/m^3 .

Por otra parte, el flujo o caudal másico, \dot{m} [kg/s], se define como la masa que atraviesa una sección por unidad de tiempo y tiene la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho A v \quad (ec. 13)$$

Asimismo, el flujo o caudal volumétrico, Q [m^3/s], se define como el volumen de fluido que atraviesa una superficie por unidad de tiempo. Teniendo en cuenta que $\rho = \frac{dm}{dV}$, entonces:

$$dV = \frac{dm}{\rho} = A v dt \quad (ec. 14)$$

Por tanto, el caudal volumétrico viene dado por:

$$Q = \frac{dV}{dt} = A v \quad (ec. 15)$$

Particularizando la ecuación 13 para las secciones 1 y 2 se tiene que el caudal másico a través de la sección A_1 es $\dot{m}_1 = \rho_1 A_1 v_1$ y a través de la sección A_2 es $\dot{m}_2 = \rho_2 A_2 v_2$. Considerando régimen estacionario y que no hay fuentes ni sumideros de partículas, ambos caudales deben ser iguales.

$$\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$
$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 = cte.$$

De modo que, genéricamente, la ecuación de continuidad o ley de conservación de la masa puede escribirse de la siguiente forma:

$$\rho A v = cte. \quad (ec. 16)$$

Para el caso particular de fluido incompresible, como es el caso de los líquidos, la densidad ρ permanece constante independientemente del punto en el que nos encontremos en el tubo de corriente, por lo que la ecuación de continuidad toma la siguiente expresión:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = cte. \rightarrow Q_1 = Q_2 = cte.$$
$$A v = cte. \rightarrow Q = cte. \quad (ec. 17)$$

4.1.5 Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también conocido como ecuación de Bernoulli, establece que la energía mecánica es constante a lo largo de una línea de corriente en los flujos de fluidos ideales que cumplen las condiciones que a continuación se mencionan:

- Fluido ideal (fricción viscosa despreciable).
- Fluido incompresible.
- Flujo (casi) estacionario.
- Se aplica a lo largo de una línea de corriente.
- No existe transferencia de calor ni una máquina en la línea de corriente.

Por tanto, la ecuación de Bernoulli puede obtenerse a través de la ley de conservación de la energía, $\delta U = \delta Q + \delta W$, la cual, teniendo en cuenta lo acabado de comentar, toma la siguiente expresión:

$$\delta U = \delta W \quad (ec. 18)$$

Se considera un tubo de corriente estrecho, como el de la figura 7, por el que circula un fluido ideal en régimen estacionario, ya que así la velocidad en las secciones transversales del tubo de corriente puede ser considerada uniforme.

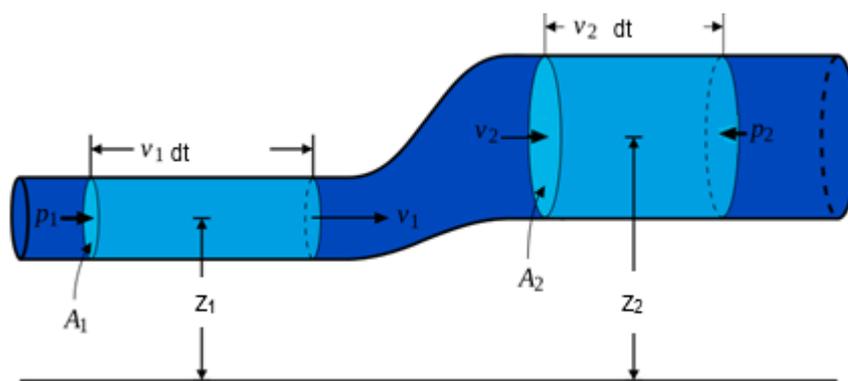


Figura 7 Tubo de corriente estrecho. Imagen modificada de Hidrostática - Hidrodinámica blog.

En primer lugar, se halla el trabajo realizado en un intervalo de tiempo dt por las fuerzas de presión sobre el fluido que está en la región limitada por las secciones A_1 y A_2 y el tubo de corriente. El fluido que se encuentra a la izquierda de la superficie A_1 ejerce sobre ésta

una fuerza $F_1 = P_1 A_1$, perpendicular a la superficie, y en el intervalo de tiempo dt recorre una longitud $dx_1 = v_1 dt$. Teniendo en cuenta que el trabajo realizado en tal extremo del tubo de corriente se puede definir como $dW = \vec{F} \cdot d\vec{x}$ y que la fuerza \vec{F} y $d\vec{x}$ tienen el mismo sentido, entonces:

$$\delta W_1 = F_1 dx_1 = P_1 A_1 v_1 dt$$

Empleando el mismo razonamiento para el fluido que se encuentra a la derecha de la superficie A_2 y teniendo en cuenta que ahora la fuerza \vec{F} y $d\vec{x}$ tienen sentidos opuestos, se tiene que:

$$\delta W_2 = F_2 dx_2 = -P_2 A_2 v_2 dt$$

Por tanto, el trabajo realizado sobre el fluido es:

$$\delta W = \delta W_1 + \delta W_2 = P_1 A_1 v_1 dt - P_2 A_2 v_2 dt \quad (ec. 19)$$

Teniendo en cuenta la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles, ecuación 17, la expresión anterior puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \delta W &= (P_1 - P_2) A_1 v_1 dt = (P_1 - P_2) A_2 v_2 dt \\ \delta W &= (P_1 - P_2) dV \quad (ec. 20) \end{aligned}$$

donde dV es el volumen del elemento infinitesimal.

Asimismo, este trabajo realizado sobre el fluido debe traducirse en un aumento de su energía total en el campo gravitatorio. Así, hay un cambio de la energía cinética en la región $A_1 - A_1'$ que se acaba de abandonar y en la región $A_2 - A_2'$ que se acaba de ocupar, donde A_1' y A_2' se refieren al final de las secciones 1 y 2 respectivamente; también hay un cambio en la energía potencial gravitatoria.

En lo que se refiere a la variación de energía cinética entre los puntos 1 y 2, esta es:

$$\delta E_c = \delta E_{c_2} - \delta E_{c_1} = \frac{1}{2} dm_2 v_2^2 - \frac{1}{2} dm_1 v_1^2$$

Teniendo en cuenta el principio de conservación de la masa (ecuación de continuidad): $dm = dm_1 = dm_2$, de manera que si se reescribe la expresión anterior se obtiene que la variación de energía cinética entre 1 y 2 es:

$$\delta E_c = \frac{1}{2} dm (v_2^2 - v_1^2)$$

Y, en cuanto a la variación de energía potencial entre los puntos 1 y 2:

$$\begin{aligned} \delta E_p &= \delta E_{p_2} - \delta E_{p_1} = g dm_2 z_2 - g dm_1 z_1 \\ \delta E_p &= g dm (z_2 - z_1) \end{aligned}$$

donde z_1 y z_2 es la altura de los puntos 1 y 2 respectivamente, como puede verse en la figura anterior.

Por tanto, el cambio en la energía total en el campo gravitatorio queda del siguiente modo:

$$\delta U = \delta E_c + \delta E_p = \frac{1}{2} dm (v_2^2 - v_1^2) + g dm (z_2 - z_1) \quad (ec. 21)$$

Volviendo a la ecuación de conservación de la energía (ecuación 18) y sustituyendo ambos términos por las ecuaciones 20 y 21, tenemos que:

$$\delta U = \delta W$$

$$\frac{1}{2} dm (v_2^2 - v_1^2) + g dm (z_2 - z_1) = (P_1 - P_2) dV$$

Teniendo en cuenta que $dV = \frac{dm}{\rho}$, se puede reescribir la ecuación anterior del siguiente modo:

$$\frac{1}{2} dm (v_2^2 - v_1^2) + g dm (z_2 - z_1) = (P_1 - P_2) \frac{dm}{\rho}$$

Simplificando y agrupando términos se obtiene la ecuación de Bernoulli expresada en unidades de presión:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + g \rho z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + g \rho z_2 = cte.$$

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = cte. \quad (ec. 22)$$

o bien expresada en unidades de altura [m], siendo esta la forma más habitual en la hidráulica:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 = cte.$$

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = cte. \quad (ec. 23)$$

Donde:

- $\frac{P}{\rho g}$ es la altura de presión, que representa la energía por unidad de peso debida a las fuerzas de presión.
- $\frac{v^2}{2g}$ es la altura cinética, que representa la energía cinética por unidad de peso del fluido en el punto considerado.
- z es la altura geométrica, que representa la energía potencial gravitatoria del fluido por unidad de peso.

En la ecuación 22 es posible identificar los conceptos de presión estática, presión dinámica y presión hidrostática que se explicaron en el apartado 4.1.1.1.

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = cte.$$

$$P_T = P_{estática} + P_{dinámica} + P_{hidrostática} = cte.$$

Esto da lugar a otra forma de enunciar la ecuación de Bernoulli, pues, tal y como muestra la ecuación anterior, en un flujo de un fluido incompresible, ideal y estacionario, la presión total es constante a lo largo de una línea de corriente.

Cabe mencionar que, en un conducto, la diferencia de altura es despreciable de manera que $z \cong cte.$ y, por tanto, la presión hidrostática no se tiene en cuenta, pasando a ser, entonces, la presión total igual a la suma de la presión estática y la presión dinámica.

4.1.5.1 Ecuación de Bernoulli generalizada

Como se indicó anteriormente, para la deducción de la ecuación de Bernoulli una de las suposiciones efectuadas es la condición de fluido ideal. No obstante, en los fluidos reales la fricción viscosa no puede considerarse despreciable debido a las pérdidas de carga a las que da lugar.

Además, a mayores de la disipación de energía producida por tales fuerzas de rozamiento, la conservación de la energía del flujo también puede verse alterada por la

presencia de distintas máquinas hidráulicas. Estas pueden aportar energía mecánica al flujo (bombas) o extraérsela (turbinas).

Por tanto, el balance energético completo de un fluido real viscoso entre dos puntos del mismo debe tener en cuenta estas contribuciones acabadas de comentar. La siguiente figura refleja los cambios que es necesario efectuar en la ecuación de Bernoulli para considerar tales aspectos.

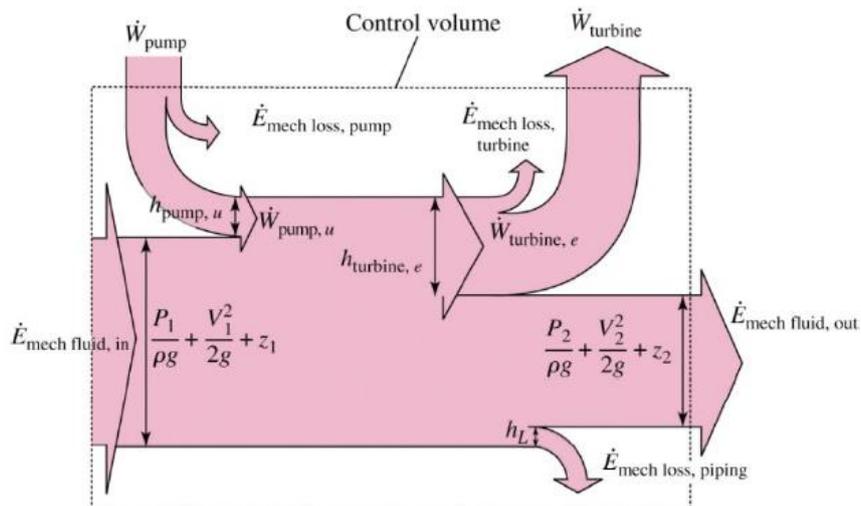


Figura 8 Balance energético entre los puntos 1 y 2 de un fluido real viscoso. Apuntes de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.

Teniendo en cuenta la figura anterior se llega a la ecuación de Bernoulli generalizada, la cual se obtiene añadiéndole uno o dos términos (en función de si hay máquinas hidráulicas o no) a la ecuación 23.

- Sin máquina.

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) = H_1 - H_2 = h_L \quad (ec. 24)$$

- Con máquina.

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) = H_{turbina} - H_{bomba} + h_L \quad (ec. 25)$$

Donde:

- H_{bomba} [m] es la altura de carga de la bomba o altura aportada por la bomba al fluido.
- $H_{turbina}$ [m] es la altura de carga de la turbina o altura suministrada por el fluido a la turbina.
- h_L [m] es la altura de pérdidas de carga totales. Estas a su vez se dividen en dos tipos:

$$h_L = h_f + \sum_i h_{m,i} \quad (ec. 26)$$

- h_f [m] es la altura de pérdidas de carga regulares, las cuales son debidas a la fricción viscosa entre el fluido y la pared sólida, y vienen dadas por la ecuación de Darcy – Weisbach.

$$h_f = f \frac{v^2 L}{2 g D} \quad (ec. 27)$$

En la ecuación anterior f es el coeficiente de fricción y L es la distancia de separación entre las dos secciones entre las que se está calculando la pérdida de carga.

- $h_{m,i}$ [m] es la altura de pérdidas de carga singulares. Estas se deben a las recirculaciones fluidas y vórtices en singularidades a lo largo de la tubería (codos, expansiones, contracciones, válvulas, etc.). Se obtienen a través de la siguiente expresión:

$$h_m = K \frac{v^2}{2 g} \quad (ec. 28)$$

donde K es el coeficiente de pérdidas del accesorio o singularidad.

Sustituyendo las expresiones de ambos tipos de pérdidas de carga en la ecuación 26 se tiene que la altura de pérdida de carga total h_L en una tubería de diámetro D con n elementos es:

$$h_L = f \frac{v^2 L}{2 g D} + \sum_i K_i \frac{v^2}{2 g} \rightarrow h_L = \frac{v^2}{2 g} \left(f \frac{L}{D} + \sum_i K_i \right) \quad (ec. 29)$$

4.2 Medidores de caudal volumétrico

La medición del flujo es una herramienta básica en la industria, la ingeniería y la investigación. El dispositivo empleado para ello, conocido como medidor de flujo, mide la tasa de flujo en un conducto abierto o cerrado. Hay dos formas básicas de medir el flujo: en base volumétrica o másica. En el presente trabajo se tratará la primera.

Las principales técnicas disponibles para medir el caudal volumétrico se recogen a continuación [15]:

- Medidores de presión diferencial (tipo obstrucción).
También son conocidos como medidores de obstrucción o medidores de restricción de flujo e implican la inserción de algún dispositivo en una tubería de transporte de fluido, el cual causa una restricción y crea una diferencia de presión a cada lado del mismo. La medida de esta caída de presión permite obtener el caudal aplicando la ecuación de Bernoulli.
Los dispositivos utilizados para generar tal obstrucción del flujo incluyen la placa de orificio, el tubo Venturi, boquillas de flujo y el tubo de flujo Dall, y se ilustran en la siguiente figura.

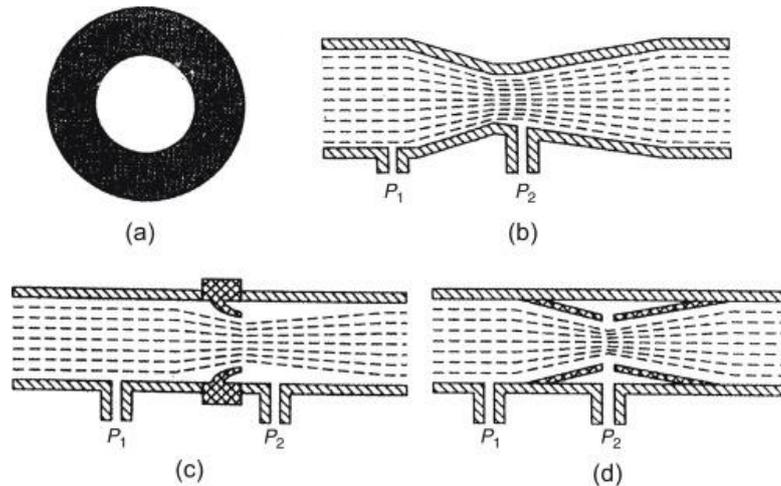


Figura 9 Medidores de presión diferencial: a) Placa de orificio; b) Tubo Venturi; c) Boquilla de flujo; d) Tubo de flujo Dall. Flow Measurement. Alan S. Morris and Reza Langari.

- Caudalímetros de área variable.
En su forma más simple, este instrumento también conocido como rotámetro, consiste en un tubo de vidrio ahusado que contiene un flotador que puede moverse libremente dentro del mismo, como muestra la figura 10. El flujo de fluido hace que el flotador se eleve hasta la posición de equilibrio entre su peso y la fuerza de empuje hacia arriba debido a la presión diferencial a través de él. La posición del flotador es una medida del área anular efectiva de paso del flujo y, por tanto, es una indicación del caudal.

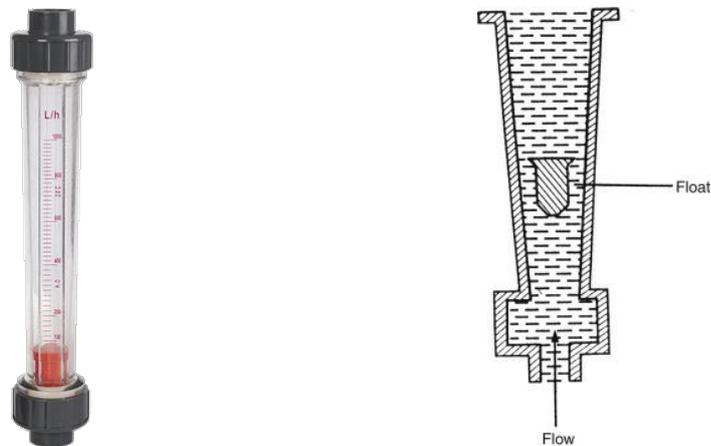


Figura 10 Rotámetro. Manometría Instrumentación y Flow Measurement. Alan S. Morris and Reza Langari.

- Caudalímetros de desplazamiento positivo.
Estos caudalímetros operan dividiendo el fluido que pasa a través de un conducto en volúmenes discretos en función de las dimensiones físicas del medidor y los cuentan o totalizan. Son medidores mecánicos en los que una o más partes móviles están ubicadas en la corriente de flujo donde separan físicamente el fluido en incrementos.

- Medidores de turbina.
Un caudalímetro de turbina consiste en una rueda de múltiples palas montada en una tubería a lo largo de un eje paralelo a la dirección del flujo de fluido. Este, al pasar por la rueda hace que gire a una velocidad angular que es proporcional a la velocidad del fluido y, por tanto, al caudal volumétrico. La velocidad de rotación se controla en la mayoría de los casos mediante una bobina de captación magnética, que se instala en el exterior de la carcasa del medidor.

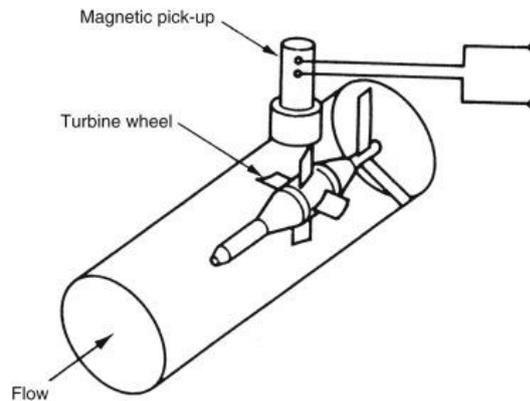


Figura 11 Caudalímetro de turbina. Flow Measurement. Alan S. Morris and Reza Langari.

- Caudalímetros electromagnéticos.
Estos caudalímetros funcionan según la ley de inducción electromagnética de Faraday, que establece que se inducirá un voltaje cuando un conductor se mueva a través de un campo magnético. El fluido sirve como conductor y el campo magnético se crea colocando bobinas energizadas por la red a cada lado de la tubería; el voltaje inducido en el fluido se mide mediante dos electrodos insertados en lados opuestos del tubo. Medido el voltaje, por la ley de Faraday se puede calcular la velocidad del fluido y con ella el caudal volumétrico.

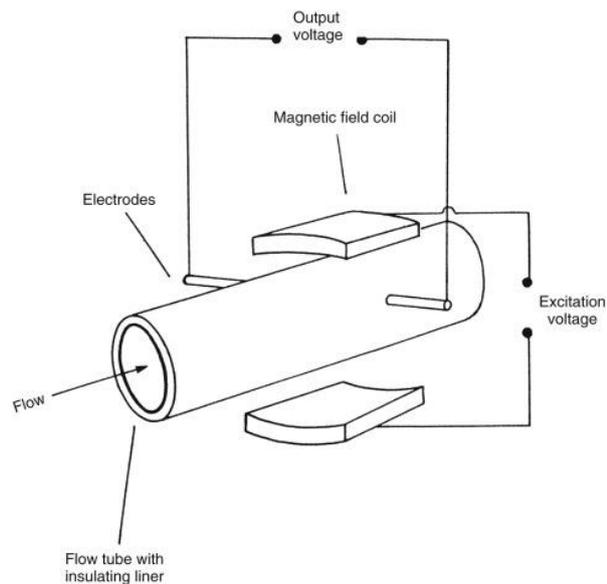


Figura 12 Caudalímetro electromagnético. Flow Measurement. Alan S. Morris and Reza Langari.

- **Caudalímetros de desprendimiento de vórtice.**
Este tipo de medidores se basan en el fenómeno natural de desprendimiento de vórtices, creado al colocar un obstáculo no aerodinámico en una tubería. Como este no es aerodinámico, el fluido no es capaz de seguir sus contornos en el lado aguas abajo de manera que se crean perturbaciones en el flujo llamadas vórtices. La frecuencia del desprendimiento es proporcional a la velocidad del fluido.
- **Caudalímetros ultrasónicos.**
El medidor de flujo ultrasónico mide la velocidad del sonido en el fluido e inferencialmente calcula la velocidad de este. Existen dos tipos diferentes que emplean distintas tecnologías para la medición: una basada en el desplazamiento Doppler y la otra en el tiempo de tránsito. En el primer caso, el transmisor de un medidor de tipo Doppler proyecta un haz ultrasónico en la corriente que fluye; los elementos de dispersión (partículas sólidas, burbujas de gas...) provocan un cambio de frecuencia entre la energía transmitida y la reflejada, cuya medición permite inferir la velocidad del fluido. En el segundo caso, los dispositivos miden el flujo midiendo el tiempo que tarda un pulso de energía ultrasónica en atravesar una sección de tubería tanto a favor como en contra del fluido dentro de la tubería.
- **Caudalímetros de canal abierto.**
Estos caudalímetros miden el flujo de líquidos en canales abiertos. El procedimiento normal consiste en construir un vertedero o canal de ancho constante y medir la altura del líquido cuando pasa sobre él.

En el presente trabajo se emplea un medidor de flujo de tipo presión diferencial: la placa de orificio.

4.3 Placas de orificio

Con motivo de que el dispositivo de placa de orificio es el elemento de estudio y con el que se trabajará, como se acaba de comentar, se procede a realizar una explicación acerca del mismo.

4.3.1 Definición

El medidor de flujo de presión diferencial es la forma más común de medidor de flujo utilizado en la industria. Según estudios recientes, este tipo de caudalímetro representa aproximadamente la mitad de todos los caudalímetros industriales empleados en la industria y, entre ellos, el más frecuente es el medidor de flujo de placa de orificio. La razón de esto es que es simple de construir, tiene un bajo coste de mantenimiento y una amplia aplicabilidad en diferentes fluidos.

De acuerdo con la norma UNE-EN ISO 5167-1:2003 [24], el dispositivo de placa de orificio se define de la siguiente forma: *“placa delgada en la que ha sido mecanizado un orificio circular”*.



Figura 13 Placas de orificio. Serie de caudalímetros de orificio compacto de Rosemount.

Por tanto, tal y como se puede observar en la figura 13, básicamente se trata de una placa delgada en forma de disco con uno o varios orificios fabricada, por lo general, en metal. Esta abertura o aberturas permiten el paso del fluido. La placa de orificio se instala entre dos tramos de tubería y se colocan tomas de presión antes y después de ella para medir la diferencia de presión que se origina y poder estimar el caudal del fluido a través de la ecuación de Bernoulli.

4.3.2 Descripción

Los diversos tipos de medidores de orificio normalizados son semejantes, diferenciándose cada uno en la disposición de las tomas de presión. Las placas de orificio normalizadas se describen como “placas delgadas” y “con cantos vivos” ya que el espesor de la placa es pequeño en comparación con el diámetro de la sección de medida y el canto del orificio aguas arriba es agudo y a escuadra [24].

La figura 14 muestra el plano axial de la sección transversal de una placa de orificio normalizada.

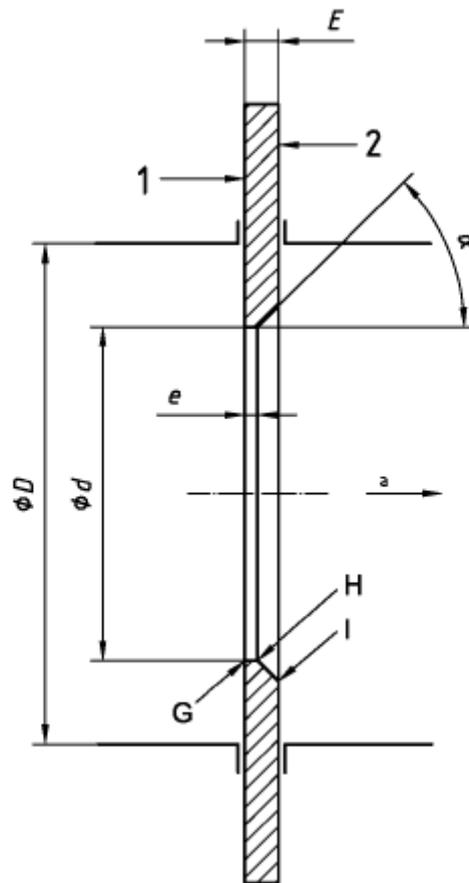
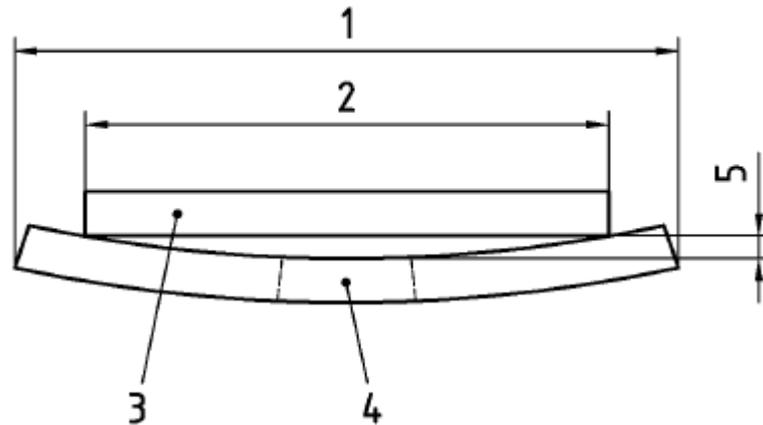


Figura 14 Sección transversal de una placa de orificio normalizada. Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003.

El significado de cada letra, número y símbolo que aparece en la imagen se detalla a continuación, comentando también los requisitos más importantes que es necesario que cumpla cada uno de los parámetros de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 5167-2:2003 [25].

- **D**: diámetro interno de la tubería.
- **d**: diámetro del orificio.
El orificio debe ser cilíndrico y de diámetro mayor o igual a 12,5 mm. La relación de diámetros $\beta = \frac{d}{D}$ debe ser siempre mayor o igual a 0,10 y menor o igual a 0,75.
- **1**: cara de la placa de orificio aguas arriba.
La cara de la placa aguas arriba debe ser plana en el momento en que se instala en la tubería con presión diferencial cero a través de ella. Se considera que es plana cuando el máximo huelgo entre la placa y el canto recto de longitud D es menor de $0,005 \frac{(D-d)}{2}$. Esto resulta más sencillo de comprender gracias a la siguiente imagen.



Leyenda

- 1 diámetro exterior de la placa de orificio
- 2 diámetro interno del conducto (D)
- 3 canto recto
- 4 orificio
- 5 desviación de planeidad (medida en el canto del orificio)

Figura 15 Medida de la planeidad de una placa de orificio. Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003.

Tal y como puede verse en la figura, el área crítica para la condición de planeidad se encuentra en la región del orificio de la placa.

Además, esta cara de la placa de orificio deberá tener un criterio de rugosidad de $Ra < 10^{-4}d$, dentro de un círculo de diámetro no menor de D y concéntrico con el orificio, donde Ra es la desviación media aritmética del perfil.

- **2:** cara de la placa de orificio aguas abajo.
La cara aguas abajo debe ser plana y paralela a la cara aguas arriba, y no es necesario proporcionarle el mismo acabado de elevada calidad que a esta, con excepción de las placas de orificio bidireccionales, en las que sí lo es ya que están pensadas para medir flujos opuestos.
- **a:** dirección del flujo.
- **e:** espesor del orificio.
Su valor debe estar comprendido entre $0,005D$ y $0,02D$. Puede designarse también como t .
- **E:** espesor de la placa de orificio.
El espesor de la placa de orificio, E o L , debe tener un valor comprendido entre e y $0,05D$. No obstante, cuando el diámetro interno de la tubería, D , pertenezca al rango de valores entre 50 mm y 64 mm ambos inclusive, es aceptable un espesor de placa de orificio, E , de hasta 3,2 mm.
- **α :** ángulo del bisel.
El biselado se hace en el lado aguas abajo cuando el espesor de la placa de orificio, E , es superior al espesor del orificio, e . El ángulo del bisel también se designa como θ y su valor debe ser de $45^\circ \pm 15^\circ$, aproximadamente. La superficie biselada debe estar bien acabada (sin imperfecciones).

- **G, H, I:** cantos (bordes) del orificio de la placa de orificio.
El canto aguas arriba, G, debe ser recto y se considera así cuando el ángulo entre el taladro del orificio y la cara aguas arriba de la placa de orificio es de $90^\circ \pm 0,3^\circ$. El taladro del orificio se sitúa en la zona de la placa de orificio entre G y H. Además, no debe tener defectos a simple vista, tales como rebabas, golpes o muescas.
Los cantos H e I aguas abajo no tienen unos requisitos de calidad tan rigurosos como los del canto G, por lo que son aceptables pequeños defectos.

No obstante, las especificaciones de las placas de orificio normalizadas también pueden describirse atendiendo al informe AGA nº 3 o la norma ASME MFC-3M. Los tres estándares se refieren al mismo diseño de placa de orificio, pero presentan diferencias en los requerimientos de sus parámetros. Por ejemplo, de acuerdo con el informe AGA nº 3, el mínimo espesor del orificio se define por el mayor valor entre $e \geq 0,01d$ o $e \geq 0,127 \text{ mm}$ y el máximo se define por el menor valor entre $e \leq 0,02D$ o $e \leq 0,125d$, mientras que el espesor de la placa de orificio, E , depende de la presión diferencial.

4.3.3 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de una placa de orificio es sencillo y se basa, al igual que el de todos los medidores de flujo de tipo diferencial, en el efecto Venturi.

El dispositivo de placa de orificio, como se ha visto, consiste en un disco metálico con un orificio circular en el centro (o no) de diámetro d_0 alojado en una tubería recta de un diámetro d_1 o D y un espesor L_0 (figura 16.a). Las áreas de la sección transversal para la placa de orificio y la tubería son $A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$ y $A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$, respectivamente.

El fluido, al pasar a través del orificio, sufre una restricción en su sección transversal, dando lugar, a un aumento de la velocidad y, en consecuencia, a una disminución de la presión. El punto en el cual el área transversal del flujo es mínima, A_{vc} , se denomina vena contracta y en él se tendrá la máxima velocidad del fluido y, por tanto, el mínimo valor de presión, P_{vc} .

Aguas abajo de la vena contracta, el fluido se expande, lo que produce una disminución de la velocidad del flujo y una recuperación parcial de la presión, pero esta nunca llega a alcanzar el valor que tenía aguas arriba de la placa de orificio, incurriendo en una pérdida de presión permanente en el flujo. Esto se debe a las pérdidas de carga que tienen lugar, tanto a las pérdidas de carga regulares como a las singulares.

Además, la repentina contracción en la circulación del fluido genera grandes remolinos, especialmente a la salida de la placa de orificio, dando lugar a la denominada zona de recirculación, la cual aumenta cuanto menor es el diámetro del orificio.

Lo acabado de comentar puede verse en las imágenes adjuntas a continuación. Cabe mencionar que, aunque en las siguientes figuras, la sección de la vena contracta coincide con la sección de paso de la restricción, no tiene por qué ser así, sino que su ubicación depende de las condiciones de presión, del caudal y, sobre todo, de las características geométricas de la placa de orificio, en especial del espesor relativo, parámetro influyente en el comportamiento de readherencia del flujo en su paso por el orificio, como se verá posteriormente.

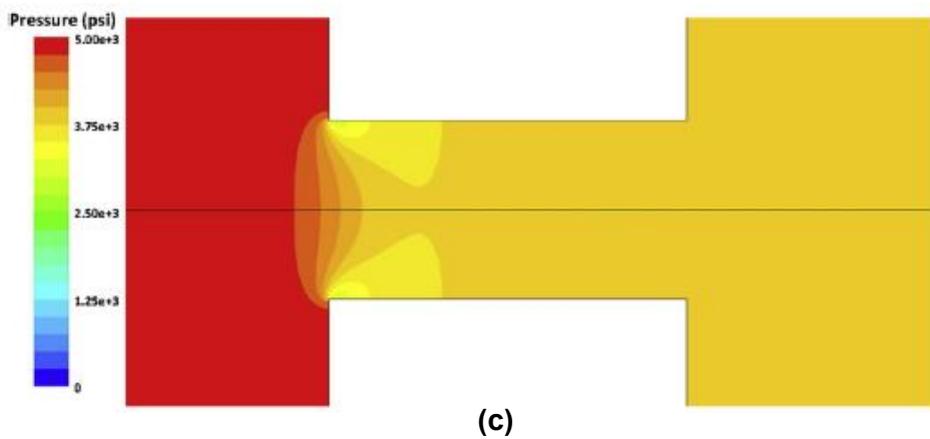
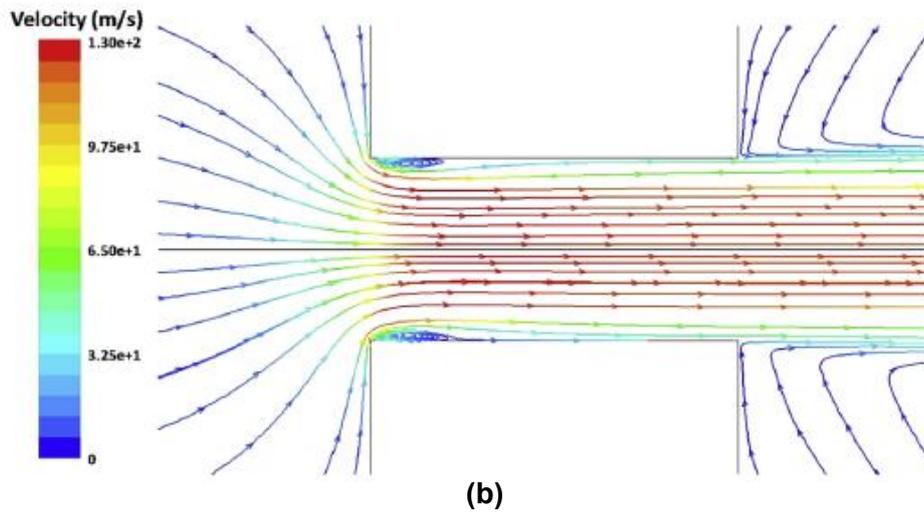
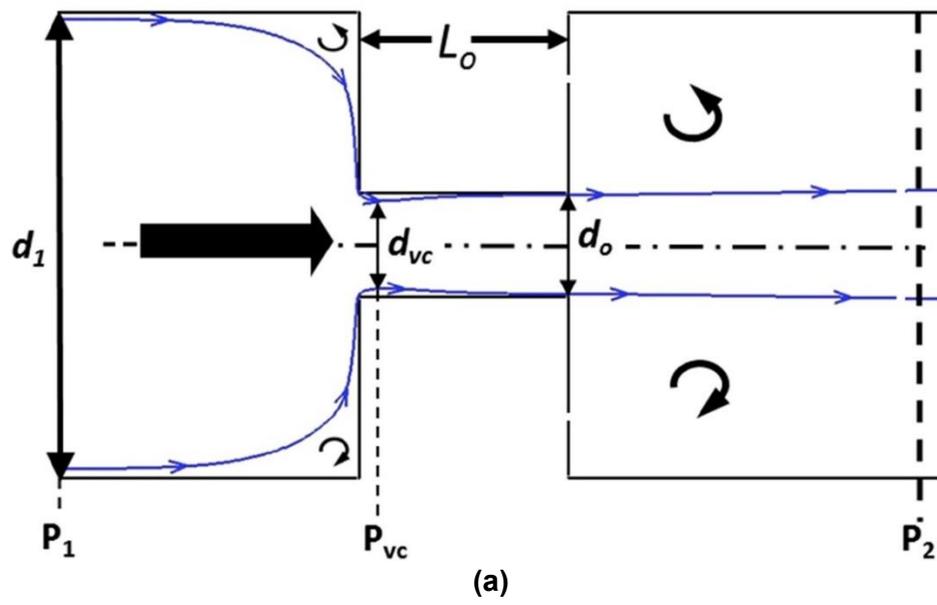


Figura 16 (a) Paso del fluido a través de una placa de orificio. (b) Líneas de corriente. (c) Distribución de la presión. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.

Resulta sencillo demostrar que la velocidad alcanza el máximo en la vena contracta, mientras que la presión se reduce a su valor mínimo con ayuda de las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli.

Recurriendo a la ecuación de continuidad, ecuación 17, y aplicándola entre los puntos 1 y la sección de la vena contracta tenemos que:

$$A_1 v_1 = A_{vc} v_{vc} = cte.$$

$$v_{vc} = v_1 \frac{A_1}{A_{vc}}$$

$$v_{vc} = v_1 \frac{d_1^2}{d_{vc}^2}$$

Como v_1 y d_1 son constantes y $d_{vc} < d_1$, entonces v_{vc} aumenta. De este modo, queda demostrado que, al disminuir la sección de paso de un fluido, este incrementa su velocidad ya que, por la ley de conservación de la masa, el caudal permanece constante.

Se recurre ahora a la ecuación de Bernoulli, ecuación 23, y se particulariza para el volumen de control formado por los puntos 1 y la vena contracta.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{vc}}{\rho g} + \frac{v_{vc}^2}{2g} + z_{vc}$$

Teniendo en cuenta que $z_1 = z_{vc}$ y despejando la presión en la vena contracta se obtiene lo siguiente:

$$P_{vc} = P_1 + \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_{vc}^2)$$

Como v_1 , ρ y P_1 permanecen constantes y v_{vc} es mayor que v_1 , entonces P_{vc} disminuye, lo que demuestra que como la velocidad en la vena contracta se incrementa, la presión estática disminuye, pudiendo disminuir por debajo de la presión de vapor (presión de saturación) del fluido a la temperatura correspondiente, dando lugar a la aparición del fenómeno de la cavitación.

Asimismo, gracias a la ecuación de Bernoulli generalizada se puede comprobar que la presión en los puntos 1 y 2 no es la misma debido a las pérdidas de carga, como se comentó con anterioridad. Como entre esos dos puntos no hay ninguna máquina hidráulica se recurre a la ecuación 24.

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) = h_L$$

Además, teniendo en cuenta que se trata de un conducto horizontal con el mismo diámetro en ambas secciones, la diferencia de alturas es nula y la velocidad constante, por lo que la ecuación anterior pasa a tener la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = h_L$$

Despejando la altura de presión aguas abajo de la placa de orificio se tiene que:

$$\frac{P_2}{\rho g} = \frac{P_1}{\rho g} - h_L$$

Con esta expresión puede verse que la presión aguas abajo de la placa de orificio es siempre inferior a la presión aguas arriba.

Por tanto, la restricción del flujo conduce a una pérdida de energía mecánica en términos de una caída de presión a través del orificio, $\Delta P = P_1 - P_2$, donde P_1 y P_2 son las presiones aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificio respectivamente. La figura 17

complementa a la imagen 16.c, ya que muestra, de una manera más gráfica y visual, la evolución de la presión estática del fluido en su paso a través de la placa de orificio y, en ella, se indica la caída de presión ΔP a la que se hace mención.

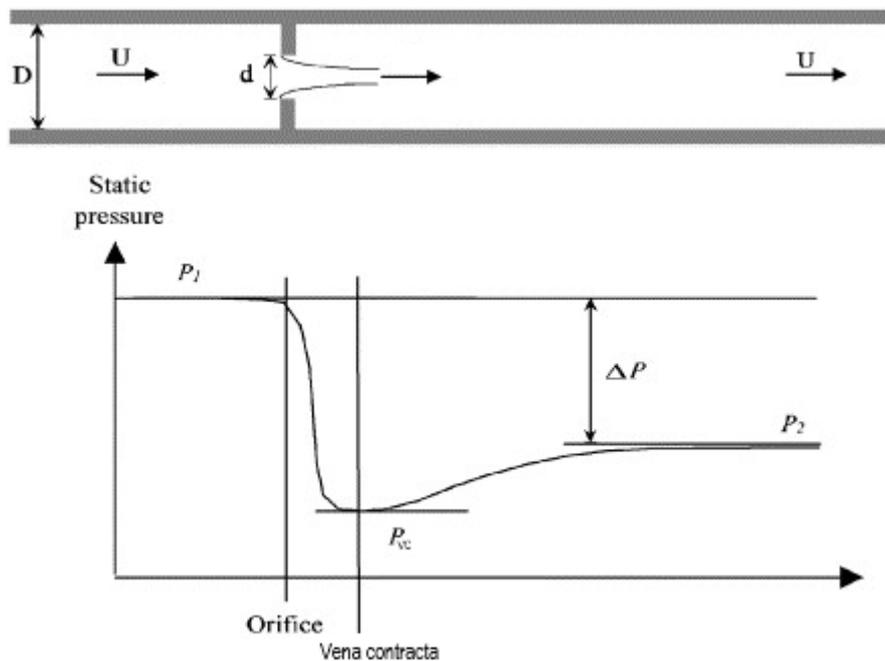


Figura 17 Flujo a través de una placa de orificio y evolución de la presión estática. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. P. Testud et al.

La medida de esta diferencia de presión ΔP permite obtener el caudal que circula aplicando la ecuación de Bernoulli junto con un coeficiente de corrección, el coeficiente de descarga, tal y como se explicará posteriormente en el apartado 4.3.6.2 *Coefficiente de descarga*.

4.3.4 Tomas de presión

Para cada placa de orificio debe instalarse, al menos, una toma de presión aguas arriba y otra aguas abajo, en una de las posiciones normalizadas, como señala la norma UNE-EN ISO 5167-2:2003 [25]. Estas son a D y $D/2$, en la brida o tomas en ángulo. A través de las tomas de presión se puede medir la presión diferencial generada y esta permite obtener el caudal.

A continuación, se comentan las tres formas normalizadas de realizar las tomas de presión de acuerdo con la norma citada anteriormente.

- Placa de orificio con tomas a D y $D/2$.
Los orificios para las tomas de presión se hacen en la propia tubería a unas distancias fijas. La separación de la toma de presión aguas arriba, l_1 , es nominalmente igual a D , aunque presenta una tolerancia de $\pm 0,1D$; y la separación, l_2 , de la toma aguas abajo es de $0,5D$, pero tiene una tolerancia de $\pm 0,02D$ cuando $\beta \leq 0,6$ y de $\pm 0,01D$ cuando $\beta > 0,6$. Ambas distancias se miden desde la cara aguas arriba de la placa de orificio. Asimismo, el diámetro de ambas tomas de presión debe ser el mismo e inferior a $0,13D$ y 13 mm.

- Placa de orificio con tomas en las bridas.
El orificio de la toma de presión se encuentra en la propia brida (porta placa) de sujeción de la placa de orificio. Es una de las configuraciones más empleadas debido a su sencillez y a que no es necesario perforar la tubería.
La toma de presión aguas arriba, nominalmente, se localiza a una distancia, l_1 , de 25,4 mm de la cara aguas arriba de la placa de orificio. La separación entre la toma de presión aguas abajo y la cara aguas abajo de la placa de orificio, l_2' , también es nominalmente de 25,4 mm. No obstante, ambos valores poseen una tolerancia de $\pm 0,5$ mm cuando $\beta > 0,6$ y $D < 150$ mm, y de ± 1 mm en todos los demás casos. Las condiciones del diámetro de las tomas de presión son las mismas que en la configuración anterior.
La siguiente imagen muestra las dos formas de realizar las tomas de presión acabadas de comentar.

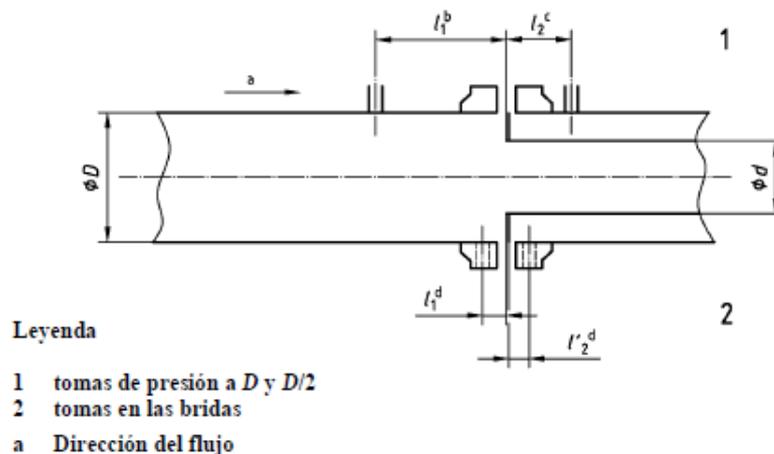
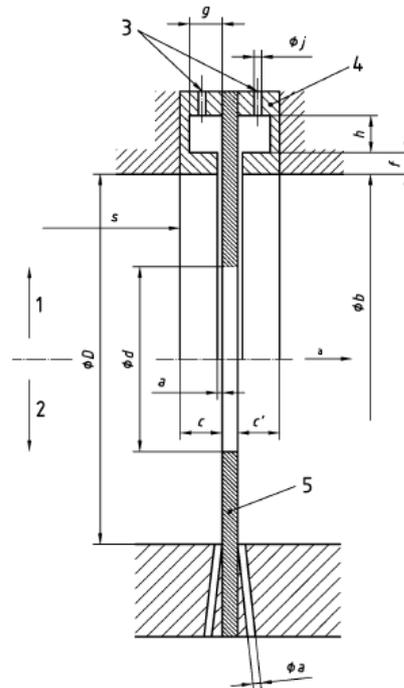


Figura 18 Placa de orificio con tomas de presión a D y $D/2$ y en las bridas. Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003.

- Placa de orificio con tomas en ángulo.
En este caso las tomas de presión se hacen directamente perforando la pared a ras de las caras de la placa.
La figura 19 ilustra las dos formas de realizar este tipo de toma de presión. La primera (parte superior de la imagen, 1) es mediante ranuras anulares en una cámara alrededor de la placa y la segunda (parte inferior, 2) a través de agujeros independientes con una pequeña inclinación.



Leyenda

- | | | |
|---|-----------------------------------|--|
| 1 | anillo portador con ranura anular | f = espesor de la ranura |
| 2 | tomas individuales | c = longitud del anillo aguas arriba |
| 3 | tomas de presión | c' = longitud del anillo aguas abajo |
| 4 | anillo portador | b = diámetro del anillo portador |
| 5 | placa de orificio | a = anchura de la ranura anular o diámetro de la toma individual |
| a | Dirección del flujo | s = distancia desde la etapa aguas arriba al anillo portador |
| | | g, h = dimensiones de la cámara anular |
| | | ϕ_j = diámetro de la toma de la cámara |

Figura 19 Placa de orificio con tomas de presión en ángulo. Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003.

El diámetro a de una toma individual y la anchura a de una ranura anular se especifican a continuación:

- Para $\beta \leq 0,65$: $0,005D \leq a \leq 0,03D$.
- Para $\beta > 0,65$: $0,01D \leq a \leq 0,02D$.

No obstante, si $D < 100 \text{ mm}$, es aceptable un valor de a de hasta 2 mm para cualquier β . También es posible especificar el valor de a en función del fluido que circula por la placa de orificio; así, para cualquier valor de β :

- Para fluidos limpios: $1 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$.
- Para vapores en el caso de cámaras anulares: $1 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$.
- Para vapores y gases licuados en el caso de tomas individuales: $4 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$.

Existen además otras formas de efectuar las tomas de presión que, aunque no son consideradas por esta norma, se suelen utilizar. Se destacan las siguientes:

- Placa de orificio con tomas en la vena contracta.
 Esta configuración es muy similar a la de la placa de orificio con tomas a D y $D/2$, pero ahora la toma de presión aguas abajo no se sitúa a una distancia fija de $0,5D$, sino a una distancia entre $0,3D$ y $0,8D$, ya que generalmente la vena contracta se origina en ese rango de ubicación, aunque depende de las características de la placa de orificio como se comentó. Esta forma de realizar las tomas de presión es interesante cuando se desea medir la máxima caída de presión y generalmente se emplea cuando el flujo es relativamente constante y la placa de orificio no se cambia.

- Placa de orificio con tomas en la tubería.
En este caso, la toma aguas arriba de la placa de orificio se instala a una distancia de $2,5D$ y la toma de presión aguas abajo, a una distancia de $8D$.

4.3.5 Clasificación

Las placas de orificio se pueden clasificar principalmente atendiendo a dos criterios. Estos son los que se citan a continuación:

- Según la ubicación y forma del orificio.
- Según la relación L/d .

4.3.5.1 Clasificación según la ubicación y forma del orificio

De acuerdo con el tipo y la posición del orificio, en la industria es posible encontrar las siguientes configuraciones típicas de placas de orificio [30].

- Placas de orificio concéntricas de borde cuadrado.
Es el tipo de placa de orificio más comúnmente utilizado. Como su propio nombre indica, el orificio recto, de ahí lo de borde cuadrado, se encuentra situado en el centro del disco y, por tanto, a lo largo de la línea central de la tubería. Aguas abajo, el orificio puede no estar biselado, es decir, el orificio es recto desde la entrada hasta la salida, o puede estarlo, como se aprecia en la siguiente figura. El biselado se suele hacer si la placa es relativamente gruesa, con el objeto de minimizar el contacto con la corriente de fluido, pues el propósito de tener un borde cuadrado es reducir este contacto.

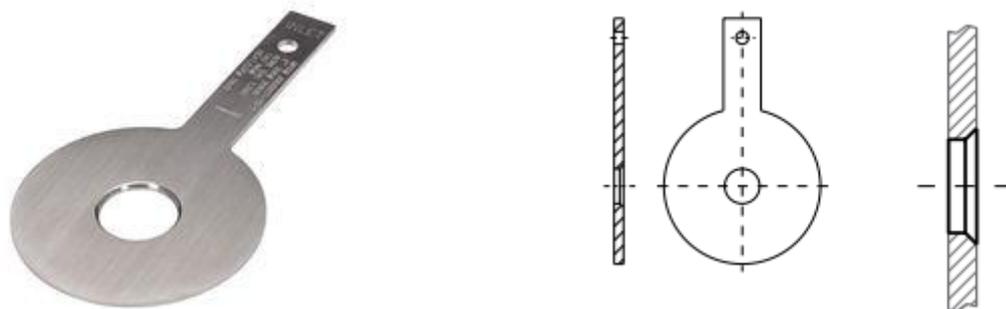


Figura 20 Placa de orificio concéntrica de borde cuadrado. Emerson y Hoja técnica WIKA FL 10.01.

Generalmente son usadas para medición de gases, líquidos con una viscosidad baja y vapor.

- Placas de orificio concéntricas con abertura de cuadrante y placas de orificio concéntricas cónicas.
Ambos tipos de placas de orificio son similares a la anterior, es decir, en las dos el orificio se encuentra en el centro del disco, pero este es diferente geoméricamente tanto respecto al anterior como entre sí. En las placas de orificio con abertura de cuadrante, el orificio tiene un borde de entrada redondeado de un determinado radio, el cual es función del diámetro del orificio; mientras que, en las placas de orificio cónicas, el orificio tiene un bisel de 45° orientado hacia arriba en el sentido de flujo

del fluido, de manera que los dos tipos de placas coinciden en que el diámetro del orificio va disminuyendo a medida que el fluido avanza en él. Los dos diseños se recomiendan para medir fluidos de alta viscosidad, por ejemplo, crudos pesados, con números de Reynolds bajos, aunque la placa de orificio con entrada cónica es preferible frente a la placa con abertura de cuadrante en fluidos que tienen números de Reynolds muy bajos.

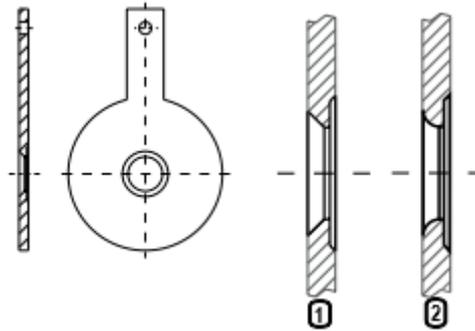


Figura 21 Placa de orificio cónica (1) y con abertura de cuadrante (2). Imagen modificada de Hoja técnica WIKA FL 10.01.

- Placas de orificio excéntricas.
Son placas con el orificio descentrado inferior o superiormente, es decir, excéntricas con respecto a la línea central de la tubería. Con gases o líquidos que contengan sólidos en suspensión, es conveniente que el orificio esté ubicado en la parte inferior de la placa, mientras que, en el caso de líquidos con gases, la abertura debería estar en la parte superior, para evitar acumulaciones.

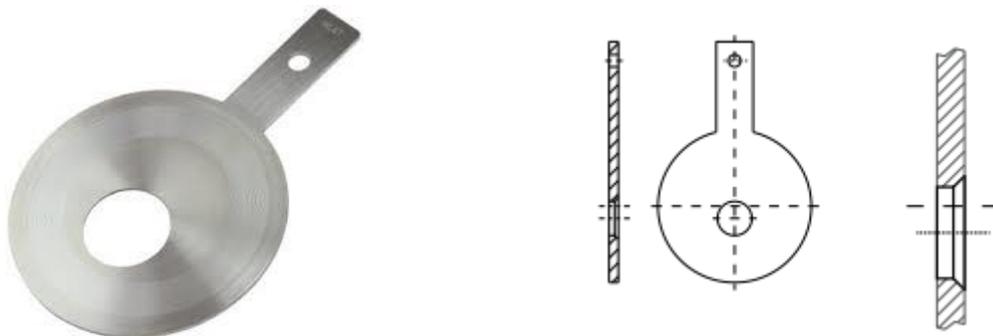


Figura 22 Placa de orificio excéntrica. Hoja técnica WIKA FL 10.01.

Este tipo de placas se emplean en muchas industrias como las de acero, papel, productos químicos pesados y ligeros, nuclear y petroquímica. Además, es frecuente su empleo en tuberías de diámetro reducido.

- Placas de orificio concéntricas segmentadas.
La diferencia con las placas de orificio concéntricas es que en este caso el orificio no es un círculo, sino que está segmentado, formando un semicírculo. La ubicación del orificio en la placa, superior o inferior, sigue el mismo criterio que las placas de orificio excéntricas en función del fluido y partículas que circulen por la tubería.

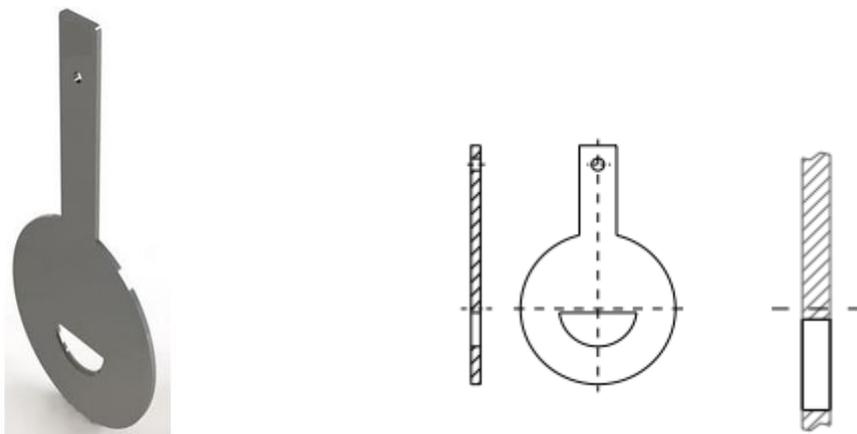


Figura 23 Placa de orificio concéntrica segmentada. Manómetros de proceso ETSA y Hoja técnica WIKA FL 10.01.

Las industrias que emplean este tipo de dispositivos incluyen tratamiento de aguas residuales, acero, química, papel y petroquímica.

Cabe mencionar que la precisión de las placas de orificio tanto excéntricas como segmentarias no es tan alta o confiable como en el caso de placas de orificio concéntricas.

La siguiente tabla recoge los medios en los que es más aconsejable el empleo de cada uno de los distintos tipos de placas de orificio comentadas anteriormente.

Medio		Placa de orificio concéntrica de borde cuadrado	Placa de orificio concéntrica con abertura de cuadrante y cónica	Placa de orificio excéntrica	Placa de orificio concéntrica segmentada
Gas	Limpio	++	-	+	+
	Sucio	-	-	++	++
Líquido	Limpio	++	++	+	+
	Viscoso	-	++	-	-
	Sucio	+	+	++	++
	Corrosivo	+	+	+	+
Vapor de agua		+	+	+	-

++ óptimo + adecuada - no adecuada

Tabla 1 Empleo de cada tipo de placa de orificio en función del medio. Hoja técnica WIKA FL 10.01.

Una alternativa al empleo de placas de orificio excéntricas o segmentadas y con el objeto de evitar las acumulaciones de sustancias no deseadas en la cara aguas arriba, en el caso de que su concentración no sea muy significativa, es mecanizar en una placa de orificio concéntrica un pequeño orificio cerca del borde de la placa. Si dicho orificio está ubicado en la parte superior para permitir el paso de burbujas de vapor o gas se denomina

orificio de ventilación (figura 24.a), mientras que si lo está en la parte inferior para dejar pasar partículas sólidas o gotas de líquido se denomina orificio de drenaje (figura 24.b).

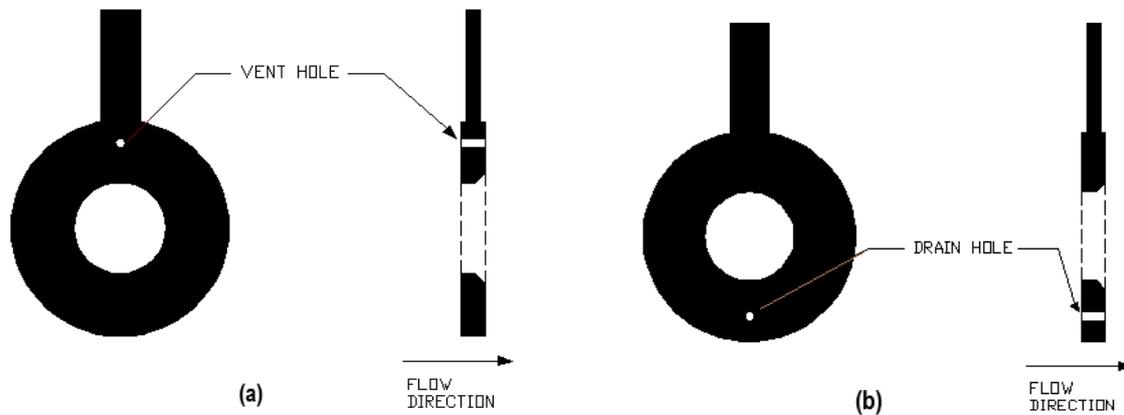


Figura 24 Placa de orificio con orificio de ventilación (a) y con orificio de drenaje (b). Inst Tools.

La adición de un orificio de ventilación o drenaje tiene un impacto insignificante en la precisión de la medida siempre y cuando el diámetro de tal orificio sea menor que el 10% del diámetro del orificio de la placa. Si se respeta esto, el flujo no medido es menos del 1% del total.

No obstante, si la cantidad de material indeseado en la corriente de fluido (burbujas, gotas o partículas) es excesiva, es más conveniente el uso de una placa de orificio excéntrica o segmentada.

4.3.5.2 Clasificación según la relación L/d

La clasificación en función de la relación entre el espesor de la placa de orificio, L , y el diámetro del orificio, d , fue introducida por Idelcik tal y como dice Pavel Rudolf en su artículo [13]. Según esta clasificación, hay dos tipos de placas de orificio: delgadas y gruesas.

- Placas de orificio delgadas.

Una placa de orificio se considera delgada si el cociente L/d es menor que dos. Cuando el fluido entra en la sección constreñida deja de estar en contacto con la pared de esta, siendo el proceso de readherencia a la superficie sólida, ya sea la pared del orificio o la de la tubería, diferente si la placa de orificio es delgada o gruesa.

En las placas de orificio catalogadas como delgadas no hay readherencia del fluido dentro del orificio, sino que este se adhiere a la pared de la tubería, aguas abajo del dispositivo, para recuperarse, es decir, para aumentar la presión local (el fluido se expande al salir del orificio); esto se conoce como readherencia simple. Lo comentado puede observarse en la figura adjunta a continuación.

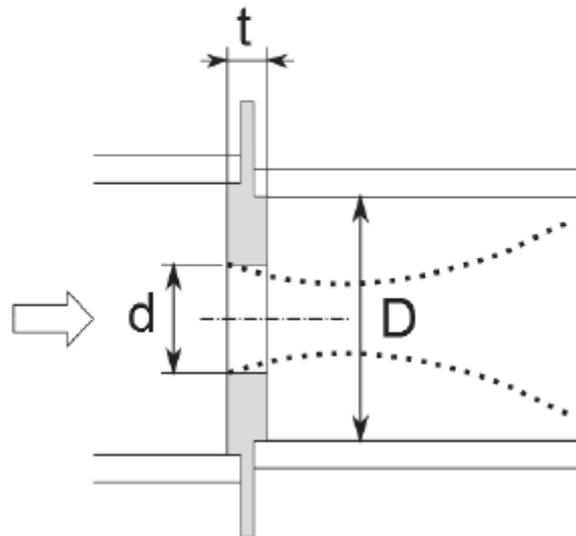


Figura 25 Placa de orificio delgada $L/d < 2$: readherencia simple. Dynamics of the cavitating flow downstream of the orifice plate. Pavel Rudolf.

Cabe señalar que, en esta figura y en la siguiente, la letra “t” no solo hace referencia al espesor del orificio, sino también al de la placa, ya que, en el caso considerado en la imagen, ambos coinciden. Como es lógico, si esto ocurre, las relaciones L/d y e/d son iguales.

- Placas de orificio gruesas.
Si la relación L/d es mayor o igual que dos, se considera que la placa de orificio es gruesa. En este caso, la readherencia del fluido tiene lugar en dos fases: en primer lugar, dentro del orificio y a continuación, en la tubería, como muestra la figura 26. En la práctica, las placas de orificio gruesas se pueden conseguir mediante orificios múltiples.

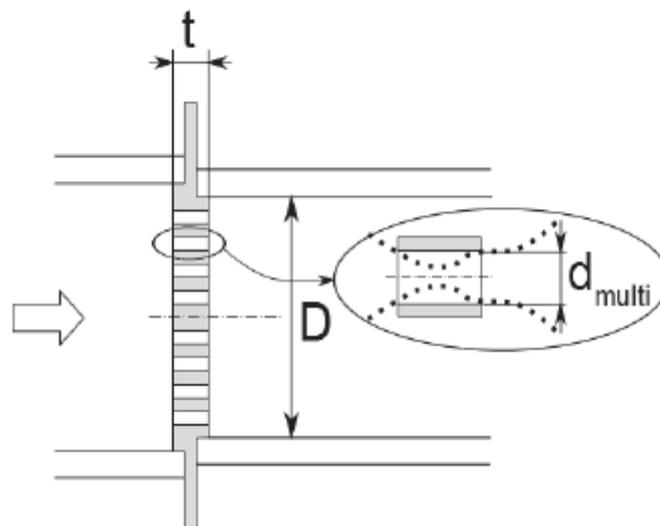


Figura 26 Placa de orificio gruesa $L/d \geq 2$: readherencia en dos fases. Dynamics of the cavitating flow downstream of the orifice plate. Pavel Rudolf.

Por otro lado, las placas de orificio también pueden clasificarse en función de si poseen un único o varios orificios.

4.3.6 Parámetros característicos

Hasta la fecha se ha llevado a cabo una extensa investigación acerca de los parámetros característicos de las placas de orificio con el fin de caracterizarlas y poder seleccionar la más adecuada en función de las condiciones que la aplicación requiera. A continuación, se explican los parámetros más importantes de estos dispositivos: la relación de contracción β , el coeficiente de descarga C_d y el coeficiente de caudal C .

4.3.6.1 Relación de contracción

El cociente entre el diámetro del orificio de la placa de orificio, d , y el diámetro interno de la tubería, D , se conoce como relación de contracción β .

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (\text{ec. 30})$$

Un valor de β bajo significa que el diámetro del orificio es pequeño en relación con el diámetro interno de la tubería de manera que hay una gran restricción en el paso del flujo, lo que provoca una caída de presión alta. Por el contrario, si el valor de β es alto, el diámetro del orificio y el interno de la tubería son parecidos por lo que el flujo tiene poca restricción en su paso y la caída de presión generada es pequeña. Precisamente es por este efecto en la caída de presión que se origina, por el cual el valor de la relación entre diámetros, β , se limita en un cierto rango que, como se ha señalado anteriormente, varía entre 0,10 y 0,75.

La relación de contracción es una de las características de las placas de orificio con más influencia en otros factores tales como el coeficiente de descarga, C_d , y fenómenos como el de la cavitación.

Otro parámetro geométrico que resulta de interés es el espesor relativo, α , el cual se define como la relación entre el espesor de la placa de orificio, L , y el diámetro del orificio de esta, d .

$$\alpha = \frac{L}{d} \quad (\text{ec. 31})$$

Como se vio en el apartado anterior de clasificación de las placas de orificio, 4.3.5.2 *Clasificación según la relación L/d* , el espesor relativo es el parámetro por el que una placa de orificio se considera delgada o gruesa, condición de la que depende el comportamiento de readherencia del fluido en su paso por la restricción.

4.3.6.2 Coeficiente de descarga

Es habitual que el caudal teórico y el caudal real que circula por la placa de orificio difieran. Esto es debido a que, como se ha visto en la ecuación 15, el caudal volumétrico depende del área y velocidad en el punto considerado, siendo estos dos valores diferentes los teóricos de los reales, principalmente por dos razones [15]. En primer lugar, porque el flujo siempre está impedido por una fuerza de fricción que varía según el tipo de fluido y su velocidad, y en los cálculos teóricos se desprecian tales efectos de fricción y viscosidad. Y, en segundo lugar, porque el área de la sección transversal del flujo de fluido aguas arriba del dispositivo de restricción es menor que el diámetro de la tubería por el que circula, al igual que el área de la sección transversal mínima del fluido (vena contracta), la cual es menor que el diámetro del orificio de la placa; este último problema significa que las áreas de paso del fluido antes y después de la placa de orificio no se pueden medir con precisión.

No obstante, gracias al coeficiente de descarga, C_d , es posible relacionar los parámetros teóricos con los reales. Este parámetro es importante puesto que se ha empleado ampliamente en la industria de control de flujo para medir la eficiencia de un dispositivo.

El coeficiente de descarga, C_d , se define como la relación del caudal real, Q_{real} , que atraviesa la placa de orificio con respecto a la predicción teórica derivada de la ecuación de Bernoulli, $Q_{teórico}$.

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teórico}} \quad (ec. 32)$$

La predicción teórica del caudal, en ausencia de mecanismos de transferencia de calor y suponiendo fluido incompresible sin fricción a través de la tubería, viene dada por:

$$Q_{teórico} = A_1 \frac{\sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}}{\sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \quad (ec. 33)$$

Donde A_1 es el área de la sección transversal de la tubería, $A_1 = \frac{\pi D^2}{4} [m^2]$, ΔP es la caída de presión debida a la placa de orificio, $\Delta P = P_1 - P_2 [Pa]$, ρ es la densidad del fluido [kg/m^3] y β la relación de contracción. Los subíndices 1 y 2 se refieren a una región aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificio respectivamente. De acuerdo con esta ecuación, la caída de presión varía con el cuadrado del caudal, condición que se cumple en todos los dispositivos de restricción de flujo (placa de orificio, tubo Venturi, etc).

Despejando Q_{real} de la ecuación 32 se obtiene una expresión para calcular el caudal volumétrico real que circula por la placa de orificio. No obstante, es necesario añadir un nuevo parámetro a dicha expresión: el coeficiente de expansión, ε . Este se emplea para tener en cuenta la compresibilidad del fluido y, en general, es menor que uno, aunque cuando el fluido se puede considerar incompresible, como es el caso de los líquidos, es igual a la unidad. El coeficiente de expansión depende de la relación de presión, $\frac{P_2}{P_1}$, y del exponente isentrópico, κ , el cual es la relación entre un cambio relativo de presión y el correspondiente cambio relativo de densidad. Por tanto, teniendo en cuenta esto, el caudal real a través de la placa de orificio puede obtenerse del siguiente modo:

$$Q_{real} = C_d \varepsilon A_1 \frac{\sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}}{\sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \quad (ec. 34)$$

Además, el coeficiente de descarga está relacionado con otros dos: el coeficiente de velocidad, C_v , y el coeficiente de contracción, C_c .

$$C_d = C_v C_c \quad (ec. 35)$$

- El coeficiente de velocidad, C_v , indica la medida en que la fricción retarda la velocidad del fluido en la vena contracta generada en la placa de orificio.

$$C_v = \frac{v_{vc real}}{v_{vc teórica}} \quad (ec. 36)$$

- El coeficiente de contracción, C_c , es la relación entre la superficie de la vena contracta y la del orificio a través del cual circula el fluido.

$$C_c = \frac{A_{vc}}{A_{orificio}} \quad (ec. 37)$$

En cuanto a los factores de los que depende el coeficiente de descarga, estos principalmente son el número de Reynolds y la geometría de la placa de orificio,

concretamente su relación de contracción, β , y espesor relativo, α . También depende notablemente de los puntos de toma de presión con los cuales se mide la diferencia de presión a través de la placa de orificio.

La figura 27 muestra la variación del coeficiente de descarga con el número de Reynolds para diferentes valores de la relación de contracción β . Como puede verse, C_d aumenta a medida que aumenta el número de Reynolds para todos los valores de β y alcanza un máximo a partir del cual decrece ligeramente hasta que se mantiene prácticamente constante. Este comportamiento se puede atribuir al efecto que ocasiona aguas abajo la presencia de una placa de orificio en el perfil de velocidades dentro de la tubería. Dado que las velocidades más altas se encuentran en el centro de la tubería, un número de Reynolds bajo (flujo laminar) lleva asociado un C_d alto debido a que la placa de orificio no tiene ningún efecto sobre la velocidad asociada con el flujo que pasa por la placa de orificio en comparación con un número de Reynolds alto. No obstante, el perfil de velocidades se ve fuertemente afectado con el aumento del número de Reynolds al llegar a un cierto punto, desencadenando un efecto inverso sobre C_d hasta que se vuelve constante, momento en el que pasa a ser independiente del número de Reynolds. Por tanto, el comportamiento acabado de comentar se puede achacar a los efectos de los tipos de flujo, es decir, flujo laminar y turbulento.

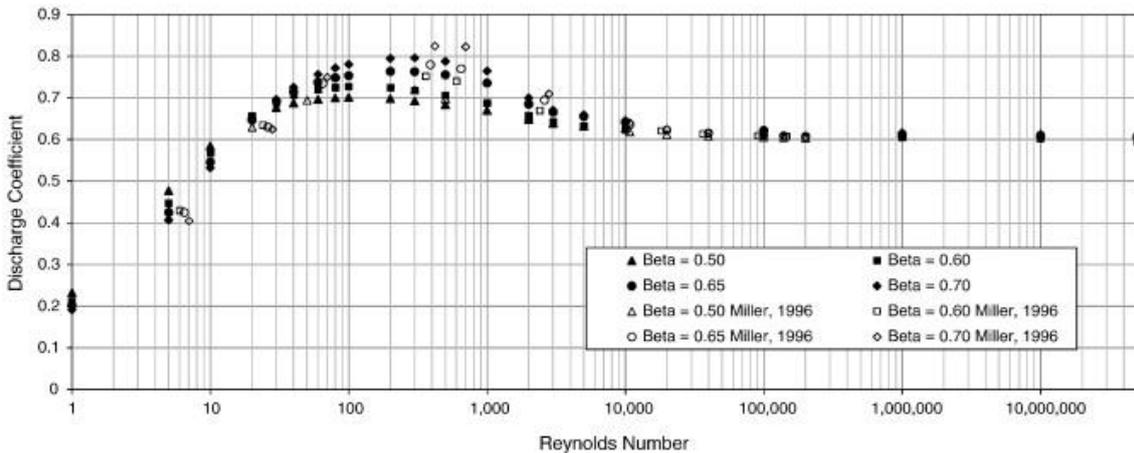


Figura 27 Variación del coeficiente de descarga con el número de Reynolds. Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds number. C. L. Hollingshead et al.

Por otro lado, la norma UNE-EN ISO 5167-2:2003 [25] proporciona otra expresión para el cálculo del coeficiente de descarga, la cual se recoge en la ecuación 38 y se conoce como ecuación de Reader-Harris / Gallagher.

$$C_d = 0,5961 + 0,0261 \beta^2 - 0,216 \beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063 A) \beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 e^{-10 L_1} - 0,123 e^{-7 L_1}) (1 - 0,11 A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031 (M'_2 - 0,8 M'_2{}^{1,1}) \beta^{1,3} \quad (ec. 38)$$

Donde:

- β es la relación de contracción.
- Re_D es el número de Reynolds calculado respecto a D (diámetro interno de la tubería).

- L_1 es el cociente entre la distancia de la toma de presión aguas arriba, desde la cara de la placa aguas arriba, l_1 , y el diámetro de la tubería, D .

$$L_1 = \frac{l_1}{D}$$

- Las variables M'_2 y A responden a las siguientes fórmulas:

$$A = \left(\frac{19000 \beta}{Re_D} \right)^{0,8}$$

$$M'_2 = \frac{2 L'_2}{1 - \beta}$$

En esta última ecuación L'_2 es el cociente entre la distancia de la toma de presión aguas abajo, desde la cara de la placa aguas abajo, l'_2 , y el diámetro de la tubería, D .

$$L'_2 = \frac{l'_2}{D}$$

Cuando el diámetro de la tubería, D , es menor que 71,12 mm a la ecuación 38 se le añade el siguiente término:

$$+ 0,011 (0,75 - \beta) \left(2,8 - \frac{D}{25,4} \right)$$

Los valores de L_1 y L'_2 que se emplean, siempre y cuando las separaciones l_1 y l'_2 satisfagan los requisitos comentados en el apartado 4.2.3, son los siguientes:

- Para tomas de presión a D y $D/2$: $L_1 = 1$ y $L'_2 = 0,47$.
- Para tomas de presión en bridas: $L_1 = L'_2 = \frac{25,4}{D}$.
- Para tomas de presión en ángulo: $L_1 = L'_2 = 0$.

Resulta necesario resaltar que la aplicación de la ecuación 38 únicamente es posible cuando la instalación y el dispositivo de placa de orificio junto con las tomas de presión cumplen las especificaciones de las normas UNE-EN ISO 5167-1:2003 [24] y 5167-2:2003 [25].

En lo que se refiere al factor de expansión, ε , la norma UNE-EN ISO 5167-2:2003 [25] también proporciona una expresión para su cálculo, siendo esta válida únicamente cuando la placa de orificio cumple las condiciones de empleo que recoge dicha norma y cuando la relación de presión, $\frac{P_2}{P_1}$, es mayor o igual que 0,75.

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \beta^4 + 0,93 \beta^8) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (ec. 39)$$

Cabe señalar que el exponente isentrópico, κ , varía con la naturaleza del fluido y con su temperatura y presión, no conociéndose su valor para muchos gases y vapores en un amplio margen de presión y temperatura; en tales casos, es posible utilizar en lugar del exponente isentrópico, la relación entre la capacidad calorífica a presión constante y la capacidad calorífica a volumen constante de gases ideales, $\frac{c_p}{c_v}$.

4.3.6.3 Coeficiente de caudal

Cuando el fluido pasa a través de una placa de orificio u otro dispositivo de restricción del flujo pierde energía. El coeficiente de caudal o coeficiente de flujo, C , es un parámetro de diseño que relaciona la caída de presión, ΔP , a través de la placa de orificio con el caudal, Q , correspondiente. Conviene aclarar que el caudal al que se está aquí refiriendo es el caudal real, Q_{real} , que atraviesa la placa de orificio.

El coeficiente de flujo está relacionado con el coeficiente de descarga de manera que su expresión puede deducirse a partir de la de este. En el epígrafe anterior, como se ha visto, la ecuación 33 se refiere a las condiciones geométricas aguas arriba de la placa de orificio, no obstante, también es posible expresarla en función de las condiciones en la sección de paso de la placa de orificio. Teniendo en cuenta esto, dicha expresión pasa a tener la siguiente forma:

$$Q_{teórico} = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (ec. 40)$$

Donde d es el diámetro del orificio de la placa. De este modo, la fórmula del caudal real a través de la placa de orificio también puede escribirse del siguiente modo:

$$Q_{real} = C_d \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \frac{\sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (ec. 41)$$

El término $\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ se conoce como factor de velocidad de aproximación y relaciona la velocidad del fluido aguas arriba de la placa de orificio con la velocidad de este en el propio orificio de la placa. El producto de dicho factor por el coeficiente de descarga es el denominado coeficiente de caudal, C .

$$C = C_d \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (ec. 42)$$

Además, de la ecuación 41 se deduce que el coeficiente de caudal también sigue la siguiente expresión:

$$C = \frac{4 Q_{real}}{\varepsilon \pi d^2} \sqrt{\frac{\rho}{2 \Delta P}} \quad (ec. 43)$$

Si el fluido se puede considerar incompresible entonces $\varepsilon = 1$, por lo que el coeficiente de caudal para fluidos incompresibles viene dado por:

$$C = \frac{4 Q_{real}}{\pi d^2} \sqrt{\frac{\rho}{2 \Delta P}} \quad (ec. 44)$$

El coeficiente de flujo, C , depende de varios factores. Estos son el coeficiente de descarga, C_d , como ya se había adelantado anteriormente, y en menor medida, el número de Reynolds y la posición de las tomas de presión. No obstante, el principal factor del que depende es de la relación de contracción, β , por lo que es frecuente encontrarlo tabulado frente a este parámetro geométrico característico de las placas de orificio.

Generalmente, los valores que toma el coeficiente de caudal están comprendidos en el rango 0,60 – 0,90. Asimismo, tal y como se ve en la siguiente gráfica, a medida que aumenta la relación de contracción, el coeficiente de flujo también lo hace. Dicha gráfica ha sido elaborada a través de las mediciones obtenidas en el capítulo 13 “*Fluid Flow: General Principles*” del libro “*Air Conditioning System Design*”, en el cual el aire se ha tratado como un fluido incompresible por lo que su comportamiento es como el de un líquido.

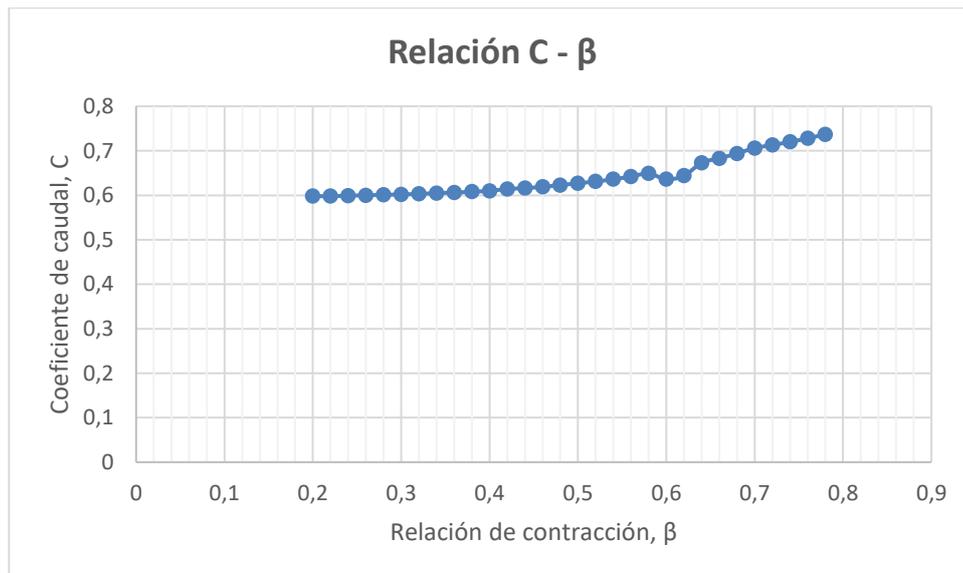


Figura 28 Variación del coeficiente de caudal con la relación de contracción.

4.3.7 Ventajas y desventajas

Como todo dispositivo, las placas de orificio presentan una serie de ventajas que hacen adecuado su empleo y una lista de desventajas por las cuales es conveniente emplear otro dispositivo de medición del caudal en ciertos casos. Ambos aspectos son recogidos a continuación.

Las principales ventajas que presentan los dispositivos de placas de orificio son las siguientes:

- Geometría sencilla.
Su estructura básicamente consiste en una placa delgada de metal (normalmente) en la que se ha mecanizado un orificio, por lo que su fabricación resulta sencilla.
- Amplia gama de tamaños y gran capacidad de adaptación a las aplicaciones industriales.
Existe una gran variedad de placas de orificio que se adaptan y responden correctamente a las circunstancias de la aplicación deseada; además, como se ha visto son utilizadas en una amplia diversidad de sectores industriales.
Asimismo, son aptas para líquidos y gases con o sin partículas sólidas en un amplio rango de temperatura y presión.
- Económicas.
Su coste es bajo en comparación con otros medidores de caudal de tipo diferencial, por ejemplo, que los tubos de Venturi, y no se incrementa drásticamente con el tamaño de la tubería.
- Instalación y manejo sencillo.
No contiene piezas móviles y no es necesario ningún tipo de mecanismo para accionarla.
- Muy conocidas.

La gran cantidad de literatura existente acerca del comportamiento del flujo con placas de orificio y, en consecuencia, su extenso conocimiento, dota a estos dispositivos de una gran confianza para su utilización.

En lo que se refiere a las desventajas de las placas de orificio, estas se detallan a continuación:

- Relación cuadrática entre el caudal y la caída de presión.
Como se ha visto en las ecuaciones 40 y 41 (o también en las ecuaciones 33 y 34), la caída de presión a través de la placa de orificio es proporcional al cuadrado del caudal. Esta relación no lineal junto con la dificultad de medir con precisión pequeñas diferencias de presión ocasionadas por un flujo de caudal demasiado bajo, provoca que el empleo de una placa de orificio sea adecuado para medir caudales que se encuentren entre el 30% y el 100% del caudal máximo que puede manejar tal dispositivo. Esto significa que se deben utilizar técnicas alternativas de medición de caudal en aquellas aplicaciones en las que el caudal puede variar en un amplio rango que puede caer por debajo del 30% del caudal máximo.
- Caída de presión permanente relativamente alta.
La pérdida de presión permanente causada es superior a la que originan otros dispositivos de restricción tal y como es posible ver en la figura 29. Se apunta a que, genéricamente, en una placa de orificio está entre el 50% y el 90% de la magnitud de la diferencia de presión $P_1 - P_2$ medida, dependiendo también de la relación de contracción β . Esto se debe en gran medida al efecto de la viscosidad del fluido en las paredes de la tubería y del orificio.
Además, debido a que la placa de orificio es un elemento sin posiciones intermedias, como las válvulas, no es posible regular la caída de presión que se genera. Por tanto, en estos dispositivos tienen lugar grandes pérdidas de carga siendo propensas al fenómeno de la cavitación.

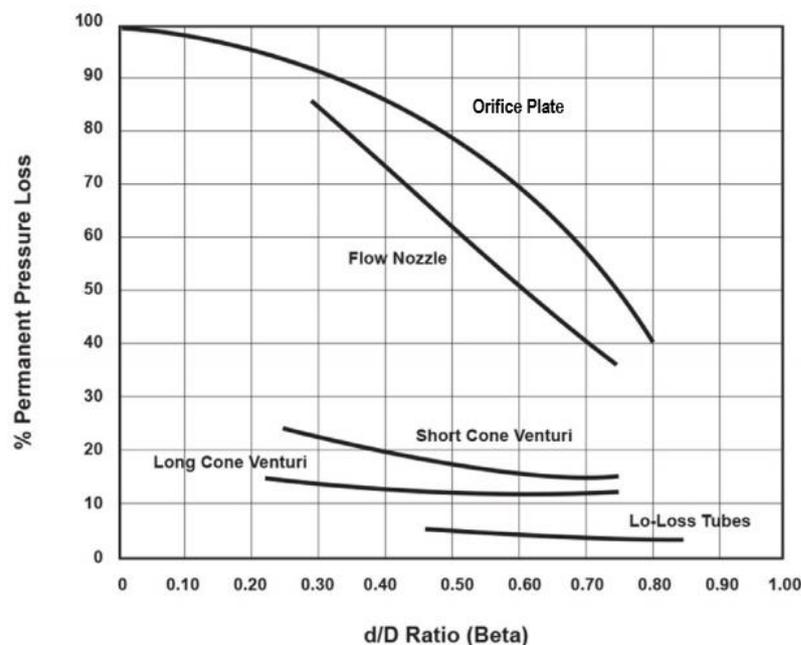


Figura 29 Pérdida de presión permanente en algunos dispositivos de restricción. Fundamentals of Orifice Meter Measurement. Emerson.

- Inexactitud de al menos $\pm 2\%$.
Una limitación de las placas de orificio es que su inexactitud es típicamente de al menos $\pm 2\%$ y puede acercarse a $\pm 5\%$. Esta incertidumbre es alta en comparación con otros medidores de presión diferencial como el tubo Venturi, el cual ofrece una inexactitud de medición de sólo $\pm 1\%$.
Respecto a otro tipo de medidores esto no tiene por qué ser una desventaja ya que la incertidumbre es superior o no en función del coste y diseño de estos, pues, por ejemplo, los caudalímetros de área variable tienen una inexactitud de $\pm 5\%$ en los instrumentos más baratos, pero los más caros ofrecen inexactitudes tan bajas como $\pm 0,5\%$.
- Propensas a la erosión y corrosión.
El paso continuo del fluido por el orificio de la placa puede llegar a erosionar los bordes de este, modificando sus características y causando imprecisiones en la presión diferencial medida. Por tanto, también provocarían un cambio gradual en el coeficiente de descarga.
Esto limita la vida útil de las placas de orificio.
- Pueden causar obstrucciones.
En función del tipo de fluido que circule por la tubería pueden llegar a producirse acumulaciones de partículas sólidas en la cara aguas arriba de la placa de orificio que desembocarán en una obstrucción del flujo, afectando, por tanto, a la medición de la caída de presión, es decir, a la precisión del dispositivo. Surge un problema muy similar si hay burbujas de vapor o gas en el fluido que circula.
Ambos problemas son característicos de las placas de orificio concéntricas. El primero puede minimizarse empleando una placa de orificio excéntrica con el orificio situado cerca del fondo de la tubería, como ya se ha comentado anteriormente. El segundo problema se resuelve empleando una placa de orificio excéntrica con el orificio ubicado cerca del límite superior de la tubería o bien montando la placa de orificio en un tramo vertical de tubería.

De estas dos últimas desventajas comentadas se deduce que resulta conveniente inspeccionar la placa de orificio con cierta frecuencia, según el uso de la misma, y si es necesario, reemplazarla para asegurar la fiabilidad y la precisión en las mediciones realizadas. No obstante, su mantenimiento es sencillo.

4.4 Cavitación

La cavitación es un tema de interés en varios ámbitos de la ciencia y la ingeniería. La importancia del estudio de este fenómeno hidrodinámico radica en los problemas industriales que ocasiona, tales como disminuciones de rendimiento, erosión de las paredes o vibraciones, en aquellas aplicaciones en las que aparece, como es el caso de la cavitación en bombas, turbinas, hélices... Es importante conocer el fenómeno para poder controlarlo. En los casos en los que su efecto sea negativo, tratará de evitarse. Sin embargo, en otras ocasiones su efecto será deseable y tratará de aprovecharse; este es el caso de su uso para limpieza o como regulador de flujo en bombas de condensación.

Uno de los primeros en identificar el fenómeno de la cavitación fue Parsons, quien, a finales del siglo XIX, lo observó en la proximidad de las hélices de los barcos que giraban a alta velocidad, concluyendo que eso estaba generando una disminución del rendimiento. Desde ese momento, muchos han sido los estudios y experimentos que se han realizado para conocer su física y sus efectos en las aplicaciones industriales. No obstante, muchos de esos efectos todavía no se han explicado en su totalidad debido a la complejidad del

proceso, ya que están relacionados con ámbitos de la acústica, óptica, termodinámica e hidrodinámica.

4.4.1 Naturaleza del fenómeno

La cavitación es un fenómeno que aparece en el seno de los líquidos y consiste en la formación de burbujas de vapor en el líquido y su posterior colapso (implosión) de forma brusca [1].

La condición física para la aparición de una cavidad de vapor en el seno de un líquido es que la presión en el punto de formación caiga por debajo de la presión de vapor del líquido a la temperatura de este. En su movimiento, cuando la burbuja de vapor es arrastrada a una zona de mayor presión, superior a la presión de vapor del líquido, colapsa violentamente debido a las grandes diferencias de presión existentes entre el gas situado en el interior de la burbuja y el líquido que la rodea.

La evaporación (cambio de fase de líquido a vapor), que tiene lugar en la formación de las burbujas de vapor, ocurre a temperatura constante o casi constante, diferenciando así la formación de burbujas debido a cavitación de la inducida por un aumento de temperatura durante la ebullición de un líquido. Ambos procesos, cavitación y ebullición, siguen caminos distintos tal y como puede verse en la figura 30, que representa un diagrama termodinámico de estados del agua en función de la presión y la temperatura.

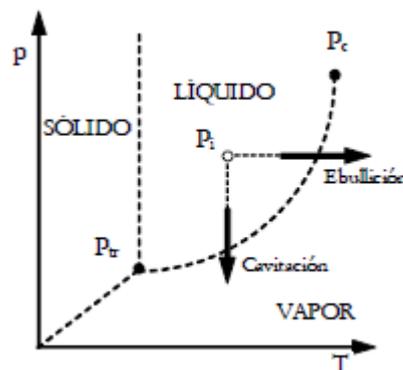


Figura 30 Diagrama de estados y curvas de cambio de fase del agua. Apuntes de Máquinas Hidráulicas de la Universidad de Valladolid.

Como es posible apreciar en la imagen anterior, la curva entre el punto triple, P_{tr} , y el punto crítico, P_c , representa el conjunto de transformaciones líquido-vapor que pueden iniciarse desde cualquier punto inicial, P_i . Este cambio de fase puede realizarse a través de dos caminos distintos: elevación de la temperatura a presión constante (ebullición) o disminución de la presión a temperatura constante, siendo este último camino el que sigue el fenómeno de cavitación.

4.4.2 Ciclo de las burbujas de vapor

El ciclo de las burbujas que se forman cuando un líquido cavita se refiere a los cambios de fase de líquido a vapor y de nuevo a líquido que tienen lugar. El comportamiento de las burbujas tiene una relación directa con la magnitud de los efectos negativos que resultan en el fenómeno de la cavitación.

Se distinguen tres procesos en la dinámica de las burbujas de vapor [14]: nucleación, crecimiento y colapso.



Figura 31 Esquema del ciclo de las burbujas de cavitación. Apuntes de Máquinas Hidráulicas de la Universidad de Valladolid.

- **Nucleación.**

Para que tenga lugar la cavitación, es necesario que haya un núcleo de gas. Estos núcleos de gas deben tener un radio mínimo, radio crítico, para que puedan crecer y dar lugar a una burbuja de gas.

Es decir, los núcleos de gas al ser sometidos a una zona de baja presión comienzan a expandirse. Si la presión sigue disminuyendo en una magnitud tal que se alcance la presión de vapor del fluido a la temperatura correspondiente, entonces el líquido que rodea al núcleo se vaporiza y comienza a crecer hasta que se hace visible en forma de burbuja.

- **Crecimiento.**

Cuando las burbujas ya están formadas, estas avanzan a través de la región de presión reducida y crecen en respuesta a la disminución continua de la presión, aumentando, por tanto, la vaporización del líquido.

Estas burbujas de cavitación, originalmente, están constituidas principalmente por vapor y la presión en su interior es igual a la presión de vapor del fluido. Durante su vida, se van llenando gradualmente de aire debido a la difusión del gas disuelto presente en el líquido que las rodea.

- **Colapso.**

A medida que las burbujas de cavitación se desplazan aguas abajo, alejándose de su región de creación, llegan a regiones donde la presión recupera niveles más altos, interrumpiéndose, por tanto, su crecimiento.

De manera que, al ser transportadas por el fluido a estas zonas donde la presión es superior a la presión de vapor, las burbujas se condensan e implosionan de forma violenta. Esto se produce debido a que el líquido que las rodea se acelera hacia el interior de ellas formando una hendidura (las deforma), lo cual origina un microchorro en el centro de la burbuja que sale expulsado hacia el exterior, en la mayoría de los casos hacia la superficie sólida, aumentando más la erosión del material. También se crea una onda de choque que es mayoritariamente la responsable del daño y de las vibraciones generadas.

4.4.3 Cavitación en placas de orificio

El flujo cavitante se encuentra normalmente en dispositivos de flujo presurizado, los cuales se caracterizan por diferentes secciones transversales a lo largo de la trayectoria del flujo. A medida que el flujo atraviesa una restricción, la velocidad aumenta y la presión disminuye debido al principio de Bernoulli. Si la presión estática local es menor que la presión de vapor correspondiente a la temperatura del fluido, la fase líquida se vaporizará

induciendo así la cavitación. Dado que la configuración de flujo típica está representada por una placa de orificio, muchos han sido los estudios experimentales y teóricos que se han centrado en la cavitación del flujo a través de tales dispositivos.

Como ya se ha explicado en el epígrafe 4.3.3, cuando el fluido pasa a través de la placa de orificio, se forma una vena contracta debido al efecto Venturi, donde el área de la sección transversal del flujo es la menor, por lo que la velocidad es máxima, siendo la presión en esta zona, P_{vc} , por tanto, mínima (principio de Bernoulli). De este modo, la región de la vena contracta constituye la zona más vulnerable para el fenómeno de la cavitación.

El estado termodinámico del flujo depende de la magnitud relativa de P_{vc} con respecto a la presión de vapor, P_v . Es posible distinguir dos situaciones tal y como hace Behrouz Ebrahimi et al. en su artículo [10] y como se muestra en las siguientes figuras, en las cuales P_1 representa la presión aguas arriba de la placa de orificio y P_2 la presión aguas abajo.

Si la presión en la vena contracta, P_{vc} , se mantiene por encima de la presión de vapor del líquido, P_v , el flujo permanece como líquido monofásico por lo que no tiene lugar cavitación.

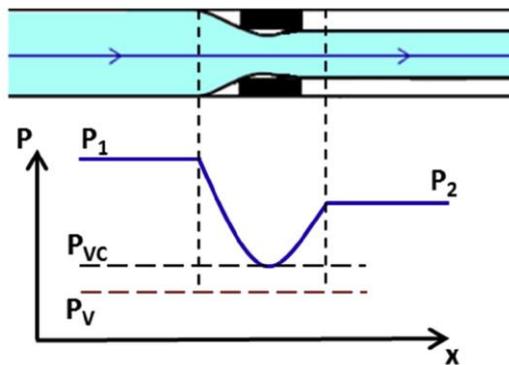


Figura 32 Variación de la presión en el paso del fluido a través de una placa de orificio sin cavitación. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.

No obstante, en el caso de que la presión en la vena contracta caiga por debajo de la presión de vapor del fluido, se producirá un cambio de fase líquido-vapor y una fracción del líquido se convertirá en vapor dando lugar a la aparición de burbujas. Es decir, se producirá cavitación.

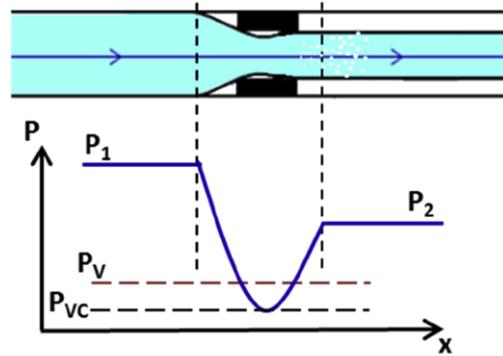


Figura 33 Variación de la presión en el paso del fluido a través de una placa de orificio con cavitación. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.

Aguas abajo de la vena contracta, el área del flujo se expande y se produce una recuperación parcial de la presión a medida que disminuye la velocidad de flujo (debido a la expansión). Si la contrapresión, P_2 , aumenta por encima de la presión de vapor del fluido, las burbujas de vapor colapsarán, causando graves daños materiales, ruidos y vibraciones.

En algunos casos, la generación de vapor puede intensificarse si la contrapresión no se recupera por encima de la presión de vapor, permaneciendo el flujo principalmente en fase vapor. Este proceso se llama flashing.

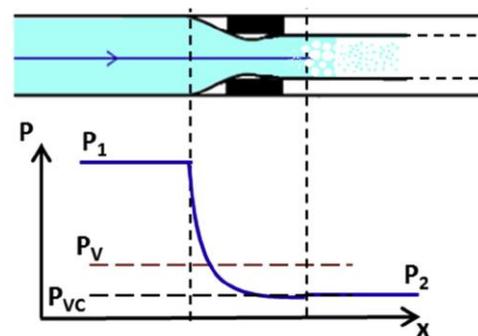


Figura 34 Flashing. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.

Por tanto, teniendo en cuenta lo comentado en el actual apartado y en el anterior, para que tenga lugar el fenómeno de cavitación en un dispositivo de placa de orificio, la presión estática debe caer por debajo de la presión de vapor del líquido a la temperatura correspondiente y deben existir núcleos de gas en el flujo para la formación de las burbujas de vapor. Además, para que estas burbujas implodan, la presión aguas abajo de la placa de orificio debe recuperarse por encima de la presión de vapor.

4.4.4 Curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$

La siguiente figura ilustra la variación del caudal volumétrico, Q , a través de una placa de orificio en función del salto de presión, $\sqrt{\Delta P}$, bajo unas determinadas condiciones de entrada constantes. Este método de representación es muy habitual a la hora de caracterizar el comportamiento de tal dispositivo.

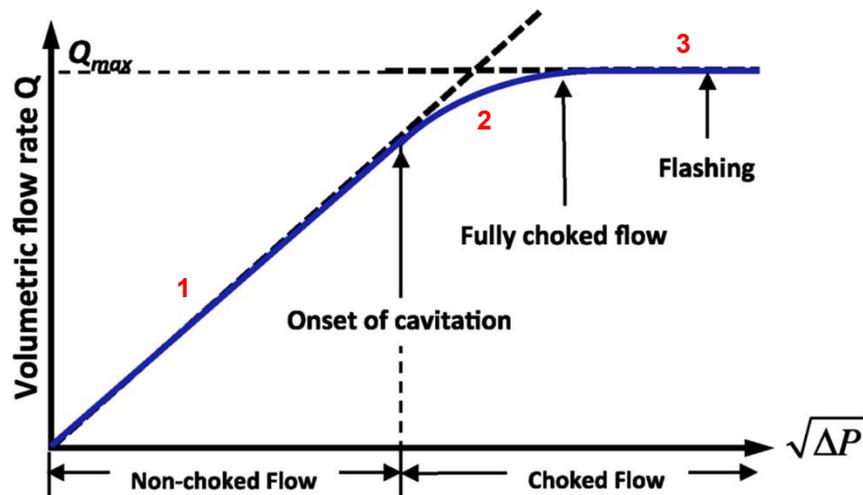


Figura 35 Curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.

Es posible dividir la curva en tres tramos, los cuales están numerados en la propia figura y se explican a continuación.

1. Zona de flujo no cavitante.

En este tramo el caudal volumétrico, Q , es proporcional a la caída de presión $\sqrt{\Delta P}$. Esta tendencia comienza a desviarse de la predicción monofásica (aumento de forma lineal) cuando tiene lugar el comienzo de la cavitación.

2. Zona de flujo cavitante.

En esta zona el caudal continúa incrementándose con la caída de presión $\sqrt{\Delta P}$, pero no de forma lineal. Se permanece en este tramo hasta alcanzar la condición de flujo completamente bloqueado y en él ocurre una cavitación constante o de daño incipiente.

3. Zona de flujo totalmente bloqueado.

El flujo está completamente bloqueado lo que implica que el caudal volumétrico permanece constante a pesar del aumento adicional de $\sqrt{\Delta P}$, es decir, el caudal deja de incrementarse independientemente de la reducción de presión aguas abajo de la placa de orificio. Se alcanza, por tanto, el caudal máximo, Q_{max} , tal y como muestra la figura 35. Esto sucede cuando está teniendo lugar el fenómeno de cavitación por asfixia (máximo nivel de intensidad de la cavitación).

4.4.5 Número de cavitación

Resulta necesario un parámetro adimensional para caracterizar el fenómeno de cavitación. Este es el número de cavitación, σ , el cual indica la intensidad de cavitación y del que existen varias definiciones. A continuación, se presenta la siguiente definición del parámetro de cavitación propuesta por la norma ISA-RP75.23-1995:

$$\sigma = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_2} \quad (ec. 45)$$

Donde P_1 y P_2 son las presiones estáticas aguas arriba y abajo de la placa de orificio respectivamente y P_v es la presión de vapor del líquido a la temperatura correspondiente.

En la literatura, el número de cavitación se define como la relación entre las fuerzas que tratan de suprimir la cavitación, $P_1 - P_v$, y las fuerzas que tratan de producir tal fenómeno, $P_1 - P_2$, por lo que cuanto menor es su valor, mayor será la intensidad de este fenómeno, tal y como aparece ilustrado en la figura 36. Esta representa la presión de choque máxima causada por el colapso de las burbujas de vapor frente al número de cavitación para tres tipos de placas de orificio: placa de orificio concéntrica, placa de orificio con múltiples orificios y placa de orificio cónica. La gráfica muestra que la presión de choque aumenta notablemente con la disminución del número de cavitación independientemente del tipo de placa de orificio, demostrando, por tanto, que la cavitación es más severa cuanto más pequeño sea el parámetro de cavitación. Además, también es posible ver que este fenómeno es más intenso en una placa de orificio con un único orificio en el centro que en otra con múltiples orificios o tipo cónica puesto que, para un mismo valor del número de cavitación, la presión de choque es mayor en ella que en las otras dos.

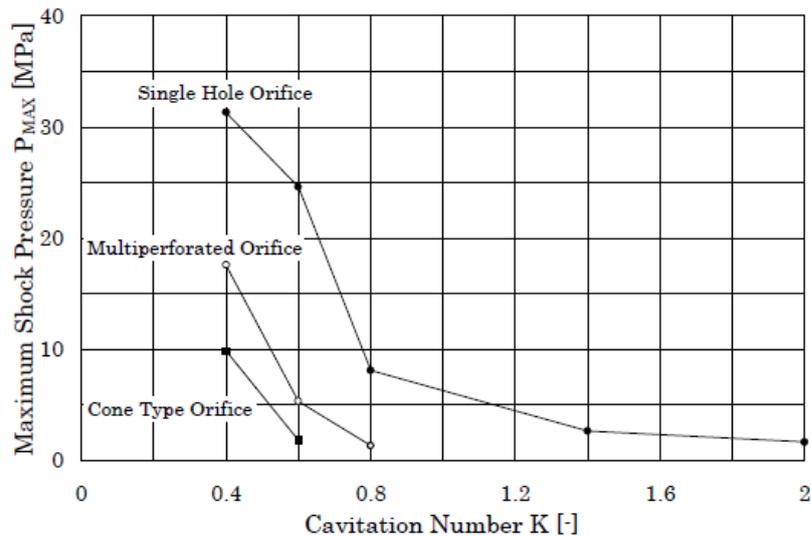


Figura 36 Relación entre la presión de choque máxima y el número de cavitación. Cavitation characteristics of restriction orifices. K. Takahashi et al.

Como se ha comentado al comienzo de este epígrafe, existen varias definiciones para el número de cavitación, algunas de las cuales se exponen a continuación.

Si se toma como presión de referencia la presión aguas abajo de la placa de orificio, P_2 , en lugar de la presión aguas arriba, P_1 , la ecuación 45 puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\sigma_2 = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} = \sigma - 1 \quad (ec. 46)$$

Esta forma de expresar el número de cavitación es elegida por varios autores ya que la presión aguas abajo de la placa de orificio es más cercana a la presión de vapor por lo que influye directamente en la cavitación. No obstante, en la mayoría de las aplicaciones resulta más conveniente emplear la presión aguas arriba como referencia.

Por otro lado, aplicando la ecuación de Bernoulli, ecuación 22, entre los puntos 1 y 2, es decir, aguas arriba y abajo de la placa de orificio, y teniendo en cuenta que no hay diferencia de altura entre ambos puntos, se tiene que:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Donde ρ es la densidad del fluido y v , la velocidad media entre los puntos 1 y 2. Sustituyendo esto en la expresión del número de cavitación, se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_v = \frac{P_1 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (\text{ec. 47})$$

Según el valor del coeficiente de cavitación es posible distinguir diferentes niveles de cavitación, los cuales serán tratados en el siguiente apartado. Sin embargo, cabe señalar que el nivel de cavitación que causa daños en un dispositivo es difícil de definir y generalmente se indica en base a la experiencia. Claramente, la opción más conservadora consiste en restringir todas las operaciones a un régimen libre de cavitación.

4.4.6 Clasificación de la intensidad de cavitación

En función del valor del número de cavitación se distinguen cuatro niveles de intensidad de este fenómeno [6]: cavitación incipiente, cavitación constante, cavitación de daño incipiente y cavitación por asfixia.

Cada uno de estos niveles es explicado a continuación.

4.4.6.1 Cavitación incipiente

Es el primer nivel de cavitación, es decir, marca el inicio de este fenómeno. Se define como la condición del flujo en la que la cavitación comienza a ser detectable y en la cual, pequeñas burbujas de vapor se crean de forma intermitente como puede verse en la imagen 37. Esta condición se detecta cuando se produce un aumento brusco del nivel de vibración después del colapso y condensación de las burbujas de vapor. Se caracteriza por ruidos suaves e intermitentes por lo que puede ser difícil distinguirlos de los propios ruidos generados por el funcionamiento de la instalación.

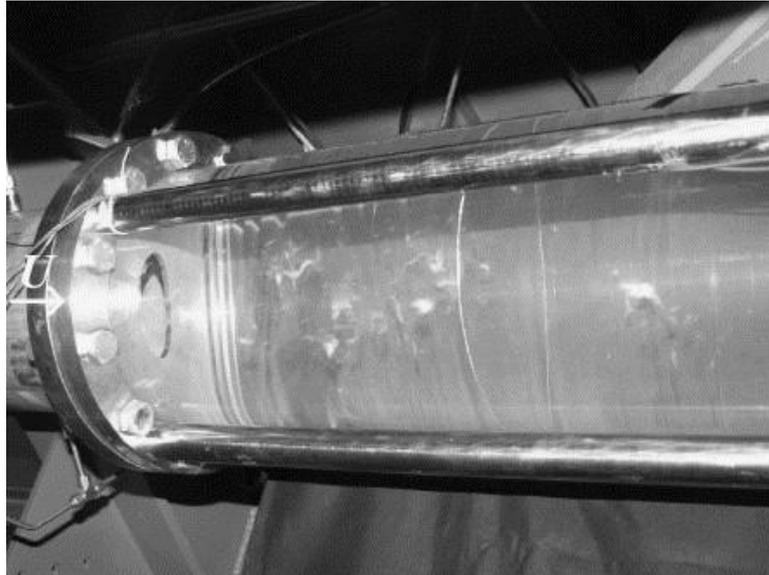


Figura 37 Nubes de burbujas blancas formadas aguas abajo de la placa de orificio en el nivel de cavitación incipiente. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. P. Testud et al.

Por tanto, la cavitación incipiente es un límite de diseño muy conservador y su uso como límite se recomienda únicamente cuando el ruido de la cavitación no es tolerable, por lo que es aceptable en muchas de las aplicaciones industriales.

El nivel de cavitación aquí comentado puede determinarse a través del número de cavitación incipiente, σ_i . Este tiene la misma expresión que el número de cavitación definido en la ecuación 45, pero se calcula en el punto donde la cavitación incipiente empieza a producirse.

$$\sigma_i = \frac{P_1 - P_v}{\Delta P_r} \quad (\text{ec. 48})$$

Donde ΔP_r es la diferencia entre la presión aguas arriba de la placa de orificio y el punto en el cual comienza a tener lugar cavitación.

Tal y como comenta Stefano Malvasi et al. en su artículo [26], el número de cavitación incipiente se ve afectado por las características geométricas de los dispositivos de placas de orificio, expresadas por los siguientes parámetros:

- Relación de contracción, β .
El número de cavitación incipiente se ve fuertemente afectado por este parámetro. Una reducción de la relación de contracción, es decir, un valor de β bajo, da como resultado un retardo en el inicio de la cavitación y, por tanto, un número de cavitación incipiente inferior. Esto se observa en la siguiente figura en la cual cada una de las curvas representa la variación de σ_i en función de β para diferentes diámetros, D , de tubería.

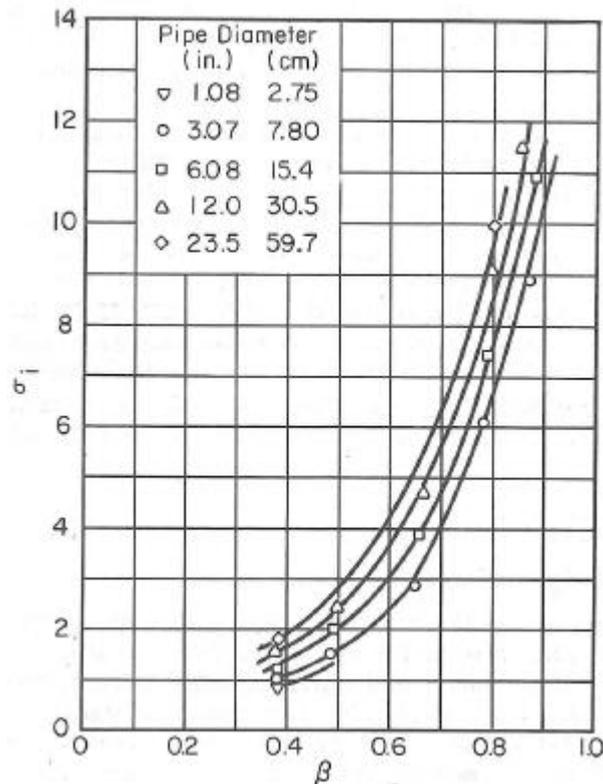


Figura 38 Variación del número de cavitación incipiente, σ_i , en función de la relación de contracción, β . Cavitation and size scale effects for orifices. P. Tullis et al.

- Espesor relativo, α .
Este factor también juega un papel importante, ya que está directamente relacionado con el régimen del flujo a través de la placa de orificio. Dado un valor de la relación de contracción, o un pequeño rango de valores, el número de cavitación incipiente aumenta con el espesor relativo, es decir, cuanto mayor sea α para un determinado valor de β , la cavitación se inicia más fácilmente. Sin embargo, como se señala en [26] se descubrió que esta tendencia no es unívoca, sino que el número de cavitación incipiente puede aumentar o disminuir dependiendo del valor de β para el caso de placas de orificio en las cuales el flujo se vuelve a conectar con la pared del orificio en su paso a través del mismo, es decir, en placas de orificio catalogadas como gruesas.
- Número de agujeros de la placa de orificio, n_h .
- Distribución de los agujeros de la placa de orificio y su forma, incluyendo el achaflanado de sus bordes.

Además, cabe mencionar la ausencia de efectos de escala de presión y velocidad asociados a la cavitación incipiente de las placas de orificio, pues tras realizarse varios experimentos, se ha visto que para diferentes valores de presión aguas arriba de la misma placa de orificio, los valores del coeficiente de cavitación incipiente obtenidos son sustancialmente iguales.

4.4.6.2 Cavitación crítica o constante

Es el segundo límite de cavitación y se define como la situación del flujo en la que aparece cavitación continua en un grado moderado, es decir, hay un volumen de vapor suficientemente grande como para que tenga lugar un nivel de cavitación continuo y uniforme. Puede identificarse por medios de detección sonora, se caracteriza por vibraciones y ruidos constantes pero leves, de intensidad inferior a 80 dB, y no ocasiona daños físicos.

Aunque la intensidad de cavitación de este nivel sea superior a la de la cavitación incipiente, se sigue considerando un límite conservador por lo que también es aceptable en la mayoría de las aplicaciones.

El nivel de cavitación crítica está representado por el número de cavitación constante, σ_c , cuya expresión es análoga a la del coeficiente de cavitación, ecuación 45, pero aplicada en las condiciones que causan una cavitación suave y constante.

$$\sigma_c = \frac{P_1 - P_v}{\Delta P_r} \quad (\text{ec. 49})$$

Donde ΔP_r es la diferencia de presión aguas arriba de la placa de orificio y el punto donde tales condiciones tienen lugar.

Al igual que ocurría en la cavitación incipiente, en este caso también se encuentra una ausencia de efectos de escala de presión y velocidad asociados con la cavitación constante, habiendo, por tanto, únicamente efectos en relación con una escala de tamaño (influencia del diámetro de la tubería, por ejemplo).

4.4.6.3 Cavitación moderada o de daño incipiente

El siguiente nivel de cavitación es el denominado de daño incipiente. Se caracteriza por un fuerte ruido y vibraciones y el daño en las paredes de las superficies comienza a ser detectable, es decir, hay un riesgo de daños alto. Los daños físicos son causados debido al violento colapso de las burbujas de vapor que ocurre aguas abajo de la placa de orificio, siendo los ruidos ocasionados semejantes al choque de un material sólido contra una superficie sólida (picadura). Es el peor rango de operación para la placa de orificio.

Se trata de un nivel de cavitación no estable y es el precursor de la situación de bloqueo del caudal. Su principal característica, aparte de los daños físicos, es la disminución del caudal debido a la reducción de la sección de paso con motivo de las burbujas de vapor.

Además, resulta complicado detectar este nivel puesto que no se puede determinar a partir de una curva de aceleración o vibración, como ocurre en los dos niveles de cavitación anteriores. Un método sugerido para tratar de detectarlo es medir la tasa de daño por picaduras en muestras de materiales blandos como, por ejemplo, el aluminio, por lo que se deduce que el límite de dicho nivel dependerá del material.

La tasa de picaduras generalmente muestra un fuerte aumento con la velocidad del flujo para un mismo número de cavitación, lo cual es debido a dos razones. Por un lado, cuando la velocidad aumenta, manteniéndose constante el número de cavitación, la presión aguas abajo también aumenta para mantener dicho parámetro constante por lo que las burbujas experimentan una presión más alta aguas abajo durante su proceso dinámico, resultando un colapso más fuerte de las mismas. La segunda razón es que la tasa de producción de burbujas también aumenta con la velocidad de flujo, de manera que la frecuencia de las ondas de presión también se incrementa.

4.4.6.4 Cavitación por asfixia

Es el nivel de cavitación más severo y en él hay, aguas abajo de la placa de orificio, una gran bolsa de vapor como se ilustra en la figura 39. El flujo se encuentra totalmente bloqueado de manera que el caudal permanece constante a pesar de un aumento del salto de presión, es decir, una mayor disminución de la presión aguas abajo del orificio no produce un flujo adicional, siempre que la presión aguas arriba permanezca constante.

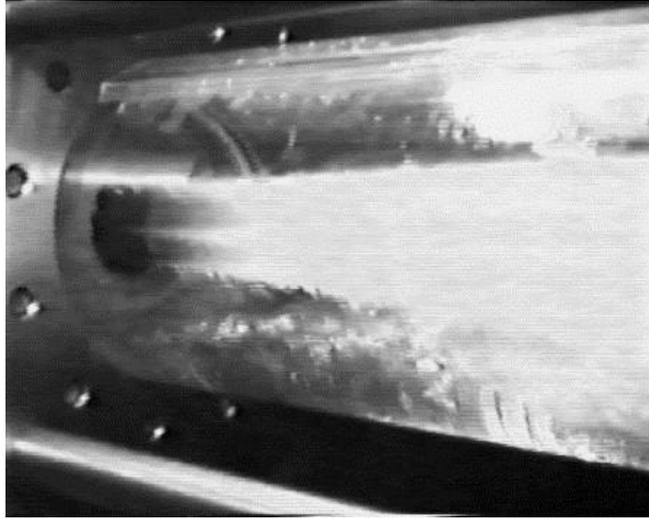


Figura 39 Bolsa de vapor aguas abajo de la placa de orificio en el régimen de cavitación por asfixia. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. P. Testud et al.

En lo que se refiere a los daños físicos ocasionados, la placa de orificio no sufre tanto como en el nivel anterior, ya que las burbujas de vapor no colapsan justo aguas abajo de esta, sino que lo hacen a una cierta distancia más abajo. A pesar de esto, no se recomienda operar con una placa de orificio cerca de la obstrucción del flujo, ya que justo antes de la asfixia, existe el máximo riesgo de daños y la mayoría de los materiales están sujetos a daños graves cuando se exponen a condiciones de estrangulamiento durante un periodo de tiempo significativo.

Este último nivel de intensidad de cavitación viene determinado por el número de cavitación por asfixia, σ_{ch} , el cual puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{ch} = \frac{P_1 - P_v}{\Delta P_{ch}} \quad (ec. 50)$$

En la ecuación anterior, ΔP_{ch} es la caída de presión a la que tiene lugar la condición de flujo bloqueado (máxima caída de presión); esta tiene la siguiente expresión:

$$\Delta P_{ch} = F_L^2 (P_1 - F_F P_v) \quad (ec. 51)$$

Donde F_L es el factor de recuperación de presión del líquido y F_F , el factor de relación de presión crítica del líquido.

$$F_L = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_{vc}}} \quad (ec. 52)$$

$$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_v}{P_{tc}}} \quad (\text{ec. 53})$$

En estas ecuaciones P_{vc} es la presión en la vena contracta y P_{tc} representa la presión crítica termodinámica absoluta del fluido, que para el agua es de 22,064 MPa.

En lo que se refiere a los efectos de escala de tamaño asociados con la cavitación por asfixia, no se observa su influencia en tal nivel de cavitación a diferencia de lo que ocurre en la cavitación incipiente y constante. En la figura 40 se observa la ausencia de estos efectos ya que, como se puede ver, para un determinado valor de la relación de diámetros, β , el número de cavitación por asfixia, σ_{ch} , es prácticamente el mismo para cualquier diámetro, D , de tubería. Asimismo, cabe mencionar que tampoco hay influencia de los efectos de escala de presión y velocidad, al igual que en los otros dos niveles de cavitación mencionados.

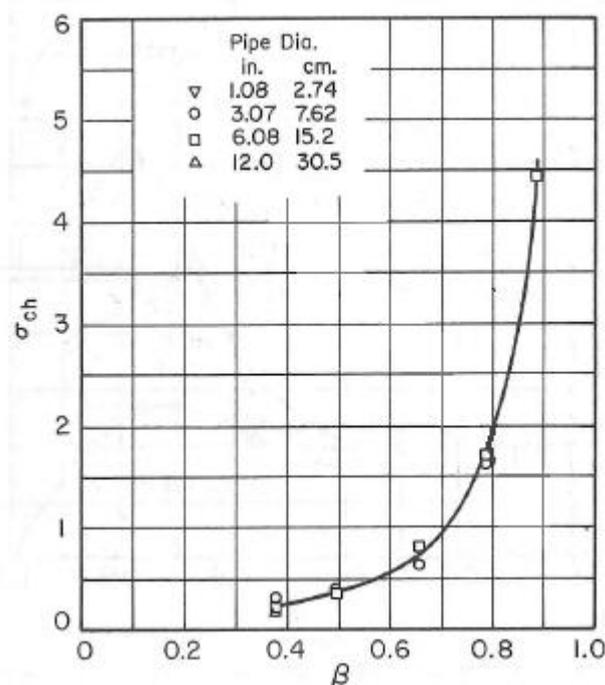


Figura 40 Variación del número de cavitación por asfixia, σ_{ch} , en función de la relación de contracción, β . Cavitation and size scale effects for orifices. P. Tullis et al.

Como se indica en [26], de acuerdo con la norma ISA-RP75.23-1995, la intensidad de la cavitación se puede evaluar mediante una gráfica semilogarítmica de medidas de nivel de presión sonora o aceleración de las vibraciones generadas debido al colapso de las burbujas frente al número de cavitación, σ . Para conseguir esta representación se coloca un acelerómetro justo aguas abajo de la placa de orificio y se miden las condiciones del flujo justo a la salida de la misma para un número determinado de condiciones de prueba que varían desde la no cavitación hasta el nivel más severo de cavitación. La presión aguas arriba de la placa de orificio se mantiene constante para cada conjunto de pruebas.

Tal gráfica está representada en la figura 41 y en ella se ven los niveles de cavitación acabados de comentar junto con los tres límites del coeficiente de cavitación (σ_i , σ_c y σ_{ch}). El régimen I se refiere a la ausencia de cavitación y en los demás tienen lugar los niveles de cavitación incipiente, cavitación constante y cavitación por asfixia, respectivamente.

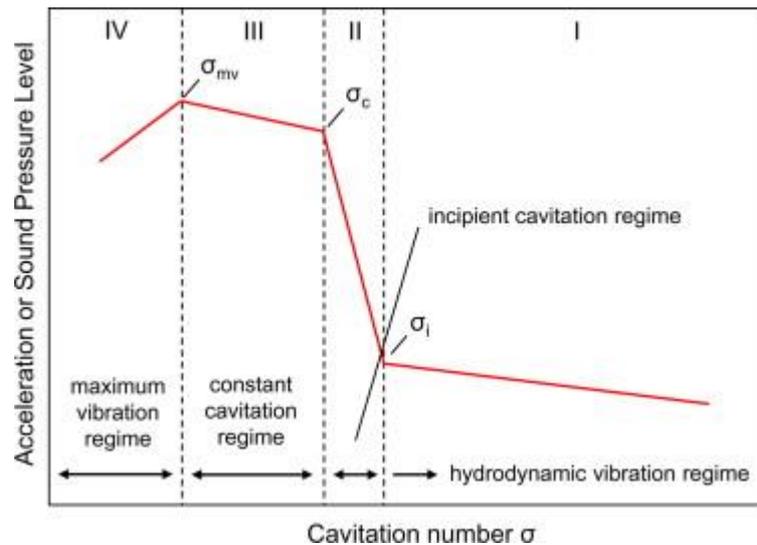


Figura 41 Identificación de los regímenes y límites de cavitación según la norma ISA. On cavitation occurrence in perforated plates. S.Malavasi et al.

En la imagen anterior es posible apreciar que, en los regímenes de cavitación incipiente y cavitación constante, a medida que disminuye el número de cavitación, la intensidad de este fenómeno aumenta, es decir, aumentan las vibraciones. Sin embargo, en el nivel de cavitación por asfixia, la aceleración de las vibraciones generadas disminuye según lo hace el coeficiente de cavitación por el motivo que se ha comentado anteriormente de que, en este régimen, el colapso de las burbujas de vapor se produce más abajo de la salida de la placa de orificio por lo que el acelerómetro no es capaz de medir su intensidad, ya que este está situado justo aguas abajo de la placa de orificio, localización en la que se encuentra la bolsa de vapor la cual también dificulta la captación de la presión acústica o aceleración de las vibraciones.

Lo acabado de comentar puede observarse también en las siguientes figuras. Estas representan los espectros de transformada de Fourier de la señal de presión en tres situaciones: (a) flujo no cavitante, (b) flujo cavitante con $\sigma = 0,72$ y (c) flujo en régimen de cavitación por asfixia con $\sigma = 0,1$. Dichas representaciones revelan que una vez comienza a producirse cavitación, el espectro se vuelve ruidoso, aunque en el tercer caso (cavitación por asfixia) no se observan dinámicas significativas por el motivo explicado.

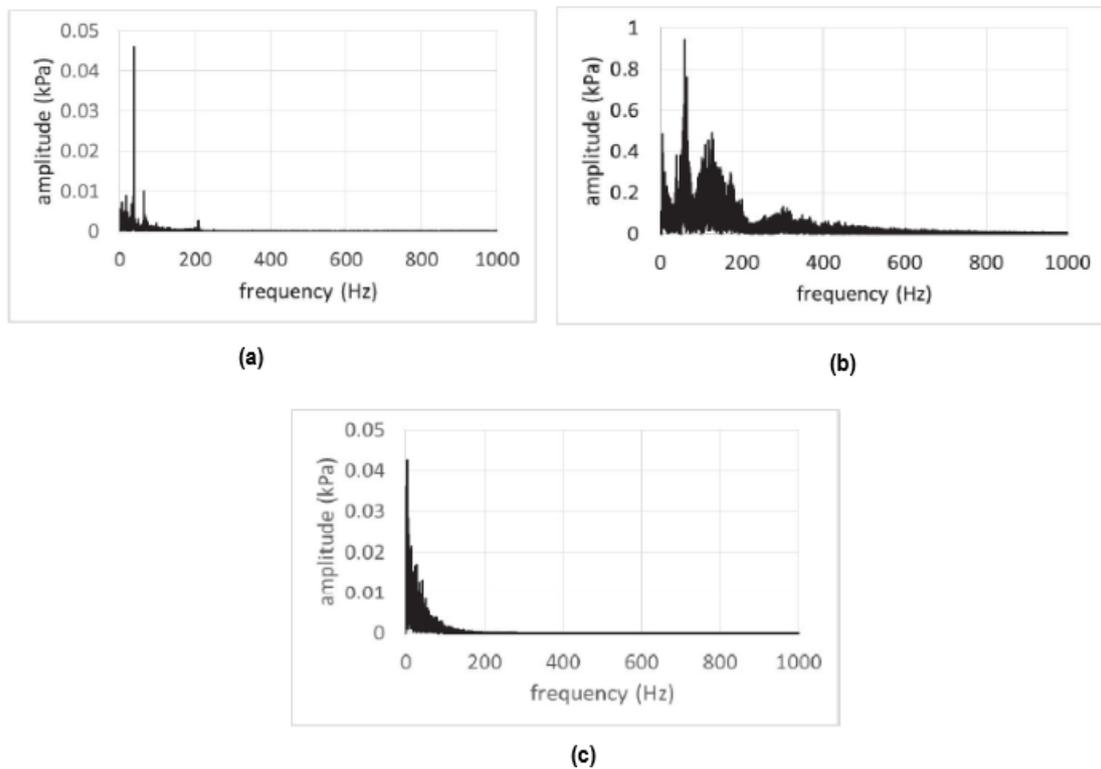


Figura 42 Espectros de frecuencia de la señal de presión para: (a) flujo no cavitante; (b) flujo cavitante con $\sigma = 0,72$; (c) flujo en régimen de cavitación por asfixia con $\sigma = 0,1$. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. P. Testud et al.

Por otro lado, otro parámetro para caracterizar el fenómeno de cavitación es la relación de presión P_2/P_1 o su inversa P_1/P_2 , aunque en el presente proyecto se trabajará con la primera definición. Un valor crítico de este parámetro es la relación de presión crítica, $(P_2/P_1)_{crit}$, la cual indica la relación de presión después de la cual no se puede aumentar más el caudal del flujo incluso con una reducción de la presión aguas abajo o un aumento de la presión aguas arriba. Es decir, por debajo de este valor el flujo se encuentra bloqueado por lo que su conocimiento permite advertir el inicio del último nivel de cavitación, la cavitación por asfixia. Por tanto, según lo acabado de comentar, se deduce que al igual que ocurre con el número de cavitación, cuanto menor es el valor de la relación P_2/P_1 , mayor será la intensidad de la cavitación.

En la figura 43 se reproduce la forma que adopta la curva característica $Q - P_2/P_1$, la cual representa la variación de la relación de presión con el caudal volumétrico. Es posible observar que a medida que la relación de presión disminuye, el caudal aumenta. Esta tendencia continúa hasta que se alcanza la relación de presión crítica que, como se acaba de comentar, indica el inicio de la cavitación por asfixia y el bloqueo del flujo. Dicha situación es fácilmente identificable en la gráfica puesto que se corresponde con la línea asintótica horizontal.

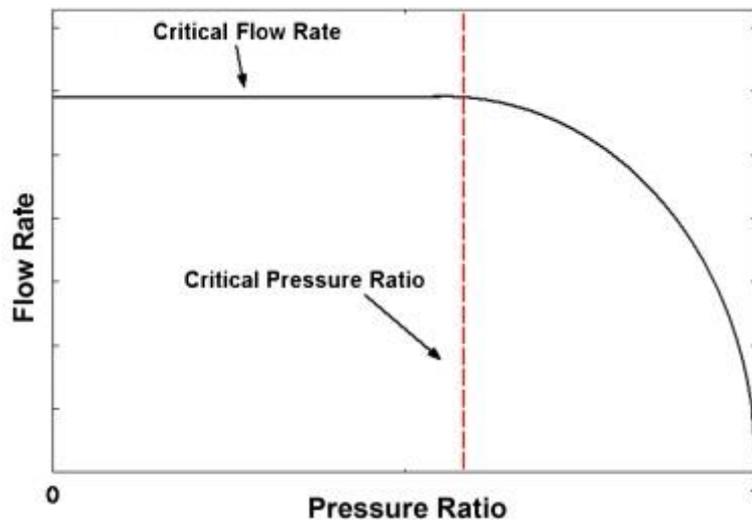


Figura 43 Curva característica $Q - P_2 / P_1$. Measurements of the flow of supercritical carbon dioxide through short orifices. John Edlebeck et al.

El empleo de esta curva característica resulta también frecuente en la caracterización de una placa de orificio, de igual modo que ocurre con la curva $Q - \sqrt{\Delta P}$.

4.4.7 Efectos de la cavitación

A lo largo de los epígrafes anteriores se ha hecho referencia a los problemas que ocasiona la presencia de cavitación para la instalación o dispositivo en la que tiene lugar. A continuación, se recopilan tales efectos negativos:

- **Vibraciones.**
Como la cavitación es un proceso transitorio en el que se originan muchas fuerzas, éstas inducen vibraciones a los elementos de su alrededor. Frecuentemente, son vibraciones de alta frecuencia y baja amplitud, las cuales son peligrosas cuando esa frecuencia sea próxima a la frecuencia natural de la instalación o de alguno de sus elementos.
- **Ruido.**
Es una de las principales características para detectar el fenómeno de la cavitación, pues es frecuente que esta se detecte antes a través del ruido que visualmente.
El ruido se genera principalmente debido al colapso de las burbujas de vapor aguas abajo de la placa de orificio al llegar a regiones donde la presión es superior a la presión de vapor, lo cual genera una onda de choque. En etapas tempranas de la cavitación, este ruido se describe como un pequeño estallido, mientras que en la cavitación más intensa el ruido es similar a un sólido rodando por la tubería, como se comentó anteriormente en el nivel de cavitación de daño incipiente.
- **Daños del material.**
Es el efecto más indeseado de la cavitación. El proceso de colapso de las burbujas de vapor es violento y en él se generan ondas de choque y microchorros. Si este proceso tiene lugar cerca de una superficie sólida, las

intensas perturbaciones generadas provocan elevadas tensiones localizadas en ella. La repetición del proceso de colapso de las burbujas, pueden llevar a una fatiga local del material dando lugar a una rotura o degradación del mismo; también pueden causar otros efectos como luminiscencia.

Visualmente, la cavitación se detecta por medio de la observación de pequeñas cavidades en el material debido a la erosión y desgaste producido por la implosión de las burbujas, tal y como es posible observar en la figura 44. Estas cavidades se convierten en nuevas zonas de nucleación provocando un aumento de la intensidad de la cavitación y como consecuencia de los daños generados. Concretamente, la imagen de la izquierda muestra la erosión que ha sufrido el material a causa del fenómeno de flashing comentado con anterioridad, mientras que, en la otra, los daños son provocados por el fenómeno de cavitación propiamente dicho. En ambas imágenes, se observa la diferencia en el aspecto físico con el que queda la pieza después de los daños sufridos, pues mientras en la primera, las superficies erosionadas aparecen “brillantes”, en la segunda, el material se ve más opaco, oscuro y granulado.



Figura 44 Daños materiales ocasionados por el fenómeno de la cavitación. AMS Steam Technology. Marc Manich.

Además, vinculado al daño por erosión se encuentra la corrosión, ya que, dado que la cavitación elimina la capa de óxido (resultado de la pasivación) que cubre el metal y lo protege, el material “fresco” queda expuesto, lo cual acelera la corrosión. Por tanto, puede decirse que la cavitación magnifica el efecto de la corrosión.

- Reducción del rendimiento de la instalación o dispositivo en la que ocurre el fenómeno de cavitación.

Como consecuencia de las vibraciones y el desgaste que sufren la instalación o algunos de sus elementos a causa de la cavitación, estos verán reducidas sus prestaciones y, por consiguiente, su vida útil. Todo ello supone un coste adicional, motivo por el cual resulta importante un correcto estudio del fenómeno.

No obstante, el fenómeno de cavitación también cuenta con una serie de aplicaciones útiles como las que aparecen recopiladas a continuación, aunque no relacionadas con el ámbito industrial al que se refiere el presente trabajo de investigación:

- En el campo de la medicina, tiene aplicabilidad para operaciones no invasivas tales como rotura de piedras en el riñón por medio de ultrasonidos o tratamientos anticelulitis y rejuvenecedores de piel.
- En plantas de tratamiento de aguas residuales, la cavitación sirve para la limpieza y purificación del agua, ya que sus condiciones extremas permiten la

eliminación de cianobacterias, microorganismos y levaduras o productos farmacéuticos de esta.

- Limpieza de contaminantes o partículas no deseadas en la industria.
- Mezcla u homogenización de partículas suspendidas en un compuesto líquido como es el caso de pinturas industriales o la leche.

5 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El banco de ensayos hidráulicos empleado para la realización de los experimentos que componen este trabajo de investigación está localizado en el Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIT) de Ferrol, en el Campus de Esteiro.

Dicha instalación fue construida de acuerdo con las normas ANSI/ISA-75.02:2008 [21] e IEC-EN 60534-2-3:2016 [23], según las cuales un banco de ensayos debe seguir el siguiente esquema básico:

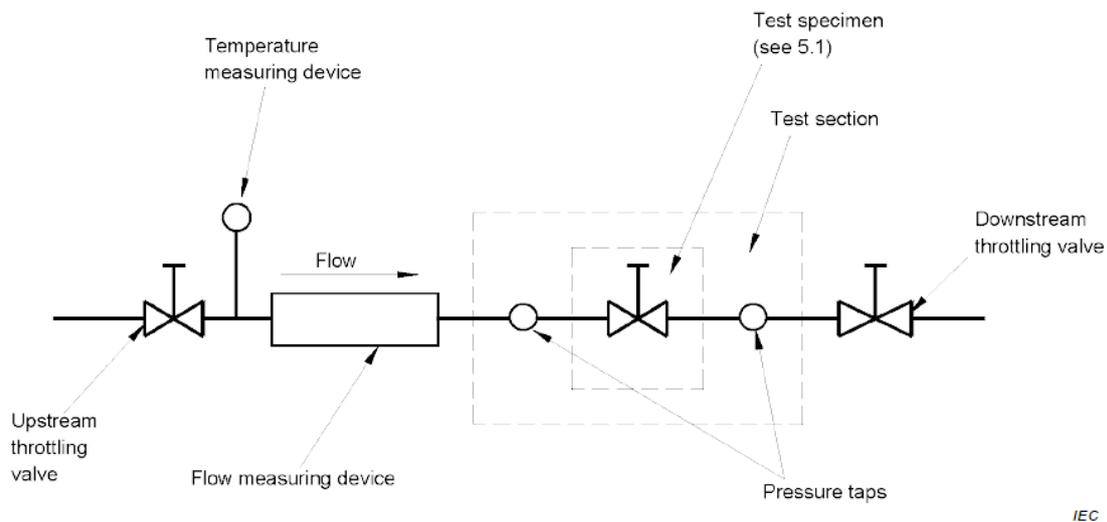


Figura 45 Esquema básico de un sistema de ensayos. Norma IEC-EN 60534-2-3:2016

Cada uno de los elementos señalados en la imagen anterior son explicados a continuación:

- **Test specimen.**

El ejemplar de ensayo es el elemento de estudio en el sistema, incluyendo también los posibles dispositivos adicionales que puede llevar conectados a él. En este caso se trata, por tanto, de una placa de orificio.

- **Test section.**

La sección de pruebas (o ensayos) se compone de las tuberías aguas arriba y aguas abajo del ejemplar de ensayo. Estas deben tener el mismo diámetro nominal y sus superficies internas deben estar libres de óxido o cascarilla de laminación y sin irregularidades que puedan ocasionar pérdidas excesivas por fricción del fluido.

En la figura 46 se muestran los requisitos que debe cumplir la sección de pruebas, particularmente las longitudes mínimas de las tuberías adyacentes al elemento de estudio. La leyenda para entender dicha imagen es la siguiente:

- l_1 : dos veces el diámetro nominal de la tubería, es decir, 2 DN.
- l_2 : seis veces el diámetro nominal de la tubería, es decir, 6 DN.
- l_3 : como mínimo dieciocho veces el diámetro nominal de la tubería, es decir, ≥ 18 DN.
- l_4 : como mínimo una vez el diámetro nominal de la tubería, es decir, ≥ 1 DN.

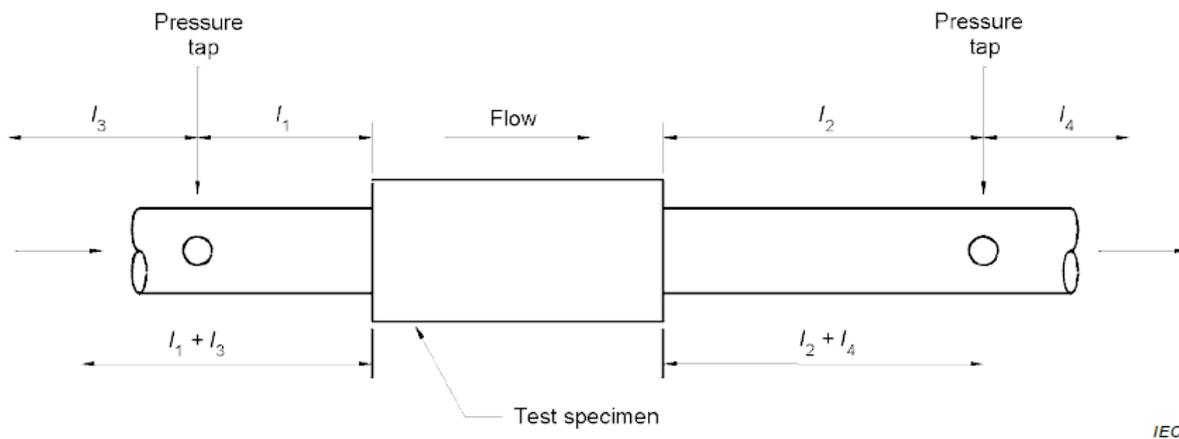


Figura 46 Configuración estándar de la sección de pruebas. Norma IEC-EN 60534-2-3:2016.

- **Throttling valves.**

Las válvulas de estrangulamiento aguas arriba y aguas abajo son empleadas para controlar el diferencial de presión a través del ejemplar de ensayo y para mantener una presión específica aguas arriba o aguas abajo de él.

En cuanto al estilo de ambas, no hay ninguna restricción al respecto. Sin embargo, la válvula de estrangulamiento aguas abajo puede tener un tamaño nominal mayor que la sección de pruebas para asegurar que se pueda alcanzar la condición de flujo bloqueado en el ejemplar de ensayo.

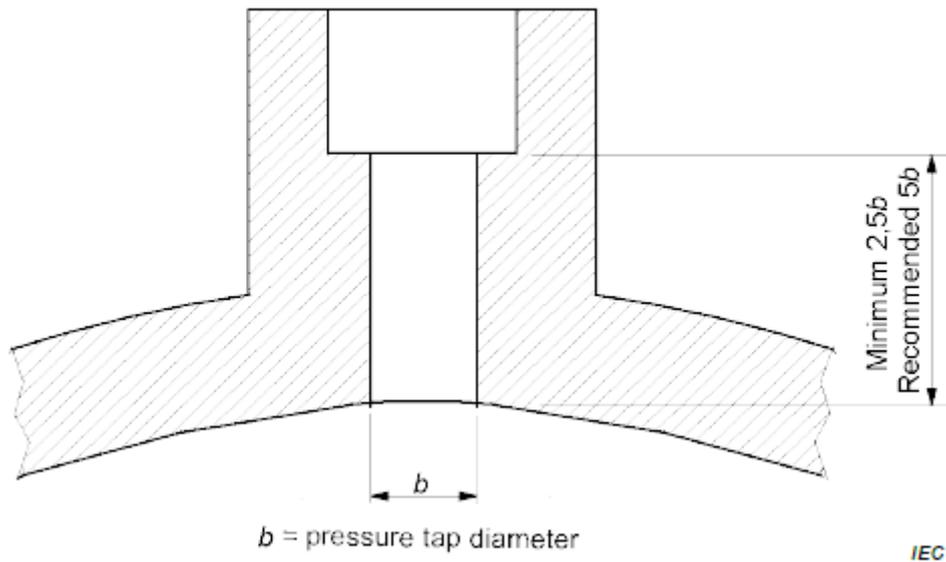
- **Flow measurement.**

El caudalímetro, que es el dispositivo con el que se medirá el caudal promedio en tiempo real, puede estar ubicado tanto aguas arriba como aguas abajo de la sección de pruebas. No debe tener un error de precisión superior a $\pm 2\%$ del valor real, y la resolución y la repetibilidad del instrumento debe estar dentro de $\pm 0,5\%$. Además, es importante calibrarlo con la frecuencia necesaria para mantener la precisión especificada.

- **Pressure taps.**

Las tomas de presión deben instalarse en las tuberías de la sección de pruebas de acuerdo con los requisitos especificados en la figura 46. Como se va a trabajar con un fluido incompresible (agua), las tomas de presión se ubican horizontalmente con el objeto de reducir la posibilidad de acumulación de suciedad o atrapamiento de aire.

En lo que se refiere a su construcción, las tomas de presión deben cumplir los requisitos que figuran en la siguiente imagen.



Size of pipe	"b" Not exceeding	"b" Not less than
Less than 50 mm	6 mm	3 mm
50 mm to 75 mm	9 mm	3 mm
100 mm to 200 mm	13 mm	3 mm
250 mm and greater	19 mm	3 mm

Figura 47 Conexión y medidas recomendadas de las tomas de presión. Norma IEC-EN 60534-2-3:2016.

- **Pressure measurement.**

Todas las mediciones de presión y diferencia de presión se deben realizar utilizando transductores de presión con un índice de precisión del $\pm 2\%$ del valor real. Además, tales dispositivos deben calibrarse con frecuencia para mantener esa precisión.

- **Temperature measurement.**

El termopar es el dispositivo empleado para medir la temperatura del fluido con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ del valor real. Se ubica aguas arriba del ejemplar de ensayo para medir la temperatura del fluido a su entrada y debe colocarse de tal forma que tenga un impacto mínimo en las mediciones de flujo y presión.

Durante el transcurso de cada ensayo, la temperatura del fluido de entrada al ejemplar de ensayo debe permanecer constante con un margen de $\pm 3^\circ\text{C}$.

En los siguientes subapartados se procede a explicar con detalle la instalación experimental con la que se ha trabajado. Para ello, se hará una distinción entre lo que es el banco de ensayos hidráulicos propiamente dicho y el sistema de adquisición de datos.

5.1 Banco de ensayos hidráulicos

Previamente al comienzo de este estudio experimental fue preciso modificar el banco de ensayos hidráulicos, concretamente la sección de pruebas, en la cual se ha sustituido una válvula de mariposa tipo wafer sin bridas de acero por un dispositivo de placa de orificio. Asimismo, durante la investigación, se introdujo una nueva modificación incorporando al banco de ensayos un transductor de presión no estacionario justo aguas abajo de la placa de orificio.

La imagen 48 muestra la instalación con la que se ha trabajado, mientras que la figura 49 es un recorte del plano de la misma; en el anexo A es posible observar con mayor detalle dicho plano.



Figura 48 Banco de ensayos hidráulicos del Centro de Investigaciones Tecnológicas de Ferrol.

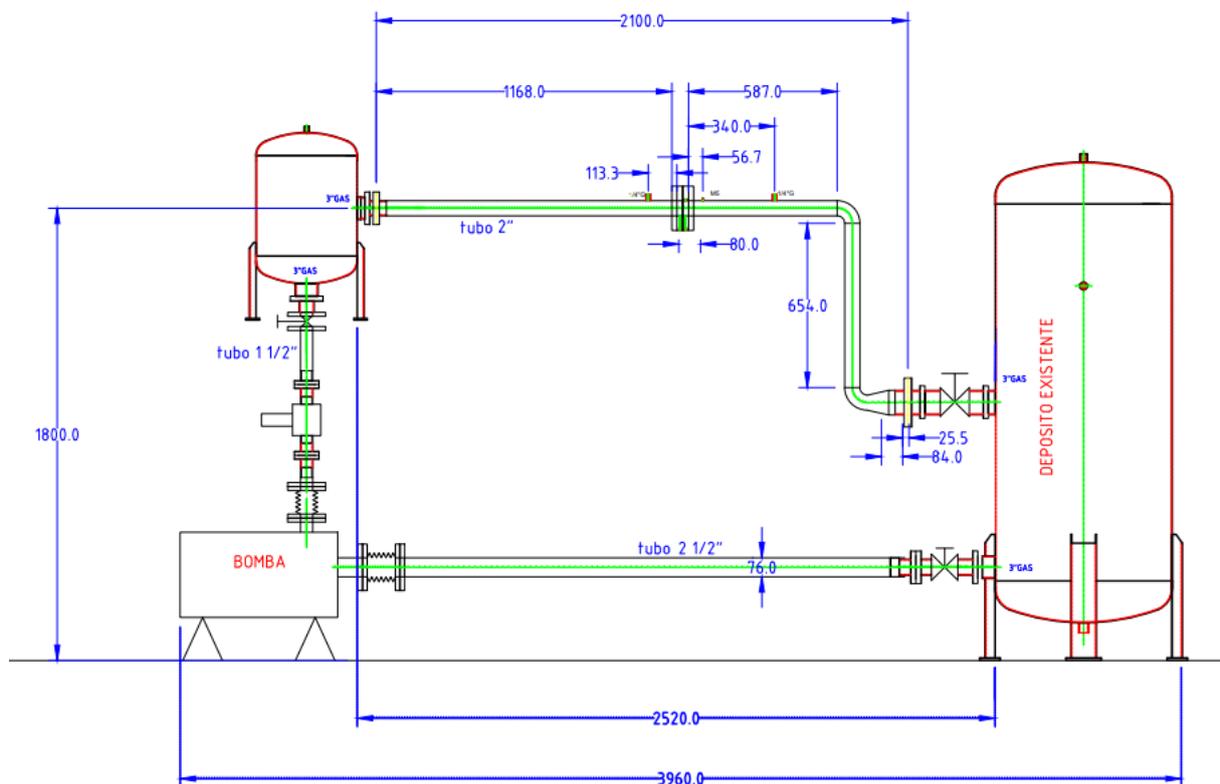


Figura 49 Recorte del plano 1 del anexo A del banco de ensayos hidráulicos del Centro de Investigaciones Tecnológicas de Ferrol. Plano realizado por D.C.M. Salorio S.L.

Como puede verse, el fluido de trabajo, agua, es forzado a fluir en sentido horario formando un circuito cerrado gracias a la bomba centrífuga instalada, la cual se controla a través de un variador de frecuencia. Dicha bomba extrae el fluido por la parte inferior del depósito grande de manera que este atraviesa el dispositivo de placa de orificio de izquierda a derecha (→).

A continuación, se explicarán cada uno de los elementos que componen el banco de ensayos hidráulicos.

5.1.1 Sección de pruebas

La sección de pruebas está formada por dos tramos de tubería DN 50. Esto puede verse en las figuras 50 y 51, siendo esta última un recorte del plano 1 (anexo A); en ellas también es posible observar el conjunto de placa de orificio y las tomas de presión.

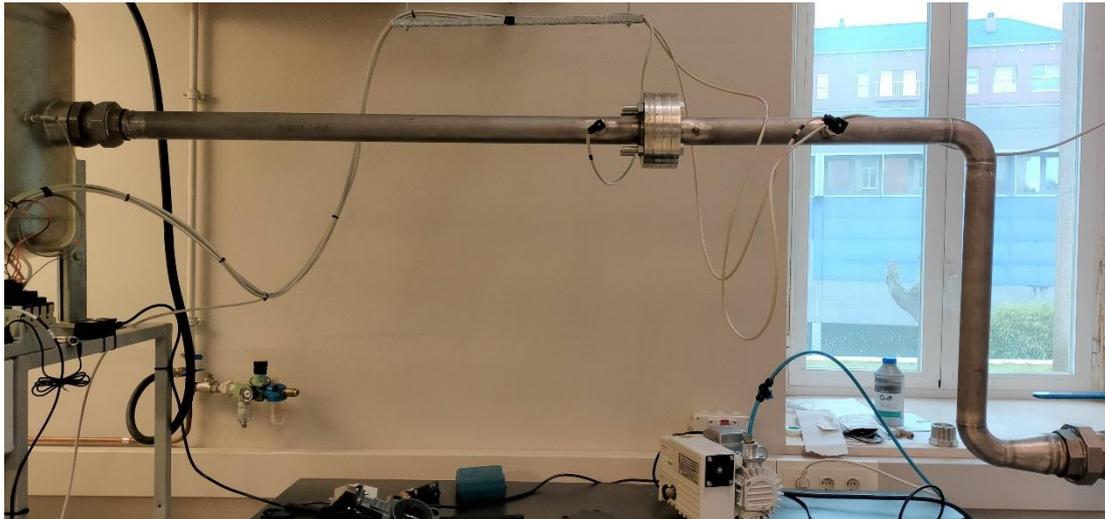


Figura 50 Sección de pruebas del banco de ensayos hidráulicos.

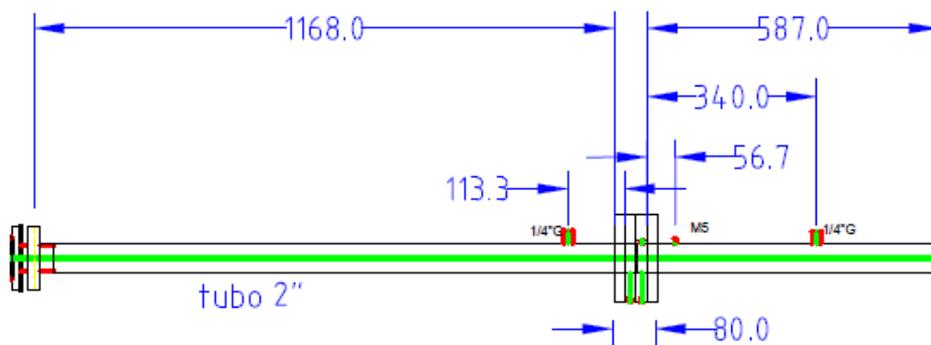


Figura 51 Recorte de la sección de pruebas del plano 1 del anexo A del banco de ensayos hidráulicos. Plano realizado por D.C.M. Salorio S.L.

Como se ha dicho, la sección de ensayos consta de dos tubos DN 50, lo que es equivalente a 2" gas. La abreviatura DN hace referencia al diámetro nominal de un tubo, que a su vez equivale aproximadamente al diámetro interior del mismo. Concretamente son tuberías de acero al carbono SCH.10, las cuales, según el estándar American Standard Pipe Diameters, tienen un diámetro exterior, D_e , de 2,375 pulgadas, un diámetro interior real, D_i , de 2,157 pulgadas y un espesor de pared, e , de 0,109 pulgadas, como es posible ver en la figura 52. Teniendo en cuenta que 1 *pulgada* = 25,4 *mm*, los valores anteriores son equivalentes a $D_e = 60,33$ *mm*, $D_i = 54,79$ *mm* y $e = 2,77$ *mm*.

American Standard Pipe Diameters									
Trade	Nom. OD	Schedule 10		Schedule 40		Schedule 80		Schedule 160	
Size		ID	Wall	ID	Wall	ID	Wall	ID	Wall
1/8	0.405	0.307	0.049	0.269	0.068	0.215	0.095		
1/4	0.540	0.410	0.065	0.364	0.088	0.302	0.119		
3/8	0.675	0.545	0.083	0.493	0.091	0.423	0.126		
1/2	0.840	0.674	0.083	0.622	0.109	0.546	0.147	0.466	0.187
3/4	1.050	0.884	0.109	0.824	0.113	0.742	0.154	0.614	0.218
1	1.315	1.097	0.109	1.049	0.133	0.957	0.179	0.815	0.250
1-1/4	1.660	1.442	0.109	1.380	0.140	1.278	0.191	1.160	0.250
1-1/2	1.900	1.682	0.109	1.610	0.145	1.500	0.200	1.338	0.281
2	2.375	2.157	0.109	2.067	0.154	1.939	0.218	1.689	0.343
2-1/2	2.875	2.635	0.120	2.469	0.203	2.323	0.276	2.125	0.375
3	3.500	3.260	0.120	3.068	0.216	2.900	0.300	2.626	0.437
4	4.500	4.260	0.120	4.026	0.237	3.826	0.337	3.438	0.531
5	5.563	5.295	0.134	5.047	0.258	4.813	0.375	4.313	0.625
6	6.625	6.357	0.134	6.065	0.280	5.761	0.432	5.189	0.718
8	8.625	8.329	0.148	7.981	0.322	7.625	0.500	6.813	0.906

Figura 52 Dimensiones de tubería según su tamaño comercial. American National Pipe.

A continuación, se procede a comprobar si la sección de pruebas cumple con los requisitos que especifica la norma IEC-EN 60534-2-3:2016 [23] y que aparecen reflejados en la figura 46.

Distancia respecto al conjunto de placa de orificio	Medida según la norma (mm)	Medida real (mm)
Longitud recta aguas arriba	$\geq l_1 + l_3 = 2 DN + 18 DN = 20 DN = 20 \cdot 50 = 1000$	1168
Longitud recta aguas abajo	$\geq l_2 + l_4 = 6 DN + 1 DN = 7 DN = 7 \cdot 50 = 350$	587
Toma de presión aguas arriba	$l_1 = 2 DN = 2 \cdot 50 = 100$	113,3
Toma de presión aguas abajo	$l_1 = 6 DN = 6 \cdot 50 = 300$	340

Tabla 2 Comprobación cumplimiento de la norma IEC-EN 60534-2-3:2016 en la sección de pruebas.

Gracias a la tabla anterior es posible verificar que realmente la sección de ensayos cumple la normativa anteriormente mencionada, estando los valores marcados por esta por debajo de los que se tienen en la instalación.

Además, tal y como se puede observar en la figura 51, las tomas de presión instaladas en las tuberías tienen un diámetro de $\frac{1}{4}$ "gas, equivalente a un DN 8. Por tanto, también se cumple con el requisito especificado por la norma para el diámetro de las tomas de presión (figura 47); según este, para tuberías con un DN 50, el diámetro de la toma de presión no debe ser menor que 3 mm ni mayor que 9 mm.

5.1.2 Placas de orificio

Para la ejecución de los experimentos que componen este proyecto se han empleado dos placas de orificio. Independientemente de cual se emplee, la placa de orificio se encuentra alojada entre dos bridas de acero de 165 mm de diámetro. Este conjunto se coloca entre las bridas de acoplamiento de la tubería de la propia instalación (figura 53).

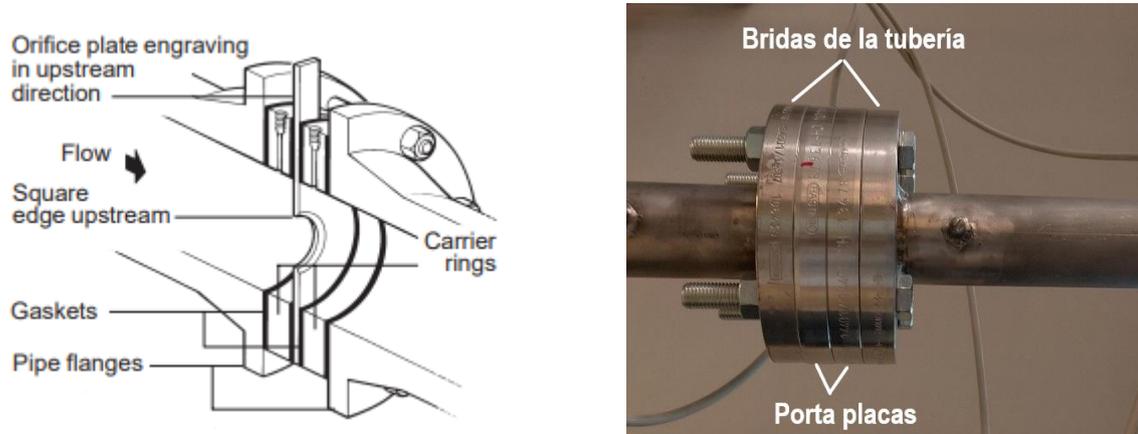


Figura 53 Instalación del conjunto de placa de orificio. Spirax Sarco “M410 Orifice Plate Assemblies. Installation and Maintenance Instructions”.

Por tanto, el conjunto de placa de orificio consta de una placa de orificio, bridas o porta placas y juntas tóricas para asegurar la estanqueidad. Cabe mencionar que las dos bridas entre las que va encajada la placa de orificio (figura 54) son opcionales y en este caso se emplean para sustituir el espacio (44 mm) que ocupaba la válvula de mariposa anteriormente instalada, lo cual permite no tener que remplazar los tramos de tubería a ambos lados por otros de mayor longitud puesto que únicamente con el espesor de la placa de orificio no es suficiente.

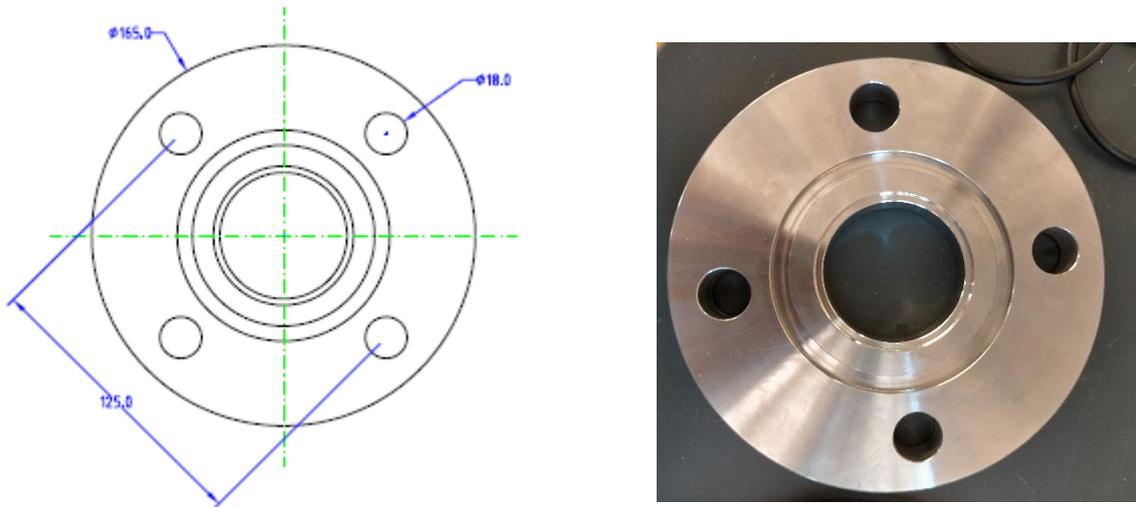


Figura 54 . Recorte del porta placa del plano 2 del anexo A e imagen de este elemento.

La figura 55 es un recorte del plano 2 del anexo A y muestra el conjunto de placa de orificio mencionado. En ella se puede ver que las placas de orificio con las que se ha trabajado tienen un diámetro nominal DN 60 y un espesor de 4 mm, y que se han utilizado tres juntas tóricas.

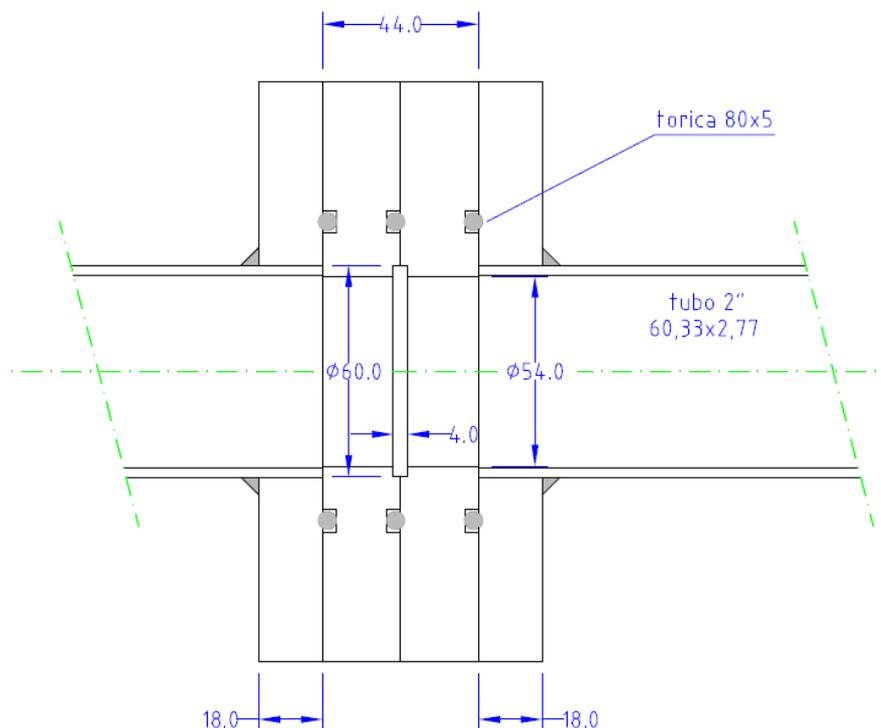


Figura 55 Recorte del conjunto de placa de orificio del plano 2 del anexo A.

Como se ha comentado, se emplean dos placas de orificio distintas como objeto de estudio, una con un orificio de 25 mm de diámetro y otra de 15 mm. Estas se muestran en las siguientes imágenes.



Figura 56 Placas de orificio de 25 mm y 15 mm empleadas.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de ambas placas de orificio.

Característica		Placa de orificio 15 mm	Placa de orificio 25 mm
Diámetro nominal, DN		60	
Número de orificios		Un único orificio en el centro	
Diámetro del orificio, d		15 mm	25 mm
Relación de contracción, β (tubería de DN 50)		0,3	0,5
Espesor de la placa, L		4 mm	
Espesor relativo, α		0,267	0,16
Biselado		Orificio biselado aguas abajo Ángulo del bisel de 45°	
Tipo de placa de orificio	Según la ubicación y forma del orificio	Placa de orificio concéntrica de borde cuadrado	
	Según la relación $\frac{L}{d}$	Placa de orificio delgada ($\frac{L}{d} < 2$)	

Tabla 3 Principales características de las placas de orificio utilizadas.

Es importante asegurarse de que, al colocar la placa de orificio entre las bridas, el chaflán de 45° esté hacia abajo (cara aguas abajo). Por este motivo se marca la cara aguas arriba de la placa de orificio de la forma en la que puede verse en la figura 56, así se evita cualquier confusión y se garantiza que el fluido circule desde la cara aguas arriba hacia la cara aguas abajo. Por tanto, ambas placas de orificio son unidireccionales.

5.1.3 Depósitos

Tal y como es posible ver en las figuras 48 y 49, la instalación cuenta con dos depósitos distintos.

5.1.3.1 Depósito grande

Por un lado, se tiene un depósito grande de 700 L de capacidad (figura 57) situado a continuación de la sección de pruebas y cuya estructura es de acero inoxidable AISI 316L por su resistencia a la corrosión. Aproximadamente a media altura, por su parte izquierda, se encuentra conectado con una tubería de 3" gas, equivalente a un DN 80, por donde llega el fluido procedente de la sección de pruebas, y por su parte inferior izquierda está conectado a una tubería de 2 ½ "gas, lo que equivale a un DN 65, por donde sale el fluido en dirección a la bomba centrífuga.



Figura 57 Depósito de 700 L.

Este depósito sirve para almacenar el suficiente fluido para realizar los ensayos sin cambiar su temperatura de forma significativa. Asimismo, también actúa como un depósito de vacío para reducir la presión aguas abajo del dispositivo de placa de orificio, aumentando el salto de presión a través de este (la presión aguas arriba se mantiene constante), en el momento en que ya no es posible realizar esto con la válvula de estrangulamiento situada aguas abajo de la sección de pruebas. Este vacío se genera gracias al doble cabezal que tiene el depósito en su parte superior; uno de los cabezales está conectado a una bomba de vacío, la cual purga el aire que hay en el interior del depósito en su parte superior, y el otro está conectado a una válvula de purga que permite, si está abierta, la conexión con la atmósfera debiendo, por tanto, estar cerrada para generar el vacío.

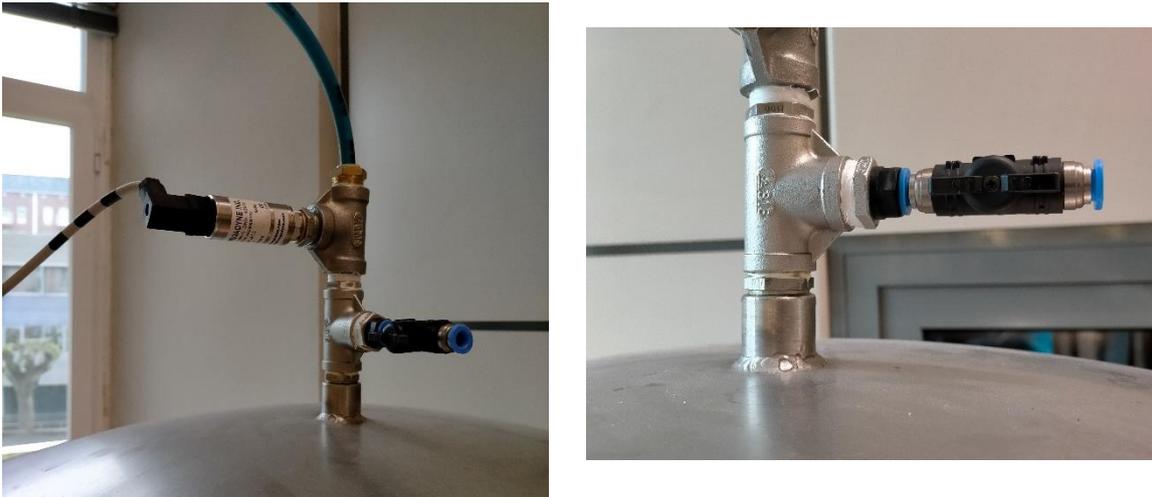


Figura 58 Doble cabezal en la parte superior del depósito grande y detalle de la válvula de purga.

Por otro lado, con este depósito también es posible calentar el agua si fuese necesario gracias al termostato de varilla (figura 59) ubicado en la parte inferior derecha del mismo. Dicho termostato consiste en dos láminas de metal, con diferente coeficiente de dilatación térmico, unidas y se puede regular entre 20°C y 90°C. Con este dispositivo se mantiene el fluido de la instalación a la temperatura deseada. Su funcionamiento se basa en el principio de la diferencia de expansión térmica de dos materiales. Cuando la temperatura cambia, la lámina modifica su dimensión física automáticamente, actuando sobre unos contactos que abren o cierran un circuito eléctrico desactivando o activando el sistema de calentamiento.



Figura 59 Termostato de varilla.

Asimismo, la instalación se llena y se vacía también a través de este depósito grande. El llenado se realiza gracias a la conexión que tiene con la red de abastecimiento en su parte trasera a media altura. Es necesario aclarar que el depósito no se llenará en su totalidad, sino que el nivel de agua estará a la altura del ojo de buey ubicado en su parte delantera.

Esto se hace porque, como ya se ha comentado, este depósito está conectado con una bomba de vacío por lo que esta no puede aspirar agua, ya que sino se averiaría, y haciendo esto nos aseguramos de que no ocurra. Por tanto, el llenado de la instalación se hace con el ojo de buey abierto, al igual que la válvula de purga. Una vez el nivel de agua esté a la altura del ojo de buey, se cierra la llave de abastecimiento, se enciende la bomba centrífuga y se abre lentamente la válvula de impulsión aguas abajo de esta hasta purgar el aire almacenado en la tubería superior horizontal de la sección de ensayos. En lo que se refiere al vaciado de la instalación, este se lleva a cabo gracias a la conexión entre la parte inferior del depósito y un sumidero.

Tanto el sistema de llenado como el de vaciado y el ojo de buey se muestran en las siguientes imágenes.



Figura 60 Sistema de llenado, ojo de buey y sistema de vaciado, por este orden.

5.1.3.2 Depósito pequeño

El banco de ensayos hidráulicos cuenta también con un depósito pequeño (figura 61). La capacidad de este es de 50 L y está situado antes de la sección de pruebas. Por su parte inferior está conectado con una tubería de 1 ½ "gas, equivalente a un DN 40, por donde llega el fluido procedente de la bomba centrífuga y a media altura por su lado derecho está conectado a la tubería 2" gas (DN 50) de la sección de ensayos.

Se trata de un depósito de remanso ya que su misión es eliminar las fluctuaciones y turbulencias del flujo ocasionadas por la bomba centrífuga con el objeto de estabilizarlo antes de atravesar la placa de orificio. En su parte superior dispone de una válvula para purgarlo una vez que el llenado de la instalación finaliza; abriendo dicha válvula, el aire que queda en la parte superior del depósito sale debido a que la presión en su interior es mayor que la atmosférica. Resulta conveniente purgar este depósito cada vez que se efectúa un ensayo para garantizar que no haya aire en él que pueda aumentar las posibilidades de tener cavitación.

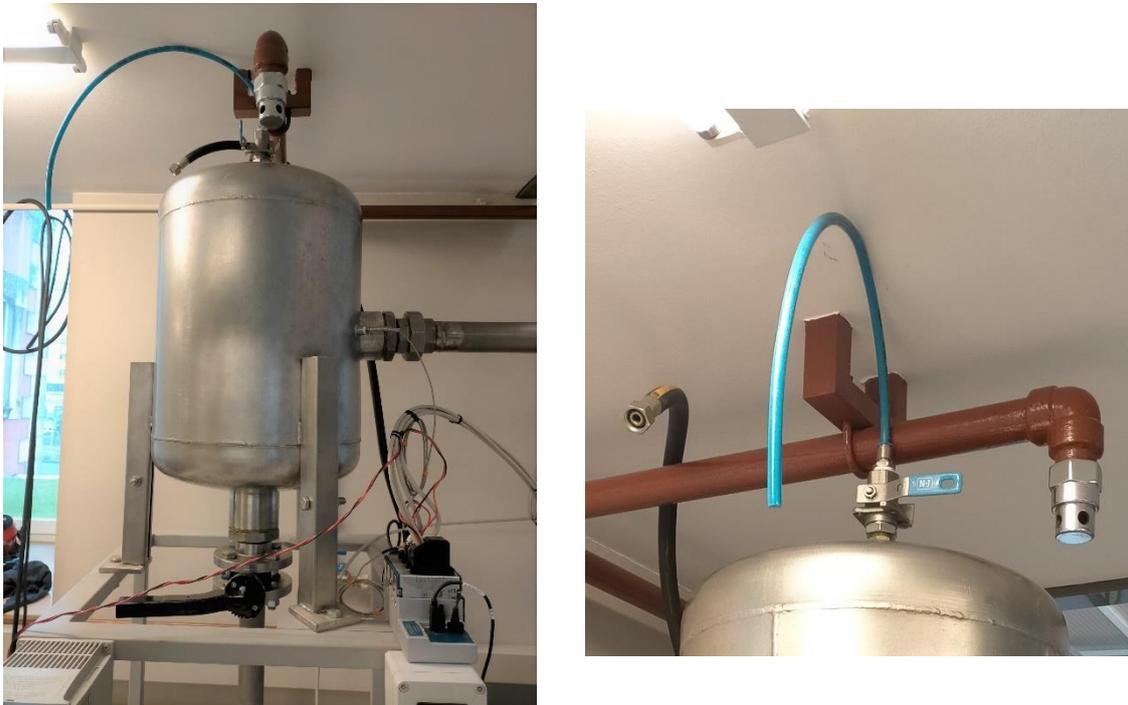


Figura 61 Depósito de 50 L y válvula para purgarlo.

Además, como puede verse en la figura anterior, el depósito se encuentra sobre un soporte metálico anclado con el propósito de amortiguar las vibraciones producidas por la bomba centrífuga y evitar su transmisión al resto de los elementos del banco de ensayos.

5.1.4 Bombas

El banco de ensayos hidráulicos cuenta con dos bombas: una bomba centrífuga y una bomba de vacío.

5.1.4.1 Bomba centrífuga

La bomba centrífuga (figura 62) se emplea para hacer circular el fluido de trabajo a través de la instalación. Por ser una bomba centrífuga el arranque de la misma se efectúa con la válvula de aspiración abierta para garantizar que esté cebada y la de impulsión cerrada. Una vez en funcionamiento y alcanzado un determinado régimen de giro, se abre la válvula de impulsión lentamente para evitar el fenómeno del golpe de ariete. En cuanto a la forma de parada, se reduce la potencia y, por tanto, el régimen de giro, hasta un cierto límite, se cierra gradualmente la válvula de impulsión y posteriormente se para el motor.

La potencia de la bomba se controla con un variador de frecuencia trifásico (figura 62). Este dispone de un saliente, gracias al cual resulta más fácil el control, que gira en sentido antihorario para aumentar la frecuencia y, por consiguiente, la potencia y el régimen de giro de la bomba, y en sentido horario para conseguir el efecto contrario.

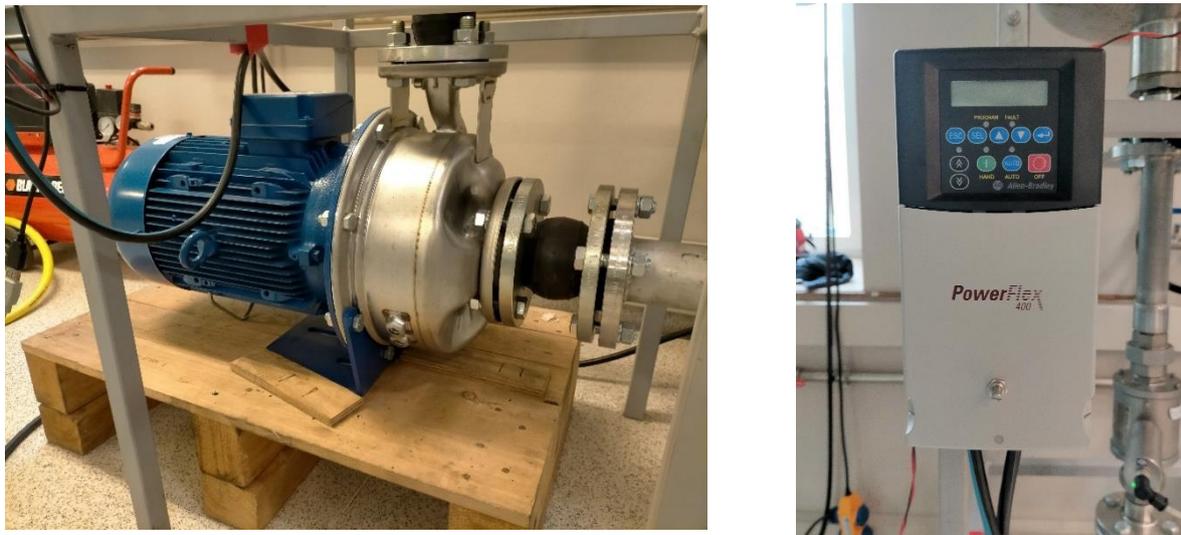


Figura 62 Bomba centrífuga y variador de frecuencia.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de esta bomba centrífuga.

Fabricante	Baeza S.A.
Modelo	ESHE 40 – 250/110/P25VSSA
Material del cuerpo, impulsor, eje y tornillos	Acero inoxidable AISI 316 según EN 733
Tipo de conexión de admisión	DN 65 (2 ½ “gas)
Tipo de conexión de impulsión	DN 40 (1 ½ “gas)
Tipo de motor	Asíncrono trifásico – 400/690 V – 20,2 A
Potencia eléctrica máxima a 29000 rpm	15 CV (11 kW)
Presión de trabajo máxima	12 bar
Temperatura mínima del líquido	-10 °C
Temperatura máxima del líquido	50 – 120 °C

Tabla 4 Principales características de la bomba centrífuga.

Asimismo, en la siguiente figura se representa la curva característica $H - Q$ de la bomba proporcionada por el fabricante.

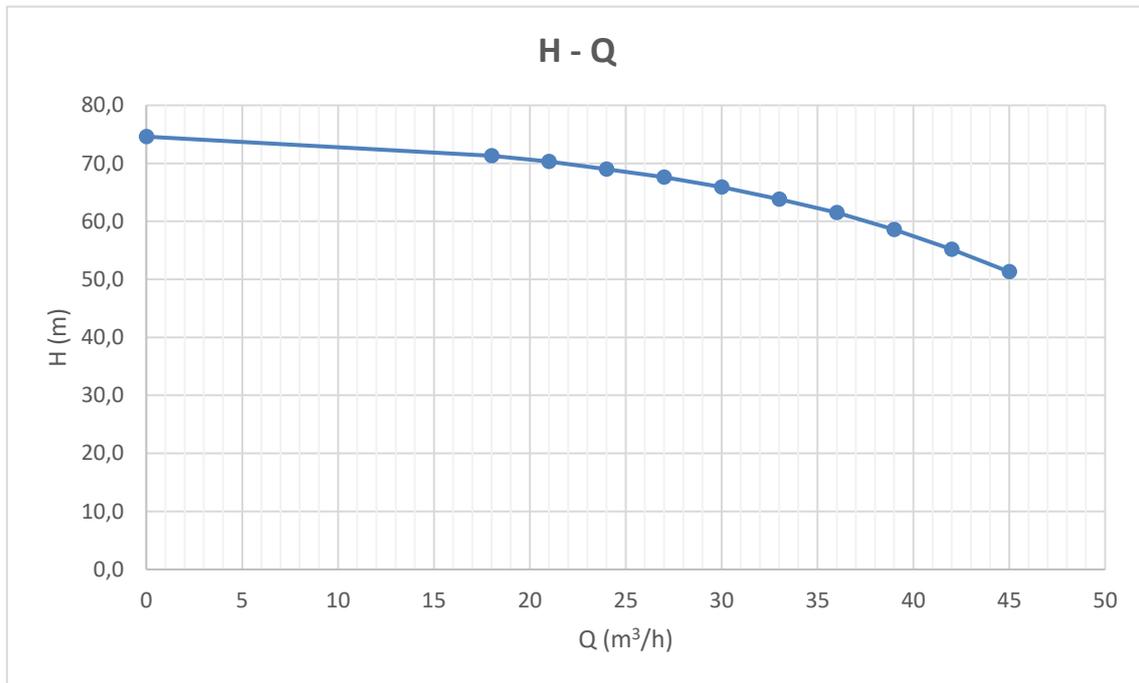


Figura 63 Curva característica de la bomba centrífuga.

Además, como es posible ver en la figura 62, la bomba presenta dos uniones flexibles con las tuberías en forma de juntas de expansión elastoméricas. Estas lo que hacen, al igual que la estructura metálica en la que se apoya el depósito pequeño, es absorber las vibraciones que genera dicha bomba centrífuga para evitar que se propaguen por la instalación y perturben internamente el flujo.

5.1.4.2 Bomba de vacío

Por otro lado, como se comentó al comienzo del subapartado, el banco de ensayos también cuenta con una bomba de vacío de aceite (figura 64) cuya función ya se ha explicado en el apartado 5.1.3.1. Esta bomba dispone de una válvula en el manguito de purga (figura 64) cuya apertura permite la aspiración del aire que hay en la parte superior del depósito de 700L.

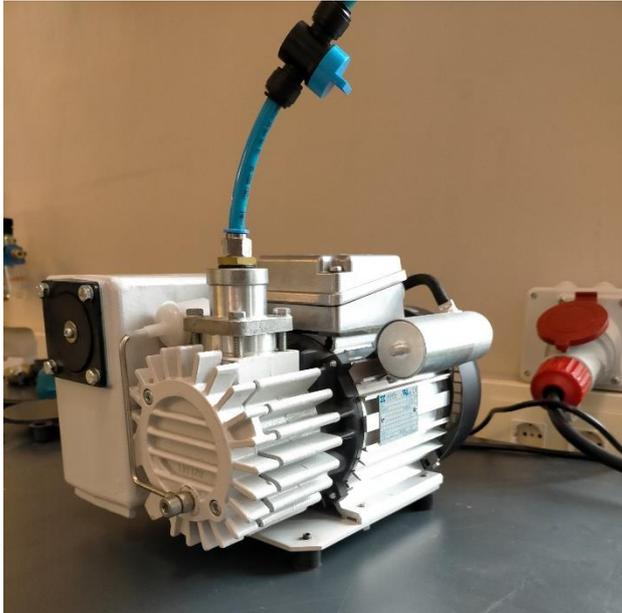


Figura 64 Bomba de vacío y válvula del manguito de purga.

Previamente a la purga del aire, es necesario que la bomba de vacío esté funcionando alrededor de 30 minutos con la intención de que el aceite alcance una temperatura elevada para evitar que la humedad que pueda llevar consigo el aire aspirado condense, contaminando el aceite. Por tanto, como su arranque es instantáneo una vez se acciona, es preciso asegurarse de que la válvula del manguito de purga se encuentra cerrada en ese momento, ya que el aceite todavía no ha alcanzado la temperatura adecuada y podría producirse el problema comentado.

5.1.5 Válvulas de estrangulamiento

En la instalación se tienen dos válvulas de estrangulamiento, una aguas arriba y otra aguas abajo de la sección de pruebas.

La válvula aguas arriba (figura 65) es una válvula de mariposa de DN 40 y PN 16. La abreviatura PN se refiere a la presión nominal de la válvula, es decir, a la presión máxima en bar a la que puede trabajar.

Esta válvula está ubicada entre el caudalímetro y el depósito de 50L y durante los ensayos está totalmente abierta (en paralelo con la tubería, figura 65.b), ya que el control de la presión aguas arriba de la sección de pruebas en un valor constante se lleva a cabo con el variador de frecuencia trifásico de la bomba centrífuga. Se trata, por tanto, también de la válvula de impulsión de dicha bomba.

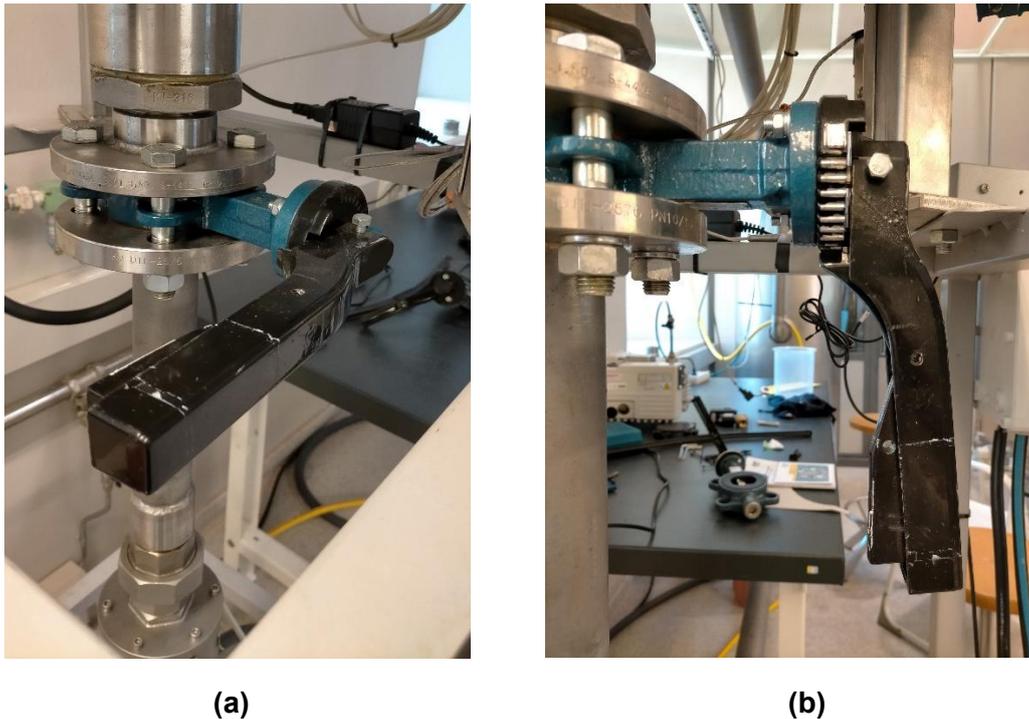


Figura 65 Válvula de estrangulamiento aguas arriba de la sección de pruebas: a) cerrada; b) abierta.

En cuanto a la válvula de estrangulamiento aguas abajo (figura 66), esta se encuentra ubicada entre la sección de pruebas y el depósito de 700 L. Se trata de una válvula de bola de DN 80 y PN 3, por lo que es de un tamaño nominal mayor que la sección de pruebas tal y como marca la norma IEC-EN 60534-2-3:2016 [23] y se comentó anteriormente. Gracias a esto nos aseguraríamos de que se alcanza la condición de flujo bloqueado, aunque para conseguirlo será necesaria la ayuda de la bomba de vacío.



Figura 66 Válvula de estrangulamiento aguas abajo de la sección de pruebas totalmente abierta.

Esta válvula se emplea para reducir la presión aguas abajo de la sección de ensayos y, por tanto, aumentar el salto de presión. Cuanto más abierta esté, menor será el

estrangulamiento que ocasiona (más caudal podrá circular) y, en consecuencia, menor será el valor de la presión aguas abajo y mayor el de la diferencia de presión a través de la placa de orificio.

5.1.6 Sistema de seguridad

Por último, el banco de ensayos hidráulicos cuenta con un interruptor (figura 67) con el que se acciona la alimentación trifásica de la bomba. Por tanto, también se puede emplear como sistema de seguridad para cortar dicha alimentación, y así detener instantáneamente el funcionamiento de la instalación en caso de emergencia.

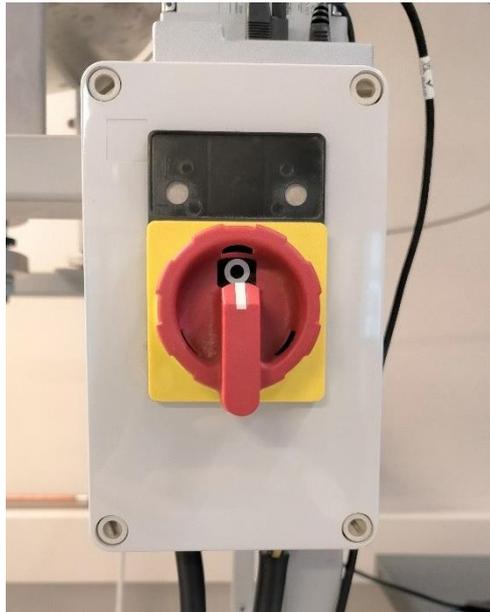


Figura 67 Sistema de seguridad en forma de interruptor.

5.2 Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos, o DAQ, es el proceso de digitalizar, a través de una conversión analógica-digital, fenómenos físicos del mundo real (sistema analógico), como voltaje, presión o temperatura, para su procesamiento, análisis y almacenamiento en un ordenador. Para ello se utiliza un módulo de digitalización o tarjeta de adquisición de datos.

Un sistema de adquisición de datos (figura 68) básicamente se compone de:

- **Sensores.**
También conocidos como transductores, son los elementos que convierten un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir. En función del tipo de sensor, su salida puede ser voltaje, corriente o resistencia, entre otros.
- **Dispositivo DAQ.**
El hardware DAQ actúa como la interfaz entre un PC y señales del mundo real. Por tanto, es el dispositivo que digitaliza las señales analógicas entrantes para que un PC pueda interpretarlas.
Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ son el circuito de acondicionamiento de señales, el convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC.

- Acondicionamiento de señales.
Manipulan las señales medidas convirtiéndolas en señales apropiadas para la entrada a la tarjeta de adquisición de datos puesto que estas a priori pueden ser ruidosas o demasiado peligrosas para medirse directamente.
 - Convertidor analógico-digital (ADC).
Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. En la práctica, las señales analógicas son continuas en el tiempo y un ADC realiza “muestras” periódicas de la señal a una razón predefinida. Estas muestras son transferidas a un PC donde la señal original es reconstruida.
 - Bus de PC.
Es la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y el PC para transferirle las instrucciones y datos medidos.
- Elemento computacional.
El PC se usa para procesar, visualizar y almacenar los datos de medida a través de distintos softwares.



Figura 68 Partes de un sistema de adquisición de datos (DAQ). National Instruments.

Esencialmente, el funcionamiento de un sistema de adquisición de datos, en su conjunto, es el que se describe en la siguiente figura.

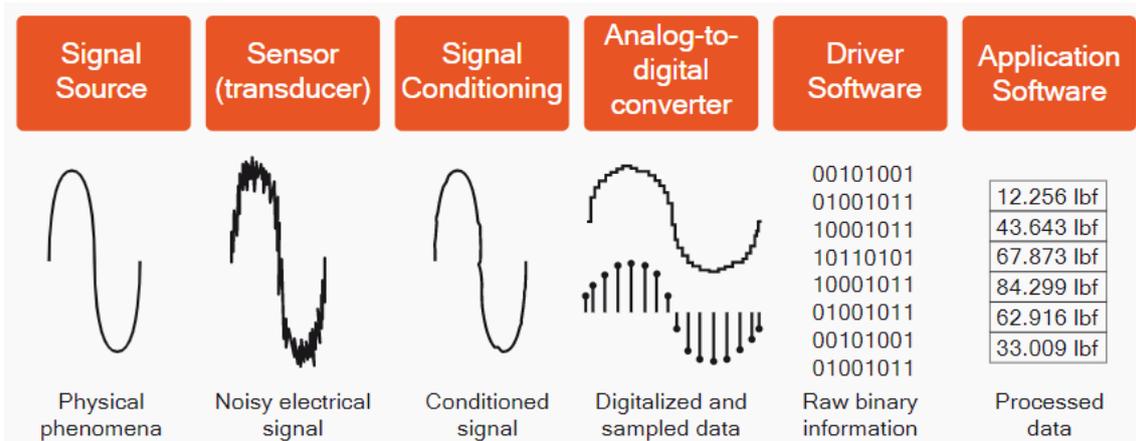


Figura 69 Esquema de funcionamiento de un sistema de adquisición de datos. Dewesoft X Software.

En primer lugar, un sensor mide un fenómeno físico convirtiéndolo en una señal eléctrica. Tras esto, el circuito de acondicionamiento se encarga de modelar (amplificar, atenuar, filtrar o aislar) dicha señal para que sea apropiada para la entrada del dispositivo DAQ.

El último paso consiste en la conversión de la señal de entrada desde analógica a digital (figura 70), de lo cual se encarga el convertidor analógico-digital (ADC); esto se hace a través de un muestreo de la señal analógica. Las señales digitales tienen solo dos niveles o estados: un estado “on” en el cual la señal se encuentra en su nivel más alto y un estado “off” en el que está en su nivel más bajo.

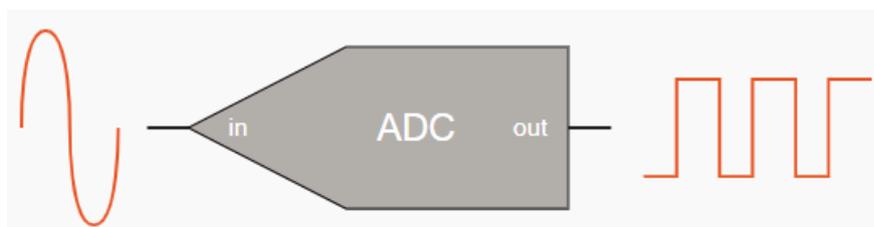


Figura 70 Esquema de funcionamiento de un ADC. Dewesoft X Software.

Un ADC tiene un rango operativo que indica los valores máximo y mínimo dentro de los cuales debe encontrarse la señal de entrada para poder ser digitalizada. Otro de sus parámetros importantes es la resolución, la cual viene dada por el número de bits que se utilizan para digitalizar la señal analógica.

Una vez que la señal analógica está muestreada obteniéndose una forma de onda escalonada, se cuantifican con bits los valores muestreados mediante la asignación de niveles. El número de niveles en que se puede dividir el rango operativo para aproximar la señal de entrada viene dado por 2^n , siendo n el número de bits; por ejemplo, un conversor de 8 bits tendrá 256 niveles distintos, mientras que uno de 16, 65536. Por tanto, cuanto mayor sea el número de bits, mayor será la resolución del DAQ y mayor precisión se tendrá en la conversión de la señal analógica. Lo acabado de explicar se muestra en la siguiente imagen.

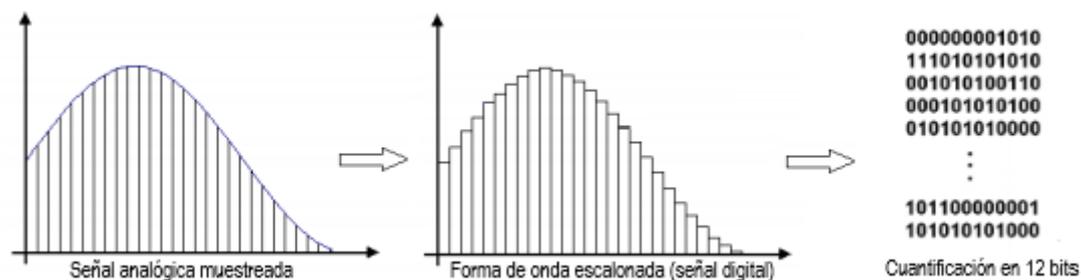


Figura 71 Muestreo y cuantificación de una señal analógica. Apuntes de “Sistemas de adquisición y Procesamiento de datos” de la Universidad de Alicante.

Finalmente, la secuencia en código binario es transferida a un PC donde la señal original es reconstruida.

En los siguientes puntos se explicarán los elementos descritos anteriormente de los que dispone el sistema de adquisición de datos de la instalación con la que se ha trabajado en el presente proyecto.

5.2.1 Sensores

Los fenómenos que se van a medir son la presión, la temperatura y el caudal, por lo que la instalación cuenta con los sensores adecuados para ello: transductor de presión, termopar y caudalímetro respectivamente.

5.2.1.1 Presión

Para medir la presión del fluido se emplean transductores de presión. Estos convierten la presión en una señal eléctrica analógica para su posterior procesamiento en un ordenador. Su principio de funcionamiento se basa en la deformación física de las galgas extensiométricas adheridas al diafragma del transductor y normalmente dispuestas en una configuración de puente de Wheatstone. La presión aplicada al sensor produce una deflexión del diafragma, la cual deforma las galgas. Dicha deformación provoca un cambio en su resistencia eléctrica que es proporcional a la presión.

Se han empleado dos tipos de transductores de presión: estacionarios y no estacionarios. La diferencia entre ambos es que, teniendo en cuenta la frecuencia y el tiempo de muestreo, mientras un sensor estacionario da como resultado de la medición el valor medio de las muestras tomadas, cuyo número viene determinado por los dos parámetros mencionados, el resultado presentado por el transductor no estacionario es la totalidad de las medidas de presión junto con el tiempo al que se ha tomado cada una en referencia al tiempo de muestreo.

El banco de ensayos cuenta con tres transductores de presión estacionarios y uno no estacionario ubicados en diferentes partes. Cada uno de ellos es detallado a continuación, comenzando por los transductores estacionarios.

- **Transductor de presión estática estacionario aguas arriba de la placa de orificio.**

Este primer transductor, que puede observarse en la figura 72, se encuentra a una distancia superior a 2 DN del conjunto de placa de orificio, tal y como se vio en la tabla 2 (5.1.1 Sección de pruebas.), concretamente a 113,3 mm.



Figura 72 Transductor de presión estática estacionario aguas arriba de la placa de orificio.

La siguiente tabla recoge las principales características de este sensor proporcionadas por el fabricante.

Fabricante	Omega Engineering Spectris Company
Modelo	PXM219-004G10V
Diámetro nominal rosca	G ¼ macho
Rango de presión relativa medida	0 – 4 bar (1 – 5 bar en valores absolutos)
Señal de salida	0 – 10 V
Tensión de alimentación	24 Vdc
Temperatura de funcionamiento	-40 a 85°C
Frecuencia de muestreo	1000 Hz
Error sistemático	0,25 %

Tabla 5 Principales características del transductor de presión estática estacionario aguas arriba.

De la tabla anterior es posible deducir la relación existente entre la presión absoluta y el voltaje (señal de salida) gracias a la relación de proporcionalidad existente, tal y como se mencionó al comienzo de este subapartado. De este modo, cuando el voltaje es de 0 V, la presión absoluta que se tiene es de 1 bar, mientras que cuando la tensión de salida alcanza un valor de 10 V, la presión medida es 5 bar. La ecuación que sigue la curva de calibración, y que verifica la relación acabada de comentar entre la presión absoluta y la tensión de salida, es la siguiente:

$$P = 100 + 40 V \text{ (kPa)} \quad (\text{ec. 54})$$

- **Transductor de presión estática estacionario aguas abajo de la placa de orificio.**
A una distancia de 340 mm aguas abajo de la placa de orificio se encuentra el segundo transductor de presión estática (figura 73).



Figura 73 Transductor de presión estática estacionario aguas abajo de la placa de orificio con rango de presión 0 – 6 bar.

En la tabla dispuesta a continuación se recogen las especificaciones de este transductor de presión.

Fabricante	JUMO Control S.A.
Modelo	401001/000-458-405-521-20-604-61
Díámetro nominal rosca	G ¼ macho
Rango de presión relativa medida	-1 – 5 bar (0 – 6 bar en valores absolutos)
Señal de salida	4 – 20 mA
Tensión de alimentación	10 – 30 Vdc
Temperatura de funcionamiento	-20 a 125°C
Frecuencia de muestreo	1000 Hz
Error sistemático	0,25 %

Tabla 6 Principales características del transductor de presión estática estacionario aguas abajo con rango de presión 0 – 6 bar.

A diferencia del sensor de presión anterior, la salida eléctrica de este es una señal de intensidad. De manera que, de la tabla se deduce que cuando se miden 4 mA a la salida significa que la presión es de 0 bar, mientras que cuando se miden 20 mA, la presión es de 6 bar.

La relación entre la presión absoluta y la intensidad de salida es expresada a través de la ecuación 55, la cual constituye, por tanto, la curva de calibración asociada a este transductor de presión.

$$P = -150 + 37500 I \text{ (kPa)} \quad (\text{ec. 55})$$

No obstante, como también se indicará posteriormente, en uno de los experimentos realizados con la placa de orificio de 25 mm de diámetro, a causa de las vibraciones generadas por el fenómeno de cavitación, el diafragma de este sensor de presión se dañó, dejándolo inservible y siendo necesario su sustitución para poder continuar con la investigación. El nuevo transductor de presión (figura 74) es igual que el anterior, pero con un mayor rango de presión medible para evitar que el incidente se repitiera. Además, también se instaló una prolongación de acero en el medio de la conexión entre la tubería y el sensor. La función de esta es dar protección al transductor frente a las ondas de choque provocadas por la implosión de las burbujas de cavitación, las cuales desembocan en vibraciones.

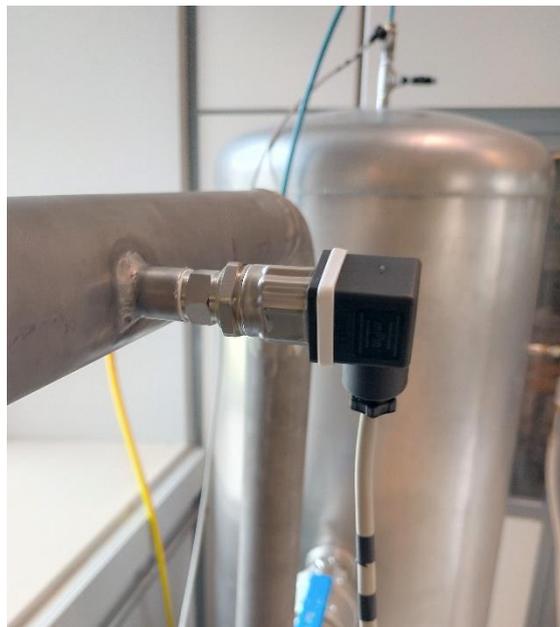


Figura 74 Nuevo transductor de presión estática estacionario aguas abajo de la placa de orificio con rango de presión 0 – 10 bar.

La siguiente tabla resume sus principales características.

Fabricante	JUMO Control S.A.
Modelo	401010/000 TN 00523648
Díámetro nominal rosca	G ¼ macho
Rango de presión relativa medida	-1 – 9 bar (0 – 10 bar en valores absolutos)
Señal de salida	4 – 20 mA

Tensión de alimentación	8 – 30 Vdc
Temperatura de funcionamiento	-20 a 125°C
Frecuencia de muestreo	1000 Hz
Error sistemático	0,25 %

Tabla 7 Principales características del transductor de presión estática estacionario aguas abajo con rango de presión 0 – 10 bar.

Además, como el rango de presión medida es diferente al del anterior transductor, la curva de calibración también varía. Esta puede verse en la gráfica adjunta a continuación, en la cual también se representa la curva proporcionada por el fabricante para verificar su concordancia. Dicha comparación se ha efectuado porque se trata de un sensor nuevo por lo que es necesario comprobar que los datos proporcionados por el fabricante se asemejan a los que se van a obtener experimentalmente, además de que es necesario conocer la ecuación de la curva de calibración para su incorporación al programa informático que permitirá la visualización de los datos medidos (apartado 5.2.3 *Elemento computacional*). Se considera necesario aclarar que la curva de calibración experimental únicamente llega a 400 kPa dado que ese es el límite en valor absoluto del calibrador manométrico empleado. No obstante, a pesar de esto, es posible observar la concordancia existente entre ambas curvas, lo que garantiza el correcto funcionamiento del transductor de presión.

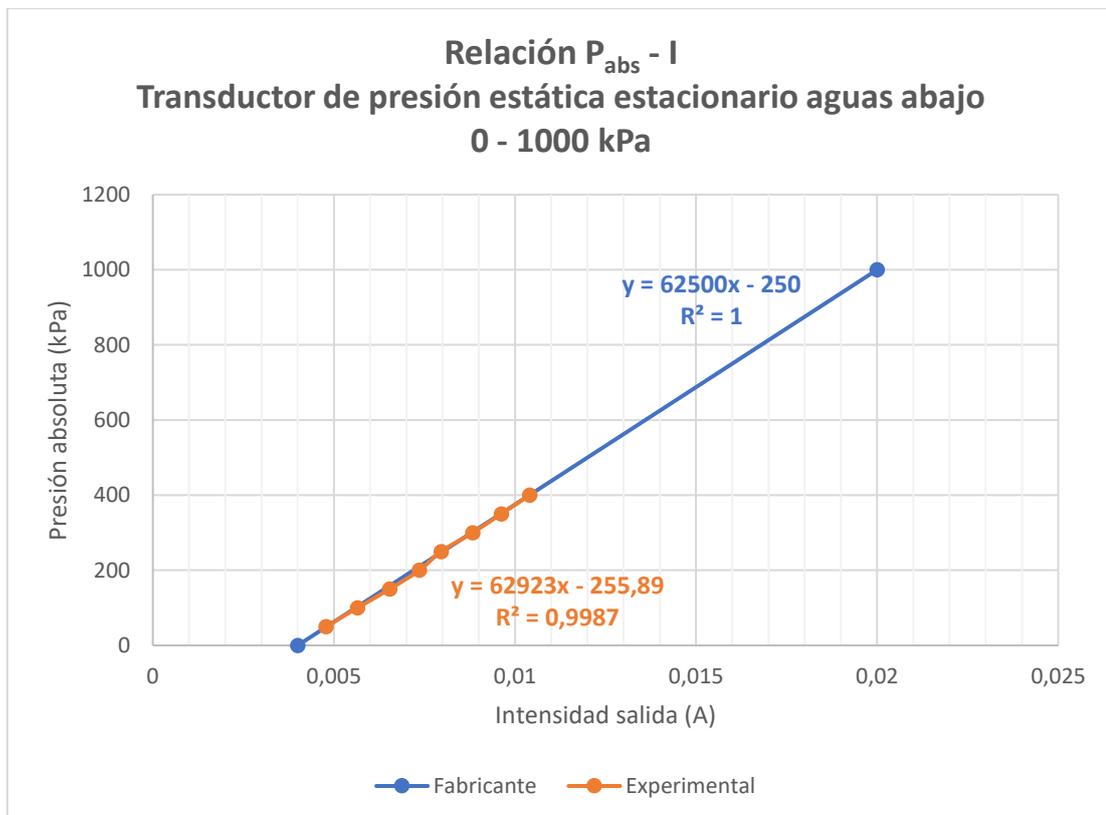


Figura 75 Curvas de calibración proporcionada por el fabricante y experimental del transductor de presión estática estacionario aguas abajo con rango 0 – 10 bar.

La ecuación que sigue la curva de calibración es la que figura en la propia representación y que se va a demostrar a continuación. Para ello, se parte de la ecuación de una recta:

$$P = a + b I \quad (\text{ec. 56})$$

Donde:

- o b es la pendiente, la cual viene dada por:

$$b = \frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{P_2 - P_1}{I_2 - I_1} = \frac{(1000 - 0) \text{ kPa}}{(0,02 - 0,004) \text{ A}} \rightarrow b = 62500 \frac{\text{kPa}}{\text{A}}$$

- o a es la ordenada en el origen. Su valor es el siguiente:

$$0 = a + 62500 \left(\frac{\text{kPa}}{\text{A}} \right) 0,004 \text{ (A)} \rightarrow a = -250 \text{ kPa}$$

Sustituyendo en la expresión anterior se verifica la ecuación de la curva de calibración.

$$P = -250 + 62500 I \text{ (kPa)} \quad (\text{ec. 57})$$

Cabe mencionar que, para la presente investigación, en el caso de los dos sensores anteriores, y en el que se explicará a continuación, no se ha hecho la comparación entre la curva experimental y la proporcionada por el fabricante dado que ya se había llevado a cabo en estudios anteriores, obteniéndose unos resultados satisfactorios.

- **Transductor de presión estática estacionario en el depósito de 700L.**

Este transductor de presión, que se sitúa en la parte superior del depósito grande, se encarga de medir la presión de vacío en el depósito. En la figura 76 puede verse el sensor de presión aquí tratado.



Figura 76 Transductor de presión estática estacionario en el depósito de 700 L.

Las características de este sensor se detallan a continuación.

Fabricante	Omega Engineering Spectris Company
Modelo	PXM219-VAC000G10V
Diámetro nominal rosca	G ¼ macho
Rango de presión absoluta medida	0 – 1 bar
Señal de salida	0 – 10 V
Tensión de alimentación	24 Vdc
Temperatura de funcionamiento	-40 a 85°C
Frecuencia de muestreo	1000 Hz
Error sistemático	0,25 %

Tabla 8 Principales características del transductor de presión estática estacionario del depósito grande.

La ecuación 58 se corresponde con la ecuación de la curva de calibración asociada al presente transductor de presión.

$$P = 10 V \text{ (kPa)} \text{ (ec. 58)}$$

Una vez explicados los tres transductores de presión estacionarios, se procede a hacer lo mismo con el transductor no estacionario (figura 77). Este, que está situado aguas abajo de la placa de orificio, en concreto a una distancia de 56,7 mm de acuerdo con la figura 51, cuenta con un amplificador externo, el cual puede verse también en la siguiente imagen.

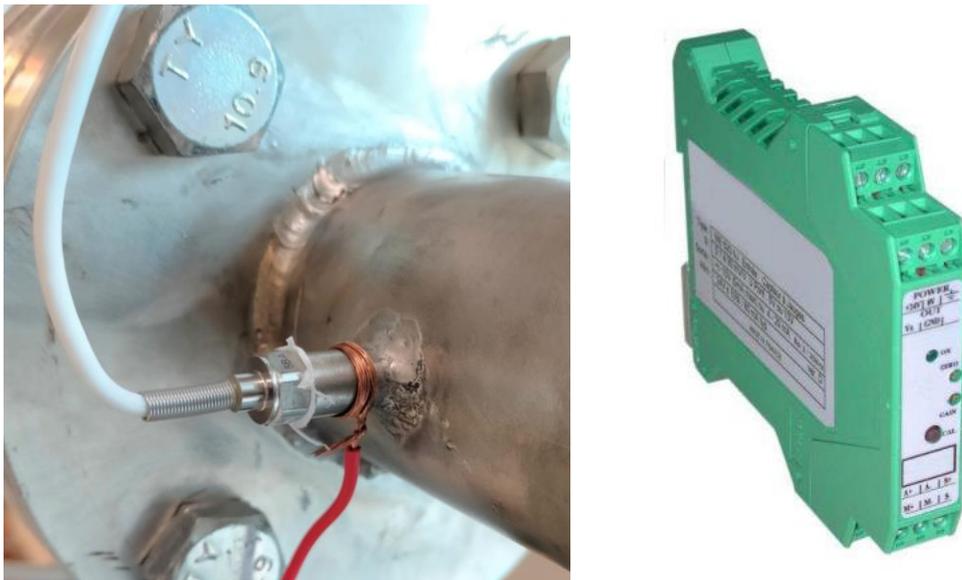


Figura 77 Transductor de presión no estacionario y amplificador externo.

Las tablas 9 y 10 resumen las principales características del sensor y del amplificador respectivamente.

Fabricante	Measurement Specialties (MEAS)
Modelo	XP5-M-5BA-/L3M
Material	Titanio
Diámetro nominal rosca	M5x0,8 macho
Rango de presión absoluta medida	0 – 5 bar
Señal de salida	10 mV/V
Tensión de alimentación	10 Vdc
Temperatura de funcionamiento	-40 – 120°C
Frecuencia de resonancia	130 kHz
Error sistemático	0,25 %

Tabla 9 Principales características del transductor de presión estática no estacionario.

Fabricante	Measurement Specialties (MEAS)
Modelo	ARD154-18-36VCC
Señal de salida	± 10 V o 4 – 20 mA
Tensión de alimentación	24 Vdc (18 – 36 Vdc)
Temperatura de funcionamiento	-10 – 60°C

Tabla 10 Principales características del amplificador conectado al transductor de presión no estacionario.

De la tabla anterior se deduce que la señal de salida del amplificador puede ser en voltaje o en intensidad. Dado que la señal de salida del transductor de presión es en voltaje, el amplificador se ha configurado de esta misma forma.

En lo que se refiere a la calibración de este transductor de presión, se ha empleado un calibrador manométrico para la obtención, a través de la representación de los datos obtenidos en dos series de calibración, de la pendiente de la curva de calibración, cuyo valor es de 50,904 kPa/V. Además de la pendiente, como se ha visto, la ecuación de toda curva de calibración consta también de una ordenada en el origen, la cual se deduce de la tabla 10 que debe ser 0. Su ajuste se hace a través del trimmer ZERO ubicado en el amplificador y se considera que es el adecuado cuando el valor de presión medido por este transductor y por el transductor situado aguas arriba es el mismo bajo la ausencia de circulación de fluido a través de la sección de ensayos. Por tanto, la curva de calibración del transductor de presión no estacionario sigue la siguiente ecuación:

$$P = 50,904 V (kPa) \quad (ec.59)$$

Cabe mencionar que, como se ha podido ver en las tablas de especificaciones de cada uno de los transductores de presión, todos tienen un índice de precisión inferior al

especificado por la norma que, como ya se mencionó en el apartado correspondiente, es del 2 %. En consecuencia, se cumple con tal requisito.

5.2.1.2 Temperatura

Los termopares son los sensores empleados para medir la temperatura. Un termopar se compone de dos metales diferentes unidos en un extremo y su principio de funcionamiento se basa en el efecto Seebeck. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría, se produce una diferencia de tensión que es proporcional a la diferencia de temperatura entre el punto de unión (punto caliente) y otro de referencia (punto frío). Esto se resume en la siguiente figura.

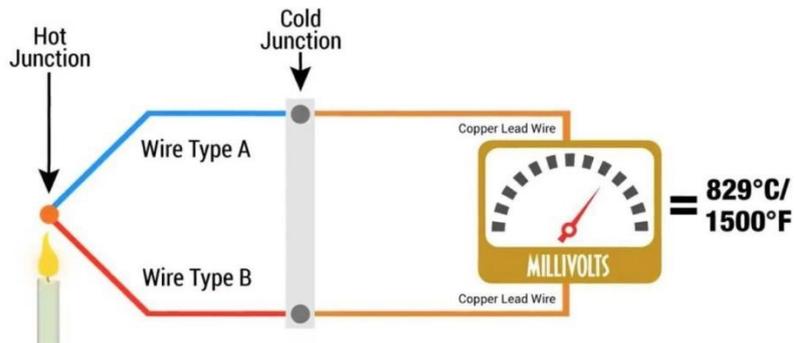


Figura 78 Principio de funcionamiento de un termopar. Omega Engineering Spectris Company.

El banco de ensayos hidráulicos empleado cuenta con dos termopares: uno para medir la temperatura del fluido de trabajo y otro para medir la temperatura ambiente. Ambos son termopares tipo K por lo que uno de los metales es una aleación de níquel-cromo y otro de níquel-aluminio, y sus características principales se resumen en la siguiente tabla.

Fabricante	Omega Engineering Spectris Company
Modelo	TC-K-NPT-U-72
Material	Acero inoxidable 304SS con muelle de refuerzo
Diámetro nominal rosca	¼ NPT
Máxima temperatura medible	480°C
Presión máxima de funcionamiento	170 bar
Frecuencia de muestreo	14 Hz
Error sistemático	0,75 % a partir de 0°C

Tabla 11 Principales características de los termopares.

Además, el cable de extensión de los termopares es de galga 20 AWG de aislamiento de fibra de vidrio con una camisa de acero inoxidable con la terminación en cables pelados.

La temperatura promedio del fluido en los ensayos realizados es de 22°C lo que implica, teniendo en cuenta que el error sistemático de los termopares es de 0,75 % a partir de 0°C,

un error de $\pm 0,165^{\circ}\text{C}$, inferior al requisito especificado por la norma ($\pm 1^{\circ}\text{C}$). Por tanto, se cumple con la norma IEC-EN 60534-2-3:2016 [23].

Uno de los termopares está soldado en la parte inferior derecha del depósito de 50L (figura 79) por lo que es el que mide la temperatura del agua, y el otro se encuentra anclado a la estructura metálica de tal depósito (figura 79), siendo este el que mide la temperatura ambiente.

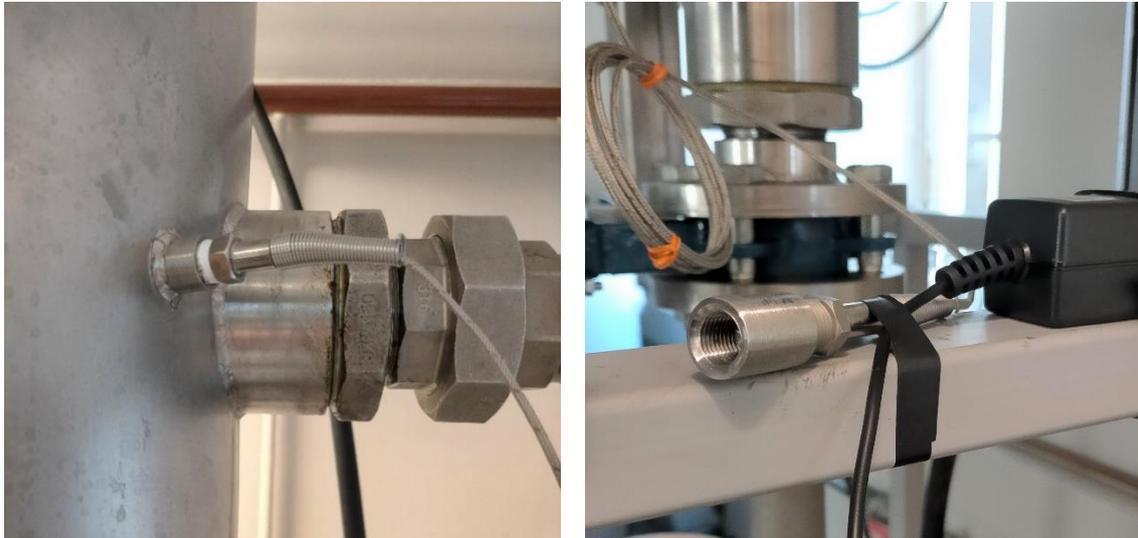


Figura 79 Termopar soldado al depósito pequeño y termopar anclado a la estructura metálica.

5.2.1.3 Caudal

Para la medición del caudal se emplea un caudalímetro electromagnético. Su principio de funcionamiento, como se explicó en el apartado 4.2, se basa en la ley de Faraday, la cual establece que cuando un conductor atraviesa un campo electromagnético, se genera un voltaje que es proporcional a la velocidad del conductor. Para ello, se aplica una corriente a las bobinas del caudalímetro con el objeto de generar un campo magnético, de manera que, cuando el fluido, que actúa como conductor, fluye a través del dispositivo se induce un voltaje proporcional a la velocidad del flujo. Este voltaje se detecta mediante dos electrodos ubicados en las paredes del caudalímetro y posteriormente se envía a un transmisor que calcula el caudal volumétrico en función de las dimensiones de la tubería.

En la instalación, el caudalímetro (figura 80) se encuentra situado entre la bomba centrífuga y la válvula de estrangulamiento aguas arriba de la sección de pruebas.



Figura 80 Caudalímetro electromagnético.

En la siguiente tabla se recogen las principales características del caudalímetro electromagnético de la instalación.

Fabricante	COMAC CAL S.R.O.
Modelo	FLOW 33
Diámetro nominal, <i>DN</i>	40
Presión nominal, <i>PN</i>	25
Rango caudal medido	0,9 – 54 m ³ /h
Señal de salida	4 – 20 mA
Tensión de alimentación	24 Vdc
Temperatura máxima de funcionamiento	80°C
Frecuencia de muestreo	900 Hz
Error sistemático	0,5 %

Tabla 12 Principales características del caudalímetro electromagnético.

Como puede verse en la tabla, el error sistemático del caudalímetro es del 0,5 %, valor inferior al especificado en la norma, el cual, si se recuerda del comienzo del apartado 5, es del 2 %, de manera que se cumple con tal requisito.

De igual modo que se hizo para los transductores de presión, se indica la ecuación que expresa la relación existente entre el caudal medido y la señal de salida asociada al caudalímetro.

$$Q = -12,375 + 3318,75 I \left(\frac{m^3}{h} \right) \quad (ec. 60)$$

5.2.2 Dispositivo de adquisición de datos

Como se comentó con anterioridad, el dispositivo de adquisición de datos es el que digitaliza las señales analógicas entrantes con el objeto de que puedan ser procesadas por un PC.

En la instalación tal función la desempeña el dispositivo de adquisición CompactDAQ de National Instruments que puede verse en la siguiente imagen.

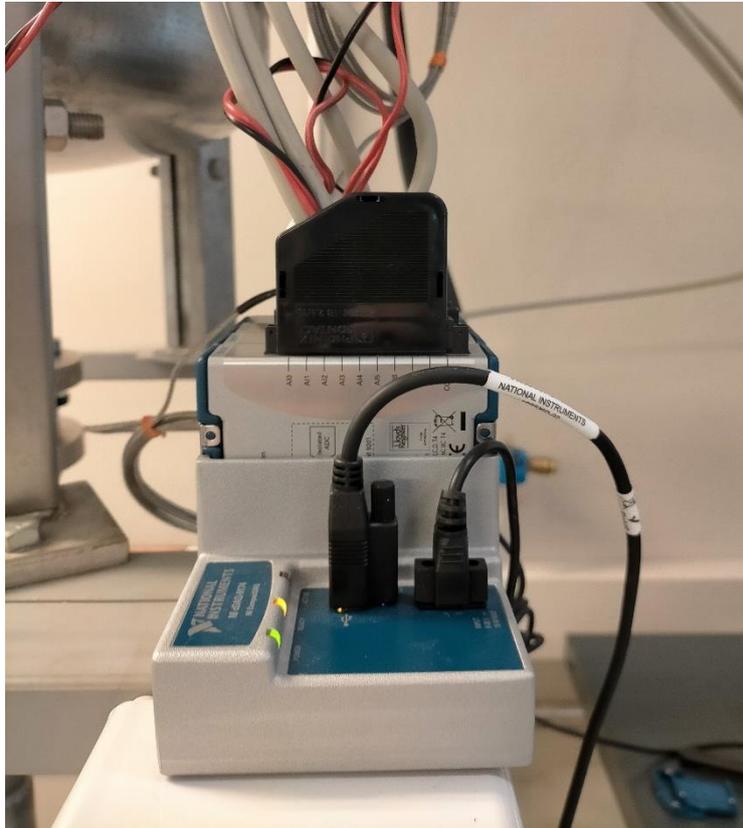


Figura 81 Dispositivo de adquisición de datos.

En este sistema es posible distinguir dos partes:

- Por un lado, se tiene el chasis NI cDAQ-9174 (figura 82). Este es el elemento que se conecta al PC, lo cual se hace a través de un puerto USB, por lo que es el encargado de transmitirle las señales captadas por los sensores.



Figura 82 Chasis NI cDAQ-9174. National Instruments.

En la figura adjunta a continuación pueden verse los principales elementos con los que cuenta este chasis.

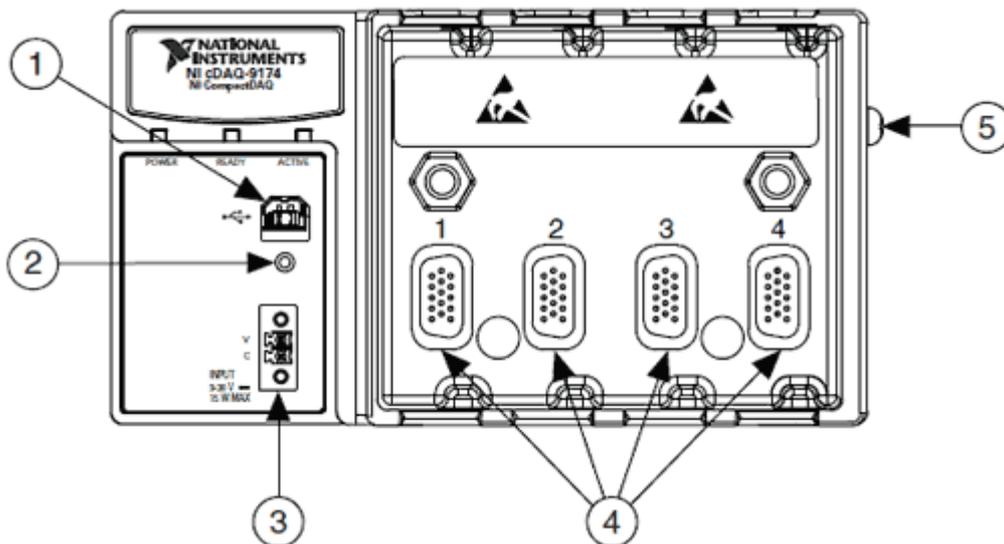


Figura 83 Elementos del chasis NI cDAQ-9174. National Instruments.

1. Conector USB.
2. Cable USB para liberación de tensión.
3. Conector de potencia de 9 - 30 Vdc.
4. Ranuras del módulo.

El chasis cuenta con cuatro ranuras en las que se introducen diferentes módulos E/S en función de lo que se quiera medir. Estos son los encargados de efectuar la conversión analógico-digital.

5. Tornillo conectado a tierra.

- Por otro lado, se tienen cuatro módulos que se insertan en las ranuras comentadas anteriormente (elemento 4 de la figura anterior). Dichos módulos pueden verse en la siguiente figura y las características de cada uno se reflejan en la tabla 13.



Figura 84 Vista de los cuatro módulos insertados en las ranuras del chasis NI cDAQ-9174.

Módulo	Nº canales	Rango de entrada	Frecuencia de muestreo	Bits de resolución
NI 9201	8 simples	± 10 V	500 kHz	12
NI 9215	4 diferenciales	± 10 V	100 kHz	16
NI 9203	8 simples	± 20 mA	200 kHz	16
NI 9211	4 simples para termopares	± 80 mV	14 Hz	24

Tabla 13 Características de los módulos insertados en el chasis de adquisición de datos.

Como puede deducirse de la tabla, el módulo NI 9211 es un módulo de entrada de temperatura para termopares tipo J, K, T, E, N, B, R, y S. Por otra parte, debido a que la señal de entrada del NI 9203 es en intensidad, a él están conectados el caudalímetro y el transductor de presión estacionario aguas abajo, mientras que al módulo NI 9201 están conectados el transductor de presión aguas arriba y el situado en la parte superior del depósito de 700L. En lo que se refiere al módulo NI 9215, este se emplea para adquirir datos a alta frecuencia de forma simultánea a diferencia de los anteriores que no son simultáneos, por lo que a él se conecta el transductor de presión no estacionario.

Cabe mencionar que todos los aparatos que conforman el sistema de adquisición de datos están alimentados a través de la fuente de alimentación de la figura 85. Dicha fuente convierte la corriente alterna en corriente continua para proporcionarle el voltaje e intensidad a tales elementos.



Figura 85 Fuente de alimentación.

5.2.3 Elemento computacional

El elemento computacional o PC es el que permite la visualización, tratamiento y almacenamiento de los datos que recibe del sistema de adquisición de datos gracias al software y el entorno de programación con los que cuenta.

Como se ha comentado, se ha utilizado un dispositivo de adquisición de datos de National Instruments, por lo que el software que se emplea es el facilitado por este. Dicho software, conocido como NI-DAQmx, incorpora una arquitectura de controlador y una API con funciones y herramientas de desarrollo para controlar y configurar los dispositivos DAQ. Asimismo, también permite configurar pruebas en tiempo real, registrar pruebas, etc.

En lo que se refiere al entorno de programación, National Instruments cuenta con su propio lenguaje y entorno de programación: LabVIEW, acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. A pesar de esto, el lenguaje de programación empleado ha sido MATLAB R2015b, en el cual se ha implementado un algoritmo que permite la obtención de los datos deseados. Además, para tener un seguimiento sencillo de las mediciones de los sensores en tiempo real se dispone de una interfaz gráfica de usuario (GUI).

Tanto el algoritmo de MATLAB como la GUI se han adaptado en cada momento a las condiciones y elementos de la instalación, y gracias a ambos se pueden guardar únicamente los valores medidos que se quieran. Los datos que permite visualizar la GUI son la temperatura ambiente y del fluido, las condiciones de presión y velocidad aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificio, la caída de presión a través de la misma, la presión en el depósito grande y el caudal, además de poder verse también, tras la última modificación en el algoritmo debido a la instalación del transductor de presión no estacionario, las fluctuaciones de presión estática aguas abajo de la placa de orificio en el momento en que se efectúa la medición y durante el tiempo especificado por el tiempo de muestreo.

En los anexos B y C se incluyen respectivamente el programa informático de MATLAB y la interfaz gráfica de usuario, esta última con su apariencia antes y después de la introducción del sensor no estacionario.

5.2.4 Muestreo de señales

Para obtener datos digitales a partir de señales analógicas, la señal debe ser muestreada, es decir, se toma el valor instantáneo de la señal en un momento determinado.

Para recopilar información útil, un parámetro crítico es la frecuencia de muestreo, f_m . Esta se define como el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta durante el proceso de conversión analógico-digital.

La elección acerca de qué frecuencia de muestreo se debe utilizar es fundamental puesto que de ella dependerá la fiabilidad conseguida tras la conversión analógico-digital, es decir, determina cuan parecida es la señal analógica y la señal digital. El teorema que define la mínima frecuencia requerida para representar de una manera precisa una señal analógica es el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. Según este, para no perder información se debe muestrear al menos a una frecuencia igual al doble de la frecuencia máxima de la señal analógica, $f_{m\acute{a}x}$.

$$f_m \geq 2 f_{m\acute{a}x}$$

No obstante, a veces muestrear al doble no es suficiente, por lo que es habitual efectuar el muestreo a una frecuencia varias veces superior a la mínima señalada. En caso de emplear una frecuencia menor que la señalada por Nyquist aparece el fenómeno de aliasing, el cual da lugar a una representación inadecuada de la señal analógica (figura 86).

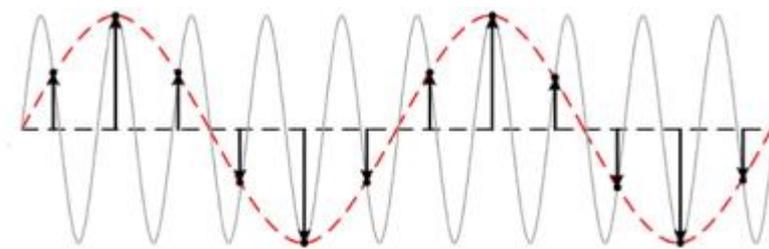


Figura 86 Fenómeno de aliasing. Adquisición de datos de Mónica B. Agüero.

En definitiva, en el momento de efectuar la conversión analógico-digital en el dispositivo de adquisición de datos, las muestras que se toman de la señal analógica deben ser como mínimo al doble de su frecuencia máxima. De este modo, los sensores y el propio sistema de adquisición de datos están relacionados a través de las frecuencias. En el apartado 5.2.1 se expusieron las frecuencias de muestreo de los distintos sensores empleados en la instalación. Las correspondientes a los sensores estacionarios se resumen en la tabla adjunta a continuación.

Sensor	Frecuencia de muestreo (Hz)
Transductor de presión estática estacionario aguas arriba	1000
Transductor de presión estática estacionario aguas abajo	1000
Transductor de presión estática estacionario en el depósito de 700L	1000
Termopares tipo K	14
Caudalímetro	900

Tabla 14 Frecuencias de muestreo de los sensores estacionarios.

Debido a que es preciso trabajar a una misma frecuencia de muestreo, la cual se especifica en la interfaz gráfica de usuario, la elección de esta debe basarse en la frecuencia

máxima más grande de los sensores. Esta última frecuencia, como es posible ver en la tabla anterior, se corresponde con la de los transductores de presión cuyo valor es en todos de 1000 Hz.

Por tanto, teniendo en cuenta lo anterior, el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon y que el tiempo de muestreo se considera de 1 segundo, para reconstruir, tras la conversión, la señal de entrada sin perder información es necesario muestrear a una frecuencia de 2000 Hz, es decir, se van a tomar 2000 muestras en un segundo.

Esa es la frecuencia de muestreo para los sensores estacionarios, sin embargo, en un momento de la investigación se tiene también un transductor de presión no estacionario cuya frecuencia de muestreo será distinta. Para su elección debe tenerse en cuenta la frecuencia de resonancia del sensor. Esta se define como la frecuencia característica a la cual el sensor alcanza el grado máximo de oscilación, es decir, vibra incrementando de forma progresiva la amplitud del fenómeno que está midiendo y, en consecuencia, perturbándolo. Por tanto, es imprescindible muestrear a una frecuencia menor que la frecuencia de resonancia; concretamente lo ideal es hacerlo a una frecuencia no mayor que el 20% de la de resonancia.

En la tabla 9 se señaló que la frecuencia de resonancia del transductor no estacionario es de 130 kHz. De este modo, teniendo en cuenta lo comentado en el párrafo anterior, la frecuencia de muestreo empleada es de 20 kHz, es decir, se tomarán 20000 muestras por segundo durante un segundo, siendo este el tiempo de muestreo.

Además, también se ha tenido en cuenta que es preciso muestrear a una frecuencia mayor que la característica del fenómeno que se pretende medir. Dado que en este caso dicho fenómeno es el de la cavitación, cuya frecuencia característica se estima inferior a 1 kHz, ambos valores seleccionados de la frecuencia de muestreo son válidos.

6 METODOLOGÍA

En el presente proyecto de investigación, los ensayos realizados con cada una de las dos placas de orificio se han llevado a cabo con los siguientes fines: la caracterización de ambas placas de orificio, el estudio de la dinámica del flujo a través de una placa de orificio y la propuesta de una ecuación que permita predecir la condición de flujo bloqueado en función de la geometría de este dispositivo.

Los siguientes subapartados recogen la explicación del procedimiento que se ha seguido para la consecución de los resultados finales.

6.1 Caracterización de las placas de orificio

Como bien se acaba de indicar, uno de los objetivos de los experimentos ejecutados es la caracterización de las placas de orificio instaladas en la sección de pruebas. Las condiciones en las que se han llevado a cabo los ensayos junto con el procedimiento seguido en ellos y el posterior tratamiento de los datos son detallados a continuación.

6.1.1 Condiciones de ensayo

Previamente a la ejecución del experimento es necesario definir una serie de condiciones que lo van a caracterizar. Estas, que son las mismas independientemente de la placa de orificio que se utilice, se citan a continuación:

- a) Presión aguas arriba constante en cada ensayo. El valor de esta presión variará en el rango entre 200 kPa y 400 kPa, con un incremento de 50 kPa.
Para la selección de este rango de presiones se ha tenido en cuenta lo siguiente:
 - Por un lado, los límites de funcionamiento de los elementos de la instalación, tales como la bomba centrífuga o los transductores de presión.
 - Por otro lado, disponer de un número suficiente de curvas para proporcionar certeza en las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados, así como poder efectuar una comparación adecuada con la literatura existente.

Sin embargo, para el caso de la placa de orificio con $\beta = 0,3$ la máxima presión aguas arriba con la que se ha trabajado es de 300 kPa puesto que para el objetivo final de los experimentos se ha considerado suficiente ante la buena repetibilidad obtenida. Además, se temía que las vibraciones generadas al incrementar el valor de la presión dañasen el transductor de presión aguas abajo como ocurrió en los experimentos realizados con la otra placa de orificio.

- b) Se deben tomar un número de medidas en cada ensayo tal que aseguren una correcta representación de las curvas.
- c) Cada ensayo finaliza en el momento en el que se alcanza la condición de flujo totalmente bloqueado, es decir, cuando a pesar de incrementarse el salto de presión, el caudal permanece constante.

- d) La temperatura del fluido de trabajo varía entre 20°C y 24°C. No obstante, la variación máxima que la temperatura del agua ha experimentado en un ensayo ha sido de $\pm 0,64^\circ\text{C}$, inferior al máximo que permite la norma, que si se recuerda del apartado 5 es de $\pm 3^\circ\text{C}$. Por tanto, se demuestra de esta forma la validez de los ensayos efectuados.
Cabe mencionar que no se ha efectuado un control exhaustivo de la temperatura porque se ha observado buena repetibilidad en los ensayos realizados por lo que no se ha considerado necesario poner en funcionamiento el termostato.
- e) Se deben realizar dos o tres ensayos para cada valor de presión aguas arriba de manera que se asegure la veracidad y precisión en los resultados obtenidos.

6.1.2 Obtención de los datos

Con las condiciones de ensayo ya establecidas, es posible proceder a su ejecución para la obtención de los datos, siendo necesario seguir una serie de pasos. En ellos cabe diferenciar entre los que hay que realizar antes de comenzar el ensayo y los que hay que efectuar durante el mismo. Ambos se detallan a continuación.

- Pasos previos al inicio del experimento.
 1. Conectar la bomba de vacío a la red eléctrica ya que necesita de un funcionamiento previo de aproximadamente 30 minutos antes del comienzo del ensayo. Es necesario verificar que la válvula del manguito de purga está cerrada.
 2. Encender la fuente de alimentación del sistema de adquisición de datos, encender el ordenador y ejecutar el programa de MATLAB para mostrar en pantalla a través de la GUI las mediciones realizadas y poder controlar el sistema.
 3. Realizar las siguientes comprobaciones:
 - Válvula de estrangulamiento aguas arriba (válvula de impulsión) cerrada.
 - Válvula de estrangulamiento aguas abajo cerrada.
 - Comprobar que el nivel de agua en el depósito de 700 L esté a la altura del ojo de buey.
 4. Arrancar la bomba centrífuga. Esto se lleva a cabo con la válvula de aspiración abierta y la de impulsión cerrada. Se acciona el interruptor del sistema de seguridad (giro en sentido horario), se aumenta el régimen de giro de la bomba con el variador de frecuencia hasta un 20% aproximadamente y se abre lentamente la válvula de impulsión.
 5. Abrir completamente la válvula de estrangulamiento aguas abajo. De este modo se permite la circulación del fluido por la instalación.
 6. Purgar el depósito de 50 L para garantizar que no haya aire en su parte superior.
 7. Cerrar la válvula de estrangulamiento aguas abajo. Hechos estos pasos y transcurridos los 30 minutos necesarios del paso 1, la instalación ya está preparada para trabajar con ella.
- Pasos a seguir durante la ejecución, propiamente dicha, del experimento.

1. Definir la presión aguas arriba en el rango 200 – 400 kPa a la que se va a efectuar el ensayo.
2. Pulsar el botón “START” de la GUI para comenzar a visualizar los datos que se miden.
3. Regular el caudal volumétrico desde un valor pequeño hasta que se alcanza la condición de flujo bloqueado. Esto se consigue gracias al control sobre la caída de presión a través de la placa de orificio. Para ello, teniendo en cuenta que la presión aguas arriba se mantiene en un valor constante, la única que se puede variar es la presión aguas abajo, lo cual se hace de dos formas:
 - A través de la válvula de estrangulamiento aguas abajo.
A medida que se incrementa su grado de apertura, permite el paso de más caudal por lo que el valor de la presión aguas abajo disminuye y, en consecuencia, el de la caída de presión aumenta.
 - A través de la bomba de vacío.
En el momento en el que mediante la válvula de estrangulamiento aguas abajo no es posible incrementar el salto de presión porque está completamente abierta, es necesario originar el vacío en el depósito grande y, por tanto, también aguas abajo de la placa de orificio. Esto permite lograr alcanzar la condición de flujo bloqueado.
4. Una vez se tenga el caudal deseado es necesario regular la presión aguas arriba para que su valor sea igual al definido en el paso 1. Esto se consigue gracias al variador de frecuencia.
5. Hechos los pasos anteriores, se procede a guardar los datos medidos bajo las condiciones establecidas. Para ello, se clic en el botón “WRITE DATA” de la GUI, instante en el que tales datos son importados a un fichero de texto, no interrumpiéndose, por tanto, el proceso experimental.
6. Se repiten los tres pasos anteriores hasta que se alcanza la condición de flujo bloqueado, lo cual se sabe gracias a la gráfica $Q - \sqrt{\Delta P}$ que se va construyendo a medida que los datos son guardados. De la misma forma también se genera una gráfica $T - Q$ que permite efectuar un control de la temperatura del fluido durante el ensayo.
7. El ensayo se da por finalizado cuando la curva de la gráfica $Q - \sqrt{\Delta P}$ alcanza un valor asintótico. En este momento se clic en el botón “STOP” de la GUI, se guardan los datos que se han obtenido y se reinicia el programa de MATLAB para comenzar un nuevo ensayo.
 - Si no se han realizado dos/tres ensayos con el valor de presión aguas arriba definido en el paso 1, se debe repetir el ensayo acabado de efectuar. En consecuencia, se vuelve al paso 2.
 - En caso contrario al punto anterior, se vuelve al paso 1 incrementando el valor de la presión aguas arriba empleado anteriormente en 50 kPa.

En los anexos D y E, se presentan los datos que se han obtenido en cada uno de los ensayos realizados con las dos placas de orificio para los distintos valores de presión aguas arriba.

6.1.3 Procesamiento de los datos

Obtenidos los datos para cada placa de orificio, se procede a su tratamiento y análisis con el fin de presentar adecuadamente los resultados de los experimentos.

Los resultados que contribuyen a la caracterización de las placas de orificio son las curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ y $Q - P_2/P_1$. En los siguientes puntos se explica el procedimiento seguido para la consecución de cada una de ellas, lo cual se ha realizado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel.

6.1.3.1 Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$

Para la obtención de las curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ únicamente es necesario representar en una gráfica el caudal volumétrico medido frente a la raíz cuadrada de la caída de presión a través de la placa de orificio, la cual ya calcula también directamente el programa de MATLAB. Además, tanto el caudal como la diferencia de presión se toman con las unidades que ya proporciona el programa informático y que son m^3/h y kPa respectivamente.

Primeramente, se representan en una misma gráfica las curvas características correspondientes a los ensayos realizados para cada placa de orificio y valor de presión aguas arriba. Esto se hace para mostrar la buena precisión obtenida en cada uno de los ensayos, lo cual permite demostrar su validez.

Asimismo, se ha trazado en una misma gráfica una curva característica por cada valor de presión aguas arriba para cada placa de orificio con la intención de facilitar la comparación de las mismas y obtener una mejor visualización de su evolución. Para ello, se ha empleado un único ensayo por cada valor de presión aguas arriba.

6.1.3.2 Curvas características $Q - P_2/P_1$

La representación de las curvas características $Q - P_2/P_1$ requiere previamente el cálculo de la relación de presión P_2/P_1 puesto que tal dato no es proporcionado directamente por el programa de MATLAB. No obstante, su cálculo es inmediato puesto que sí que se proporcionan los valores de presión total aguas arriba y aguas abajo, P_1 y P_2 respectivamente, y como ambos se dan en las mismas unidades (kPa), únicamente hay que efectuar el cociente entre ambos valores. Los anexos D y E además de recopilar los datos medidos en los ensayos también incluyen los valores de la relación de presión calculados.

A continuación, para cada placa de orificio se han trazado en una misma gráfica las curvas características para cada valor de presión aguas arriba con el objetivo de obtener el valor de la relación de presión crítica para la cual se produce el bloqueo de la placa de orificio, es decir, el valor para el cual se alcanza el nivel más alto de cavitación, la cavitación por asfixia.

Se considera necesario aclarar que únicamente se emplea un ensayo por cada valor de presión aguas arriba para cada placa de orificio, no habiéndose hecho representaciones de todos los ensayos para cada valor de presión, ya que la finalidad de eso sería comprobar la semejanza y repetibilidad obtenidas, algo que ya se hizo en el subapartado anterior.

6.2 Dinámica del flujo

Tanto la metodología seguida para la obtención de los datos que permiten estudiar la dinámica del flujo a través de una placa de orificio como el posterior procesamiento de los mismos se detallan en el presente apartado.

6.2.1 Condiciones de ensayo

Los ensayos que componen el actual experimento se caracterizan por las siguientes condiciones:

- a) Presión aguas arriba constante en un mismo ensayo, pero variable entre 250 kPa y 400 kPa con un incremento de 50 kPa entre cada ensayo.
Los aspectos que se han tenido en cuenta en la selección del rango de presiones acabado de comentar son los que se citan a continuación:
 - Los límites de funcionamiento de los elementos del banco de ensayos hidráulicos, como se mencionó en el apartado 6.1.1 del experimento anterior.
 - La obtención de resultados para varios valores de presión aguas arriba otorgando, de este modo, seguridad a las conclusiones extraídas.
- b) Se emplea únicamente la placa de orificio con $\beta = 0,3$ para la ejecución del presente experimento. El motivo de esto es que, en el momento de la instalación del transductor de presión no estacionario, dicha placa era la que se encontraba ubicada en la sección de pruebas.
- c) Es preciso tomar un número de medidas en cada ensayo tal que garantice una completa representación de la curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$.
- d) Un ensayo finaliza cuando se alcanza la condición de flujo bloqueado, lo cual se sabe gracias a la visualización en la GUI de la curva característica anterior.
- e) La temperatura del fluido de trabajo varía entre 24°C y 25°C, siendo la variación máxima que ha experimentado en un mismo ensayo igual a $\pm 0,15^\circ\text{C}$, valor inferior al máximo permitido por la norma ($\pm 3^\circ\text{C}$).
De igual modo que en el anterior experimento tampoco se lleva a cabo un control exhaustivo de la temperatura.
- f) Se realiza un único ensayo por cada valor de presión aguas arriba puesto que la fiabilidad de los datos obtenidos con la instalación ya se verifica en el anterior experimento. Sin embargo, para asegurarlo, se ha comprobado que la curva $Q - \sqrt{\Delta P}$ construida concuerda con las obtenidas en el experimento de caracterización para la placa de orificio con $\beta = 0,3$, siendo el resultado satisfactorio.

6.2.2 Obtención de los datos

Una vez que las condiciones de ensayo se han definido, la obtención de los datos a través de la realización del mismo se puede llevar a cabo. Para ello, es necesario seguir unos pasos previos a la ejecución del ensayo y otros durante su transcurso.

En lo que se refiere a los pasos previos al inicio del ensayo, estos son iguales a los comentados en el apartado 6.1.2 correspondiente al experimento de caracterización de las placas de orificio. Los pasos que se siguen durante la ejecución del ensayo también coinciden con los citados en el apartado 6.1.2 anterior, pero con ciertas diferencias, las cuales se reproducen a continuación:

- El valor de presión aguas arriba a la que tiene lugar el ensayo se define en el rango 250 – 400 kPa.

- En el momento en el que se clicla el botón “WRITE DATA” para guardar los datos medidos que se desean, dichos datos son importados a dos ficheros de texto distintos; uno contiene las medidas del transductor de presión no estacionario y el otro las medidas efectuadas por los demás sensores.
- Además de las gráficas $Q - \sqrt{\Delta P}$ y $T - Q$ que se van construyendo según los datos se guardan, también se genera una gráfica $P - t$, la cual representa las fluctuaciones de presión, medida por el transductor no estacionario, durante el tiempo de muestreo (1 segundo).
- Cuando un ensayo finaliza al haberse alcanzado la condición de flujo bloqueado, se clicla en el botón “STOP” para detener la visualización de las medidas en la GUI y se guardan los datos obtenidos durante el experimento. Posteriormente, se reinicia el programa de MATLAB para dar inicio a un nuevo ensayo, el cual comienza incrementando en 50 kPa el valor de presión aguas arriba empleado en el ensayo anterior.

Cabe mencionar que no se incluyen en el presente trabajo las medidas del transductor de presión no estacionario tomadas en cada ensayo debido a la gran cantidad de datos obtenidos en cada medición (20000 datos de presión y tiempo cada vez que se clicla en el botón “WRITE DATA”), pero sí se recogen en el anexo F los datos medidos por los otros sensores en los diferentes ensayos realizados.

6.2.3 Procesamiento de los datos

Para cada valor de presión aguas arriba, la presentación de la dinámica del flujo, la cual contribuye a la caracterización del mismo, se hace por medio de una representación tridimensional $P_2/P_1 - St - Power\ density$, donde P_2/P_1 es la relación de presión, St es el número de Strouhal y $Power\ density$, la densidad de potencia resultante de efectuar un análisis de frecuencia de los datos medidos por el transductor de presión no estacionario. Asimismo, también se representa la curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$ correspondiente a cada gráfica anterior con la intención de identificar, para la placa de orificio tratada, la zona de trabajo sin cavitación y con ella gracias a la información obtenida en las curvas tridimensionales.

El procedimiento seguido para la obtención de las gráficas tridimensionales $P_2/P_1 - St - Power\ density$ se resume en los siguientes pasos:

- Para cada valor de presión aguas arriba hacer un análisis de frecuencia de los datos de presión medidos por el transductor no estacionario. Esto se lleva a cabo por medio de un análisis de Fourier a través de la función “*pwelch*” de MATLAB. El motivo que ha llevado al empleo de esta función es que permite aislar el ruido por medio del promedio de espectros superpuestos, a diferencia de la función “*fft*” que simplemente calcula la transformada de Fourier de los datos introducidos obteniendo unos resultados gráficos muy ruidosos. Para ello, “*pwelch*” divide la señal temporal en segmentos superpuestos, en este caso en 8 con una superposición del 50% puesto que se ha comprobado que de esta forma se obtienen los mejores resultados sin perder demasiada resolución en frecuencia, y posteriormente efectúa un análisis de Fourier a cada segmento. Hecho el análisis de frecuencia, los argumentos de salida que se obtienen son los vectores de densidad de potencia y frecuencia asociados a cada medición realizada por el sensor no estacionario durante un mismo ensayo.

- Calcular el número de Strouhal, St . Este se define como la relación entre el tiempo que una partícula fluida tarda en recorrer la longitud característica y el tiempo característico del proceso (periodo). Su expresión es la siguiente:

$$St = \frac{l}{v t} \xrightarrow{f = \frac{1}{t}} St = \frac{f l}{v} \quad (ec. 61)$$

Donde l es la longitud característica, v la velocidad del flujo y f la frecuencia de desprendimiento de torbellinos.

Se ha supuesto que en una placa de orificio la longitud característica es el diámetro del orificio, d , y que la velocidad más relevante es la calculada respecto al orificio, v_d . Por tanto, en este caso, la definición del número de Strouhal es la siguiente:

$$St = \frac{f d}{v_d} \quad (ec. 62)$$

En esta ecuación se han tenido en cuenta los aspectos citados a continuación:

- Los valores de frecuencia empleados en la ecuación anterior son los obtenidos como resultado del análisis de frecuencia.
- Dado que el presente experimento únicamente se efectúa para la placa de orificio con $\beta = 0,3$, $d = 15 \text{ mm}$.
- La velocidad del flujo en el orificio se calcula teniendo en cuenta la ecuación de continuidad, ecuación 15.

$$Q = A v$$

$$v_d = \frac{Q}{A_d} \xrightarrow{A_d = \frac{\pi d^2}{4}} v_d = \frac{Q}{\left(\pi d^2/4\right)} \quad (ec. 63)$$

- Calcular la relación de presión, P_2/P_1 , por medio del cociente entre el valor de presión total aguas abajo y presión total aguas arriba, ambos datos proporcionados por los transductores de presión estacionarios. Tanto los valores de la relación de presión como los de la velocidad del flujo en el orificio de la placa se han calculado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel y se incorporan también en el anexo F. Tras su cálculo, ambos valores se incluyen en un fichero .txt para su posterior lectura y uso por el algoritmo de MATLAB.
- Hacer la representación tridimensional por medio de la función de MATLAB “*plot3*” asignando la relación de presión al eje X, el número de Strouhal al eje Y y la densidad de potencia al eje Z. Cabe mencionar que el eje Y se limita a un valor del número de Strouhal igual a 0,5, ya que por encima de este valor no se observa una dinámica significativa.

Estos pasos se han implementado en un programa de MATLAB, cuyo algoritmo se adjunta a continuación.

```
function dinFlujo()

% Data reading
fileID = fopen('Presiones250.txt','r');
formatSpec = '%f';
sizePresion = [9 Inf];
presion = fscanf(fileID,formatSpec,sizePresion);

fileID = fopen('velocidad250.txt','r');
formatSpec = '%f';
sizePresion = [9 Inf];
v = fscanf(fileID,formatSpec,sizePresion);

fileID = fopen('P2_P1_250.txt','r');
formatSpec = '%f';
sizePresion = [9 Inf];
relacionesP = fscanf(fileID,formatSpec,sizePresion);

presion = presion';

Fs = 20000; % Sampling frequency in Hz

L = length(presion); % Length of signal

d = 0.015; % Orifice diameter of the orifice plate

for i=1 : 9

    % Frequency analysis
    % High pass filter
    presion_fil = highpass(presion(:,i),80,Fs);

    % Power Spectrum
    % Pwelch
    [pxx,f] = pwelch(presion_fil,ceil(L/8),[],[],Fs); % Number of intervals = 8

    % Strouhal number
    St = f.*d / v(i);

    % 3D Graphic
    X = relacionesP(i,:);
    Y = St;
    Z = pxx;
    plot3(X,Y,Z,'LineWidth',2)
    hold on

end

title('Dynamic of the flow, P_1 = 250 kPa ')
xlabel('P_2 / P_1')
xlim([0 1])
ylabel('St')
ylim([0 0.5])
zlabel('Power density (dB)')
grid on
legend('P_2 / P_1 = 0.895','P_2 / P_1 = 0.666','P_2 / P_1 = 0.407',...
       'P_2 / P_1 = 0.319','P_2 / P_1 = 0.269','P_2 / P_1 = 0.227',...
       'P_2 / P_1 = 0.166','P_2 / P_1 = 0.113','P_2 / P_1 = 0.001')

end
```

Figura 87 Algoritmo de MATLAB para la representación tridimensional de la dinámica del flujo.

En el código puede verse que previamente al análisis de Fourier se efectúa un filtro de paso alto. Un filtro de este tipo lo que hace es atenuar las señales situadas por debajo de una frecuencia de corte (banda de atenuación) permitiendo el paso de las señales situadas por encima de dicha frecuencia. Esto contribuye a la limpieza de la señal puesto que elimina el ruido de baja frecuencia. En este caso la frecuencia de corte es igual a 80 Hz para asegurar la atenuación de la frecuencia propia de la energía eléctrica (50 Hz).

Por otro lado, la curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$ asociada a cada valor de presión, y por tanto a cada gráfica tridimensional, se obtiene representando en una gráfica el caudal volumétrico medido frente a la raíz cuadrada del salto de presión a través de la placa de orificio, igual que se explicó en el apartado 6.1.3.1. Esto se ha llevado a cabo en una hoja de cálculo de Microsoft Excel. Además, cada punto de la curva característica es del mismo color que la curva tridimensional a la que está asociada con el fin de identificar su correspondencia y facilitar, de este modo, la identificación de las diferentes zonas de trabajo de la placa de orificio.

6.3 Ecuación $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{crit} = f(\beta)$

Con el objetivo de poder predecir a qué valor de presión aguas abajo, P_2 , fijado un valor de presión aguas arriba, P_1 , o viceversa, se produce la condición de flujo bloqueado en una placa de orificio, con los datos proporcionados por la literatura existente se ha propuesto una ecuación que relaciona la relación de presión crítica, $(P_2/P_1)_{crit}$, con la relación de contracción, β , parámetro que como se ha destacado es especialmente influyente en el fenómeno de cavitación. Por tanto, se consigue contribuir a la predicción de este fenómeno, en particular a la predicción de la cavitación por asfixia con dicha ecuación, la cual es aplicable para placas de orificio delgadas con un único orificio y con una relación de diámetros, β , entre 0,297 y 0,884. Además, esto también ha permitido verificar si los resultados obtenidos en el presente estudio se corresponden con lo publicado en la literatura y ampliar la base de datos experimental.

Previamente a la obtención de la ecuación comentada ha sido necesario hacer comparables entre sí los datos procedentes de la literatura y los resultados obtenidos en esta investigación. La razón de esto es que las bases de datos existentes no proporcionaban el alcance de la condición de flujo bloqueado a través de la relación de presión crítica sino con el número de cavitación por asfixia, σ_{ch} .

Concretamente las bases de datos con las que se ha trabajado fueron las de los experimentos de Tullis [6], [9] y de Testud [20]. Para transformar los datos del número de cavitación por asfixia en sus correspondientes valores de relación de presión crítica se ha tenido en cuenta la fórmula empleada en cada caso para el cálculo de tal número de cavitación, así como las condiciones del fluido de trabajo. En particular, [6] y [20] emplean la ecuación 46 mientras que [9] se basa en la ecuación 45 para el cálculo de σ_{ch} . Por tanto, teniendo en cuenta lo comentado en el apartado 4.4.6.4 acerca de la ausencia de efectos de escala de tamaño, presión y velocidad, es posible fijar un valor de presión aguas arriba de manera que la única incógnita en las ecuaciones señaladas es el valor de presión aguas abajo.

En resumen, los pasos para obtener la relación de presión crítica asociada a cada número de cavitación de la base de datos son los siguientes:

- Emplear la expresión apropiada del número de cavitación por asfixia según lo indicado en cada investigación y despejar la única incógnita: P_2 .

$$\sigma_{ch} = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_2} \rightarrow P_2 = \frac{P_1(\sigma_{ch} - 1) + P_v}{\sigma_{ch}} \quad (ec. 64)$$

$$\sigma_{ch} = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} \rightarrow P_2 = \frac{\sigma_{ch} P_1 + P_v}{1 + \sigma_{ch}} \quad (\text{ec. 65})$$

- Fijar un valor de presión aguas arriba, P_1 , ya sea el indicado en el propio experimento u otro y tomar el valor adecuado para la presión de vapor, P_v , a la temperatura del fluido de trabajo.
- Calcular P_2 con ayuda de las ecuaciones anteriores y el cociente $(P_2/P_1)_{crit}$. Cabe mencionar que como se han fijado varios valores de P_1 , se han obtenido varios valores de la relación $(P_2/P_1)_{crit}$ para cada número de cavitación. Esto se ha hecho para comprobar la falta de efectos de escala de presión, pues para un mismo número de cavitación todos ellos son iguales. Entonces, con el fin de tener un único valor $(P_2/P_1)_{crit}$ asociado a cada número de cavitación y relación de contracción se calcula su valor medio.

Aplicando los pasos anteriores a cada valor del número de cavitación por asfixia asociado a una relación de contracción se obtiene la relación de presión crítica correspondiente. En el anexo G se recogen los cálculos efectuados en cada base de datos para llegar al resultado final.

Finalmente, se representa en una misma gráfica los valores de las relaciones de presión crítica, $(P_2/P_1)_{crit}$, calculados frente a la relación de contracción, β , y se aplica una regresión cúbica para los puntos representados indicando el deseo de incorporar a esta gráfica la ecuación de la función cúbica junto con el valor del coeficiente de determinación, R^2 . Se opta por seleccionar una regresión cúbica porque se considera que la forma de una función cúbica es la que más se asemeja a la función que describe la representación.

6.4 Análisis de incertidumbre

La comprensión adecuada de los datos obtenidos a partir de las mediciones efectuadas es fundamental para poder aplicar los conocimientos necesarios en el procesamiento de los mismos. No obstante, es importante tener en cuenta que cada medición tiene un error total, siendo este la diferencia entre el valor medido y el valor real. Dado que el valor verdadero siempre se desconoce, tampoco es posible conocer el error total, por lo que se estima una incertidumbre, la cual permite establecer un intervalo sobre el valor medido en el que se debe encontrar el valor real.

Como puede verse en la siguiente figura, el error total consta de dos componentes: error aleatorio y error sistemático.

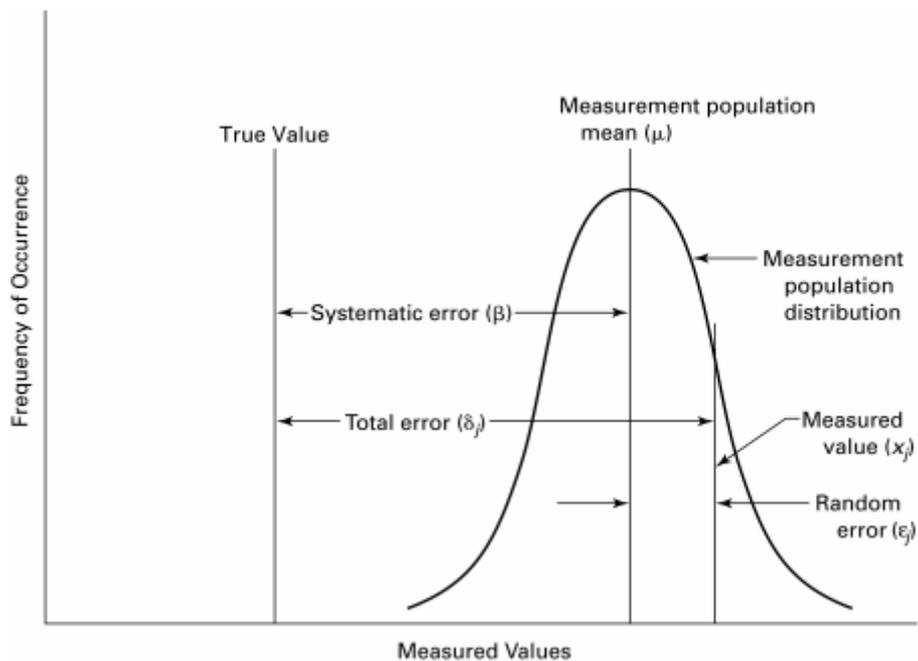


Figura 88 Error en las mediciones. ASME PTC 19.1-2005.

Por tanto, la incertidumbre total en una medición es la combinación de la incertidumbre debida a un error aleatorio y la debida a un error sistemático. Cada una de ellas será calculada en los siguientes subapartados para las variables de presión y caudal con la intención de determinar finalmente la incertidumbre total asociada a cada una.

6.4.1 Incertidumbre aleatoria

Cualquier medición de una variable está influenciada por varias fuentes de error aleatorias cuyos valores cambian en las sucesivas mediciones dando como resultado una evidente dispersión aleatoria en ellas. Es decir, el error aleatorio es la parte del error total que varía aleatoriamente en repetidas mediciones de un mismo ensayo.

Si se toma un número infinito de mediciones de una misma variable siguiendo el mismo procedimiento de ensayo, estadísticamente la población resultante de las mediciones se describe a través de la media μ , la desviación estándar σ y la distribución de frecuencia de la población. Sin embargo, dado que solo es posible adquirir un número finito de mediciones en un ensayo, la media real y la desviación estándar de la población se desconocen, pero se pueden estimar a partir de dos estadísticas de muestra: la media muestral, \bar{X} , y la desviación estándar muestral, s_X .

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (\text{ec. 66})$$

$$s_X = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (\text{ec. 67})$$

Donde X_j es el valor de cada medida individual de la muestra y N el número total de medidas de la muestra.

No obstante, debido a que la media muestral es solo una estimación de la media de la población, existe un error en el uso del primer parámetro para estimar el segundo. Para definir un intervalo sobre la media muestral en el que se espera que contenga la media de la población con un cierto nivel de confianza se puede emplear la incertidumbre estándar aleatoria de la media muestral, $s_{\bar{x}}$. Esta está relacionada con la desviación estándar muestral a través de la siguiente ecuación:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{N}} \quad (\text{ec. 68})$$

Asumiendo una distribución normal y un tamaño de muestra grande ($N > 30$) se espera que el intervalo $\bar{X} \pm 2 s_{\bar{x}}$ contenga la media de la población con un nivel de confianza del 95%.

A continuación, se procede a aplicar lo que se acaba de comentar para determinar la incertidumbre aleatoria con un 95% de confianza de los valores de las variables medidas en este trabajo. En la tabla 15 se recogen los datos de caudal y presión aguas arriba que componen la muestra que se ha recogido. Los datos de dicha muestra, cuyo tamaño es $N = 40$, se han obtenido para un mismo valor de caudal volumétrico, $Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$, y presión aguas arriba, $P_1 = 250 \text{ kPa}$.

$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$						
7,047740	250,080017	7,038111	250,076713	7,070493	250,021268	7,065009	249,979250
7,056295	250,039231	7,071174	250,149894	7,033628	250,116322	7,059614	250,026548
7,034797	250,060858	7,044529	250,075073	7,069750	250,052392	7,046177	250,130385
7,072655	249,993044	7,053699	250,032786	7,049027	250,109361	7,063177	250,046505
7,047963	250,090148	7,073719	250,004459	7,041049	250,000471	7,043295	250,108781
7,040972	250,136939	7,076965	250,112113	7,041318	250,005061	7,054535	250,012678
7,042541	249,986438	7,033509	250,007123	7,049370	250,115662	7,051456	250,115276
7,032812	250,009643	7,075056	249,997712	7,058768	250,051985	7,053791	249,992062
7,047981	250,041100	7,042243	250,034763	7,059011	250,086584	7,053378	250,035194
7,086153	250,101669	7,055588	250,096874	7,060366	250,073879	7,058452	250,016955

Tabla 15 Muestra de datos de caudal y presión.

Aplicando las ecuaciones 66, 67 y 68 a los valores de la tabla anterior se calcula la incertidumbre aleatoria para las variables de presión y caudal. Sus valores se recogen en la siguiente tabla:

	Presión	Caudal
Media muestral, \bar{X}	250,055580	7,053904
Desviación estándar muestral, s_x	0,048179	0,013409

Incertidumbre aleatoria, $s_{\bar{x}}$ Nivel de confianza: 95%	1,5236%	0,4240%
---	---------	---------

Tabla 16 Incertidumbre aleatoria asociada a las variables de presión y caudal.

6.4.2 Incertidumbre sistemática

Además de las fuentes de error aleatorias, cada medición de un parámetro está también influenciada por varias fuentes de error sistemático. Este es la parte del error total debido a los propios errores sistemáticos de los aparatos de medida por lo que permanece constante en mediciones repetidas durante la realización de un ensayo.

En el apartado 5.2.1 se han especificado los errores sistemáticos asociados a cada uno de los dispositivos de medida empleados. Estos se recopilan de nuevo en la siguiente tabla.

	Sensor	Error sistemático
Presión	PXM219-004G10V	0,25 %
	401001/000-458-405-521-20-604-61	0,25 %
	401010/000 TN 00523648	0,25 %
	PXM219-VAC000G10V	0,25 %
	XP5-M-5BA-/L3M	0,25 %
Caudal	COMAC CAL S.R.O. FLOW 33	0,5 %

Tabla 17 Error sistemático de los sensores de presión y caudal empleados.

Como el error sistemático, $\beta_{\bar{x}}$, es constante para el ensayo, el error impartido a la media muestral es equivalente al error asociado a cada medición individual de la muestra. Por tanto, la incertidumbre sistemática, $b_{\bar{x}}$, se puede usar para cuantificar la dispersión del error sistemático asociado a la media.

Teniendo en cuenta la tabla 17, en la siguiente se recoge la incertidumbre sistemática asociada a cada una de las variables medidas directamente en los ensayos.

Variable	Incertidumbre sistemática, $b_{\bar{x}}$
Presión	0,25 %
Caudal	0,5 %

Tabla 18 Incertidumbre sistemática en las mediciones de presión y caudal.

6.4.3 Incertidumbre total.

Como se mencionó anteriormente, la incertidumbre total en una medición es la combinación de la incertidumbre debida a un error aleatorio y la debida a un error sistemático. Se calcula del siguiente modo:

$$u_{\bar{x}} = \sqrt{(s_{\bar{x}})^2 + (b_{\bar{x}})^2} \quad (ec. 69)$$

Empleando la ecuación anterior se obtiene la incertidumbre total para cada variable medida, apareciendo esta reflejada en la tabla 19.

Variable	Incertidumbre aleatoria, $s_{\bar{x}}$	Incertidumbre sistemática, $b_{\bar{x}}$	Incertidumbre total, $u_{\bar{x}}$
Presión	1,5236%	0,25 %	1,5439%
Caudal	0,4240%	0,5 %	0,6556%

Tabla 19 Incertidumbre total en las mediciones de presión y caudal.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

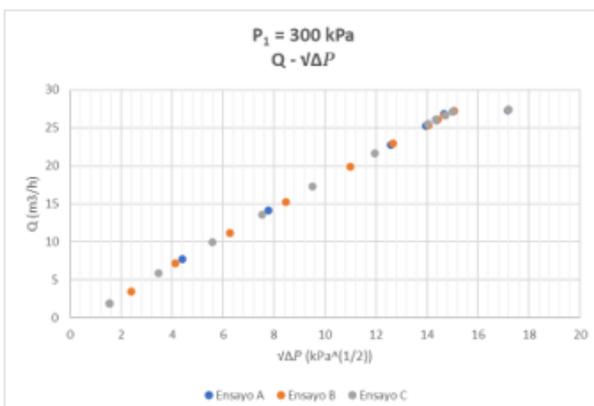
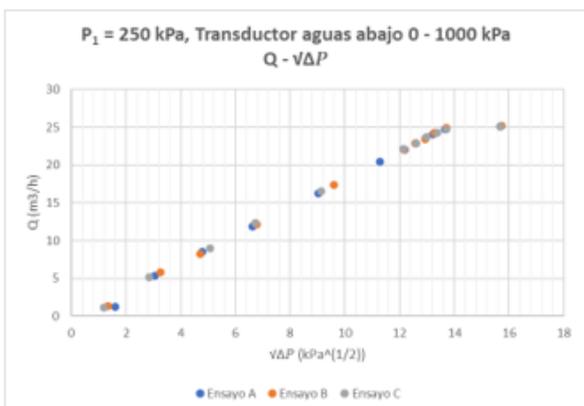
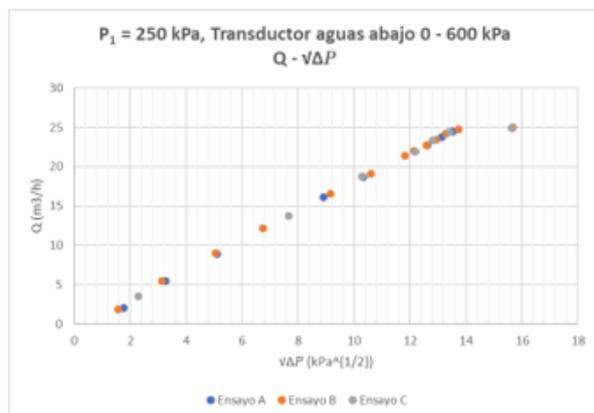
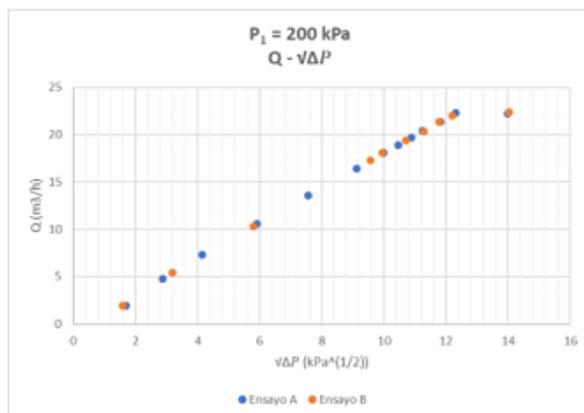
En esta sección se lleva a cabo la recopilación de los resultados obtenidos en los experimentos realizados, así como su comparación con la literatura existente. Gracias a esto podrán explicarse, posteriormente, las conclusiones extraídas.

7.1 Caracterización de las placas de orificio

La caracterización de las dos placas de orificio utilizadas en el presente proyecto de investigación se efectúa a través de la representación de las curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ y $Q - P_2/P_1$.

7.1.1 Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$

Las figuras adjuntas a continuación muestran, para cada una de las dos placas de orificio con las que se ha trabajado, las curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ obtenidas en cada ensayo realizado bajo distintas condiciones de presión a la entrada. El primer bloque de figuras se corresponde con la placa de orificio con $\beta = 0,5$ y el segundo con la de $\beta = 0,3$. Como ya se ha indicado, para su consecución se ha mantenido constante el valor de presión aguas arriba disminuyendo, por tanto, la presión aguas abajo para conseguir valores cada vez más grandes de salto de presión.



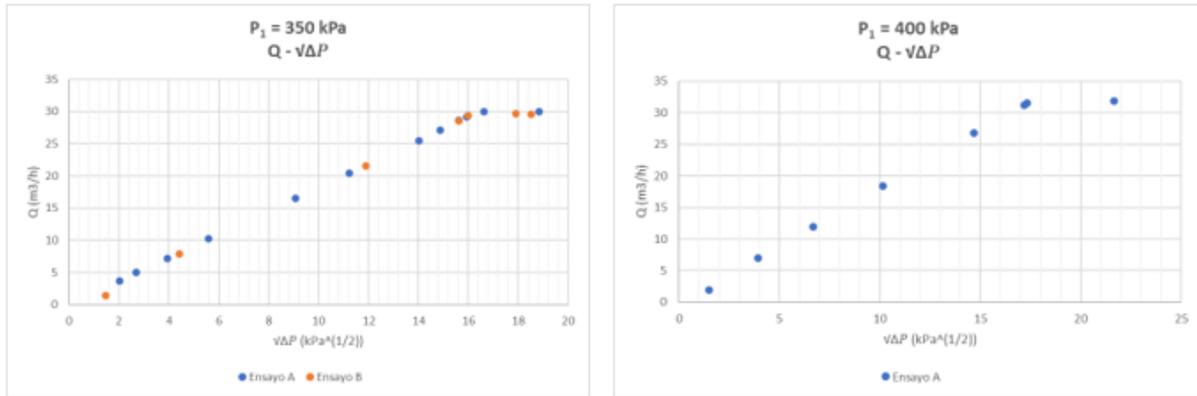


Figura 89 Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ de los ensayos correspondientes a la placa de orificio con $\beta = 0,5$ para distintas condiciones de presión aguas arriba.

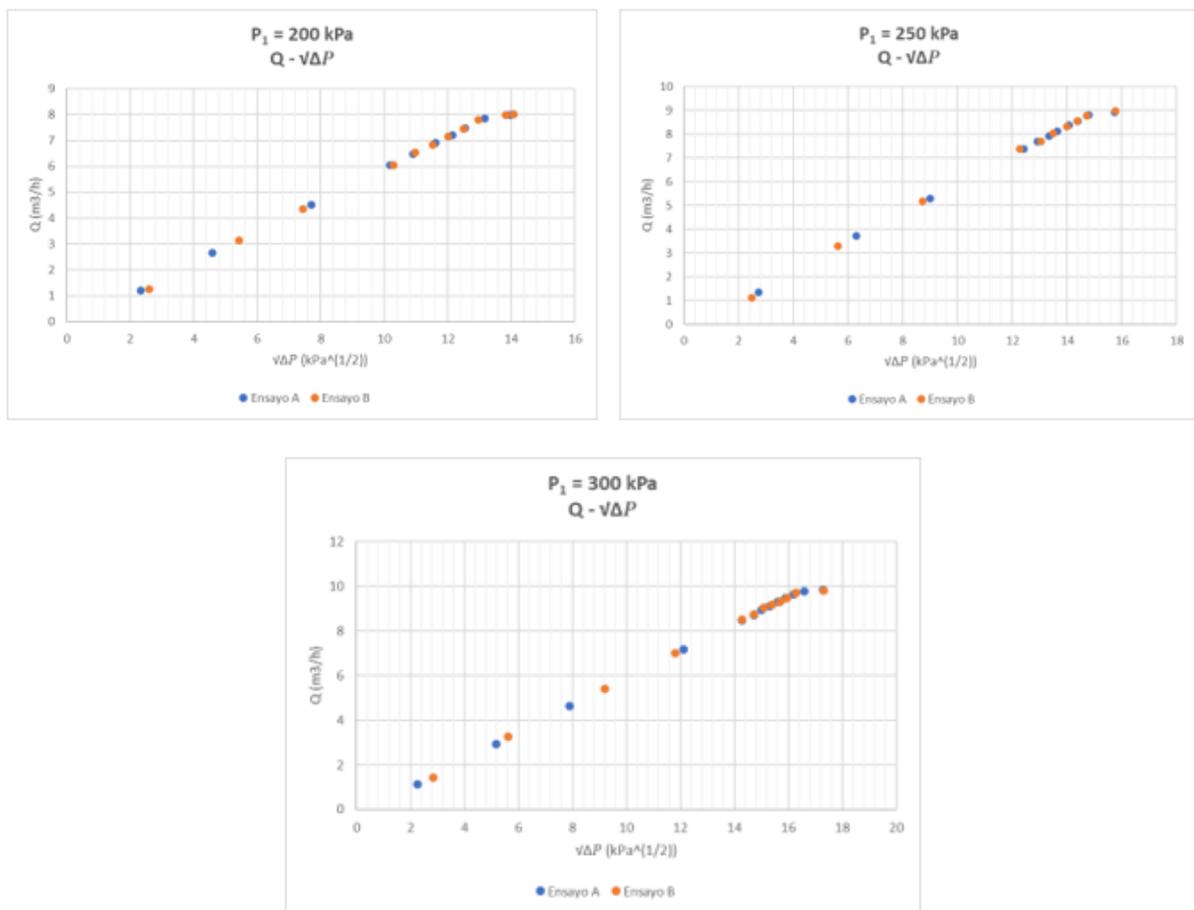


Figura 90 Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ de los ensayos correspondientes a la placa de orificio con $\beta = 0,3$ para distintas condiciones de presión aguas arriba.

El objetivo de presentar los resultados de esta forma, tal y como se señaló en el apartado 6.1.3.1, es demostrar la buena repetibilidad obtenida en los ensayos realizados, puesto que como puede verse los errores de precisión cometidos son muy bajos. Además, en la figura 89 también se incluyen las gráficas de las curvas características a una presión

aguas arriba de 250 kPa obtenidas con los dos transductores de presión aguas abajo empleados. Es posible observar que la diferencia entre ambas representaciones es ínfima, dotando, del mismo modo que se ha indicado anteriormente, de validez y consistencia a los resultados expuestos.

Asimismo, también resulta sencillo observar la similitud entre las gráficas anteriores y la presentada en la figura 35, viéndose que siguen la misma tendencia. En ambas placas de orificio, se identifica claramente la condición de flujo bloqueado, ya que esta está representada por la línea asintótica horizontal, lo cual permite, por tanto, conocer en cada caso la caída de presión a la que tiene lugar el máximo caudal volumétrico que puede circular a las condiciones de entrada marcadas, junto con el valor de este. Es decir, las curvas anteriores permiten el conocimiento de la caída de presión a la que tiene lugar la condición de flujo bloqueado, ΔP_{ch} , algo de gran importancia para esta investigación, ya que nos permite determinar tal condición.

Además, las curvas características permiten también identificar las zonas de trabajo con y sin cavitación, aunque determinar visualmente el punto exacto de la transición de una a otra no resulta tan sencillo debido a la dificultad de identificar a simple vista el paso de una relación lineal a no lineal entre Q y $\sqrt{\Delta P}$. Sin embargo, esto se conseguirá gracias al siguiente experimento.

Con el fin de poder comparar las curvas características de las placas de orificio a las distintas condiciones de entrada y obtener una mejor visualización de su evolución, en las siguientes figuras se presentan en una misma gráfica una curva característica por cada valor de presión aguas arriba para cada placa de orificio.

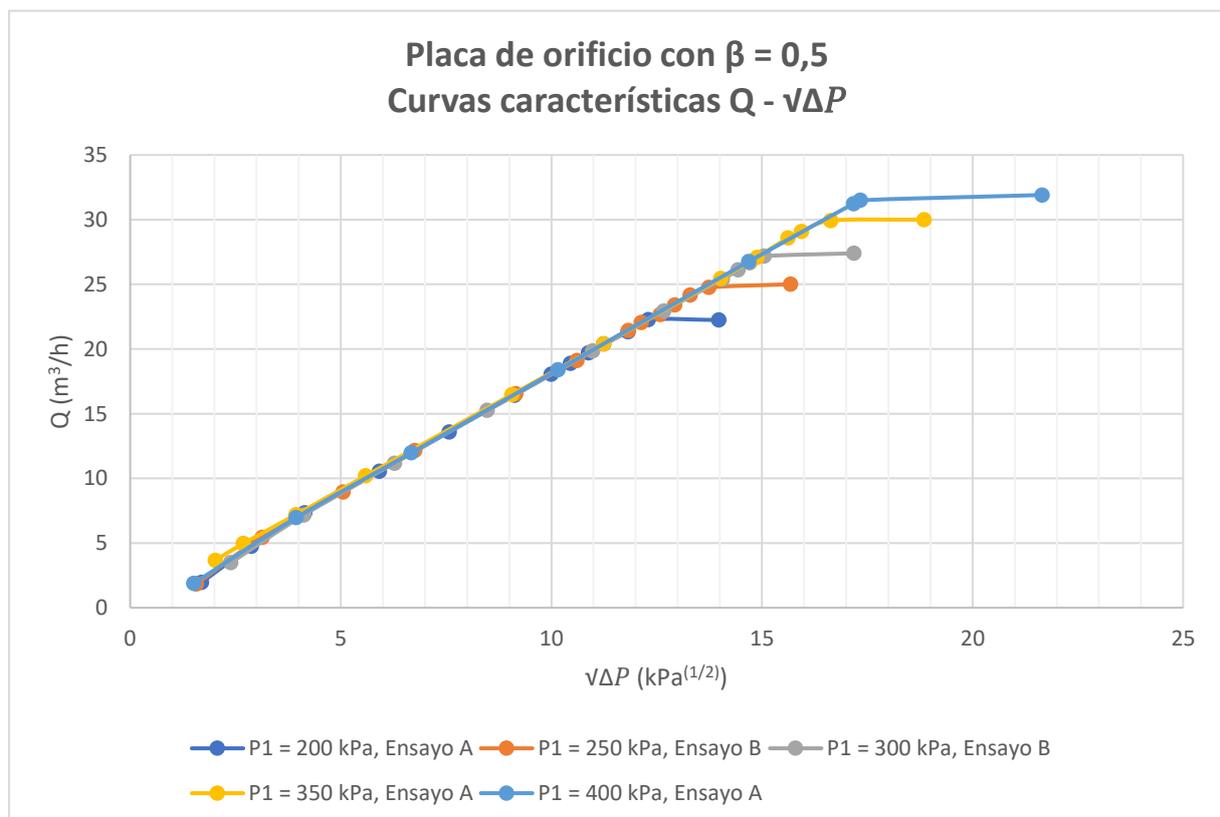


Figura 91 Comparación de una curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$ por cada valor de presión aguas arriba para la placa de orificio con $\beta = 0,5$.

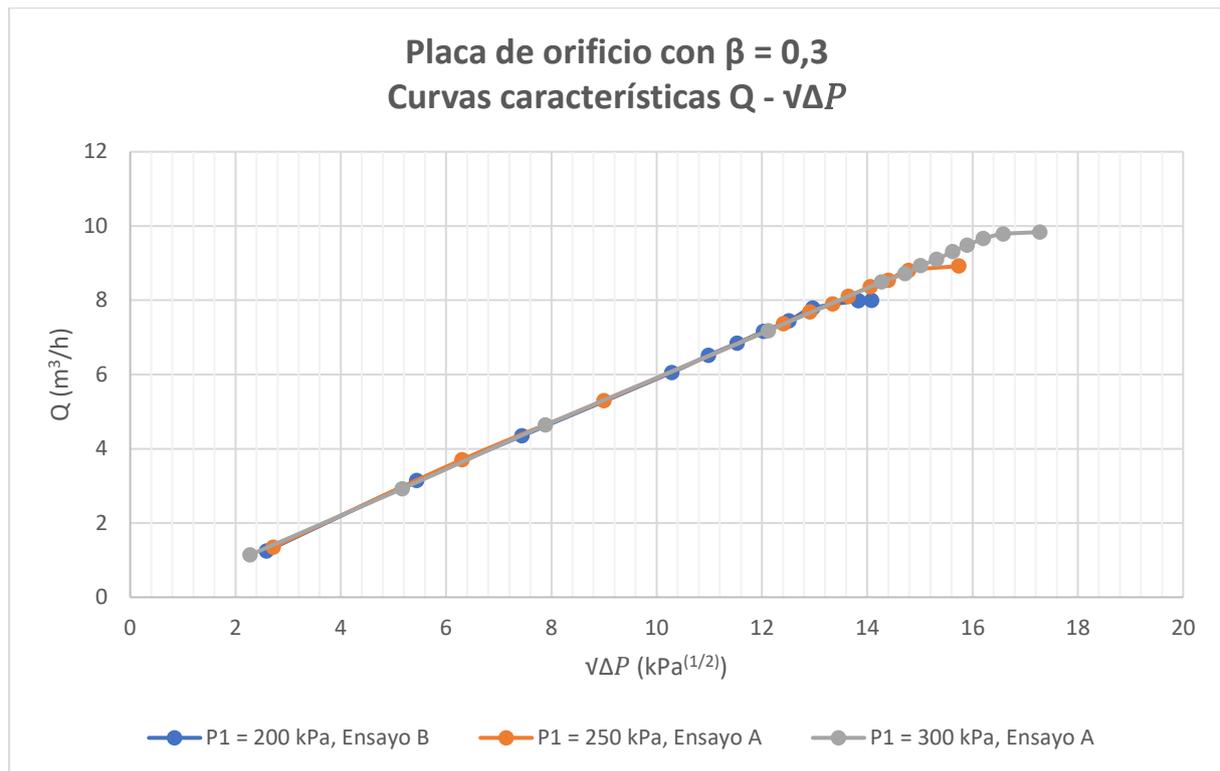


Figura 92 Comparación de una curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$ por cada valor de presión aguas arriba para la placa de orificio con $\beta = 0,3$.

Gracias a estas dos figuras se aprecia que, independientemente de las condiciones de presión a la entrada, las curvas características son similares y siguen una misma función hasta que tiene lugar el más alto nivel de cavitación (cavitación por asfixia). Además, también puede verse, al igual que en las imágenes presentadas al comienzo del subapartado, que a medida que aumenta la caída de presión en la placa de orificio, el caudal también aumenta hasta llegar a alcanzarse el bloqueo del orificio.

Debido a que la presión aguas arriba se mantiene en un valor constante en un mismo ensayo, lo que provoca el aumento del salto de presión es la reducción de la contrapresión. Esta disminución conduce también a una reducción en la presión estática de la vena contracta, la cual cuando alcanza un valor por debajo de la presión de vapor da lugar a la aparición del fenómeno de cavitación. Según continúa disminuyendo la presión aguas abajo, la zona de baja presión aumenta dado que el proceso de vaporización se intensifica, propiciando la generación de más burbujas de vapor e intensificando también el ruido, daños y vibraciones. Evitar estos efectos negativos es el motivo por el que es tan importante conocer las curvas características de una placa de orificio.

Comparando entre sí cada curva característica de las dos placas de orificio a la misma presión de entrada, son visibles diferencias significativas tanto en caída de presión como en caudal, lo cual es debido a la distinta restricción que ocasiona una y otra. Como el orificio de la placa de orificio con $\beta = 0,5$ es de mayor tamaño que el de la otra placa, la restricción que provoca en el flujo es menor, permitiendo la circulación de un mayor caudal volumétrico en la instalación para un mismo valor de salto de presión. Precisamente, la relación de contracción es también la razón de la diferencia del valor de la caída de presión para un mismo caudal entre ambas placas de orificio, pues, como ya se explicó, cuanto mayor es β , menor es la restricción ocasionada y, por tanto, menor es la caída de presión que tiene lugar a través de la placa de orificio. En resumen, a mayor valor en la relación de contracción,

mayor es el caudal volumétrico que podrá circular en la instalación y menor es la diferencia de presión generada por la placa de orificio, lo cual concuerda con lo representado en las gráficas.

Por otro lado, la veracidad en la forma de las curvas obtenidas también se demuestra a través de una comparación con la literatura existente. Esta comparación se hace con la investigación de B. Ebrahimi et al. [10], presentándose las curvas obtenidas en sus experimentos en la siguiente figura.

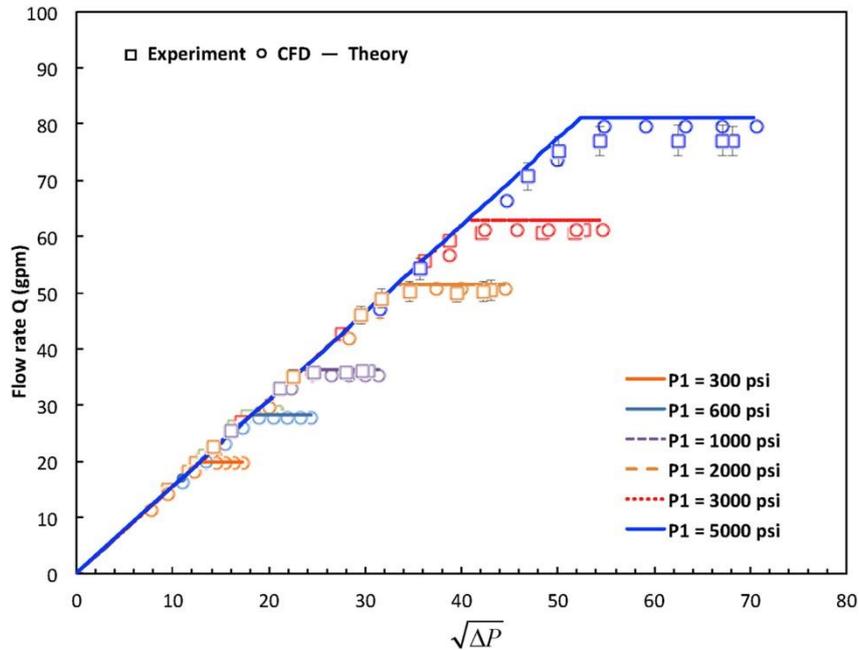


Figura 93 Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ de una placa de orificio con $\beta = 0,223$.
Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.

Resulta clara la similitud entre las curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ de la presente investigación con las de los experimentos que figuran en la literatura.

A mayores de los resultados expuestos, se ha considerado también interesante analizar cuan de preciso es necesario ser durante la ejecución de un ensayo en la fijación del valor de presión aguas arriba. Es decir, lo que se pretende es comprobar si es posible definir un cierto margen dentro del cual la curva característica de una placa de orificio se mantiene invariable. Para ello, se ha llevado a cabo un ensayo con la placa de orificio con $\beta = 0,5$ y unas condiciones de presión a la entrada de 250 kPa, pero con un margen igual a ± 10 kPa por lo que se admitirán valores de presión aguas arriba dentro del rango 240 – 260 kPa a efectos de representar la curva característica. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura y los datos del ensayo se recogen en el anexo D.

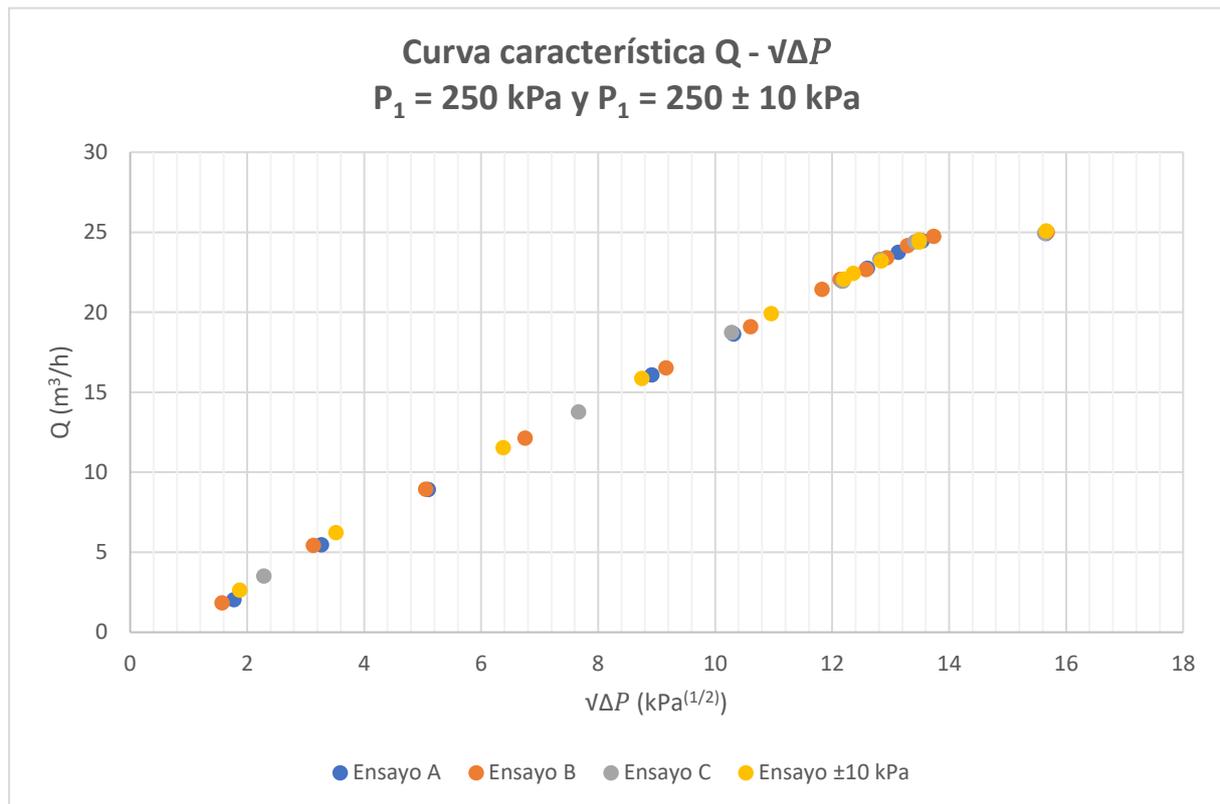


Figura 94 Curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$ correspondiente a la placa de orificio con $\beta = 0,5$ bajo unas condiciones de presión a la entrada igual a 250 kPa y un margen de ± 10 kPa.

Puede verse que, aun admitiendo valores de presión en un margen de ± 10 kPa, la curva característica no sufre ninguna variación en comparación con la obtenida manteniendo un control exhaustivo en el valor de presión aguas arriba. Por tanto, esto sugiere que a la hora de efectuar un ensayo definiendo previamente unas condiciones de presión a la entrada, no es necesario ser tan estrictos en mantener constantes dichas condiciones dado que la caracterización de la placa de orificio no se verá afectada.

En este caso se ha elegido arbitrariamente un margen de ± 10 kPa, sin embargo, sería interesante determinar el margen límite bajo el cual las curvas características de una placa de orificio se mantienen sin cambios entre sí y respecto a la obtenida con un valor constante de presión aguas arriba durante el ensayo, y por encima del cual los cambios obtenidos sí que son significativos. En consecuencia, se propone esta nueva línea de investigación de cara a trabajos futuros.

7.1.2 Curvas características $Q - P_2/P_1$

Dado que uno de los objetivos de este trabajo es predecir en qué condiciones de presión tendrá lugar la condición de flujo bloqueado en función de la relación de contracción de la placa de orificio, se ha efectuado un estudio de tal situación. Para ello, se presentan en las figuras 95 y 96 las curvas $Q - P_2/P_1$ de las dos placas de orificio empleadas, contribuyendo estas a la caracterización de tales dispositivos.

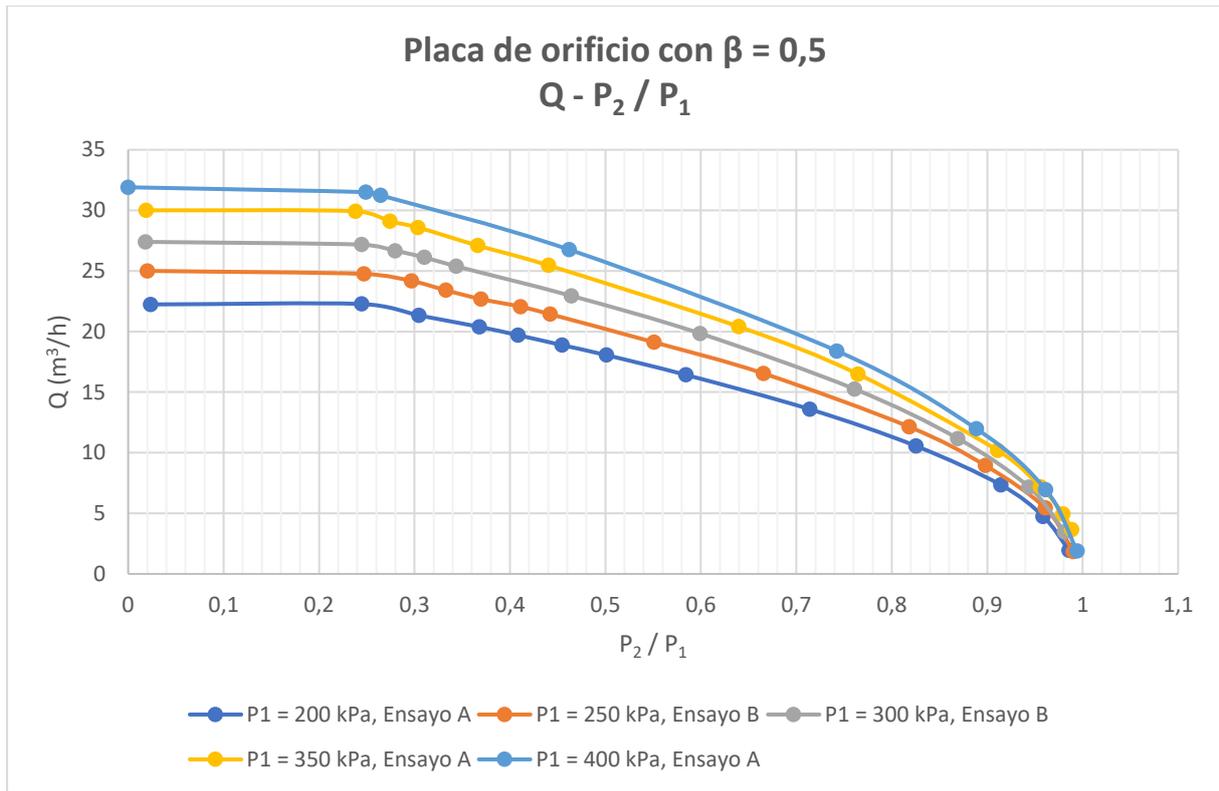


Figura 95 Curvas características $Q - P_2/P_1$ correspondientes a la placa de orificio con $\beta = 0,5$.

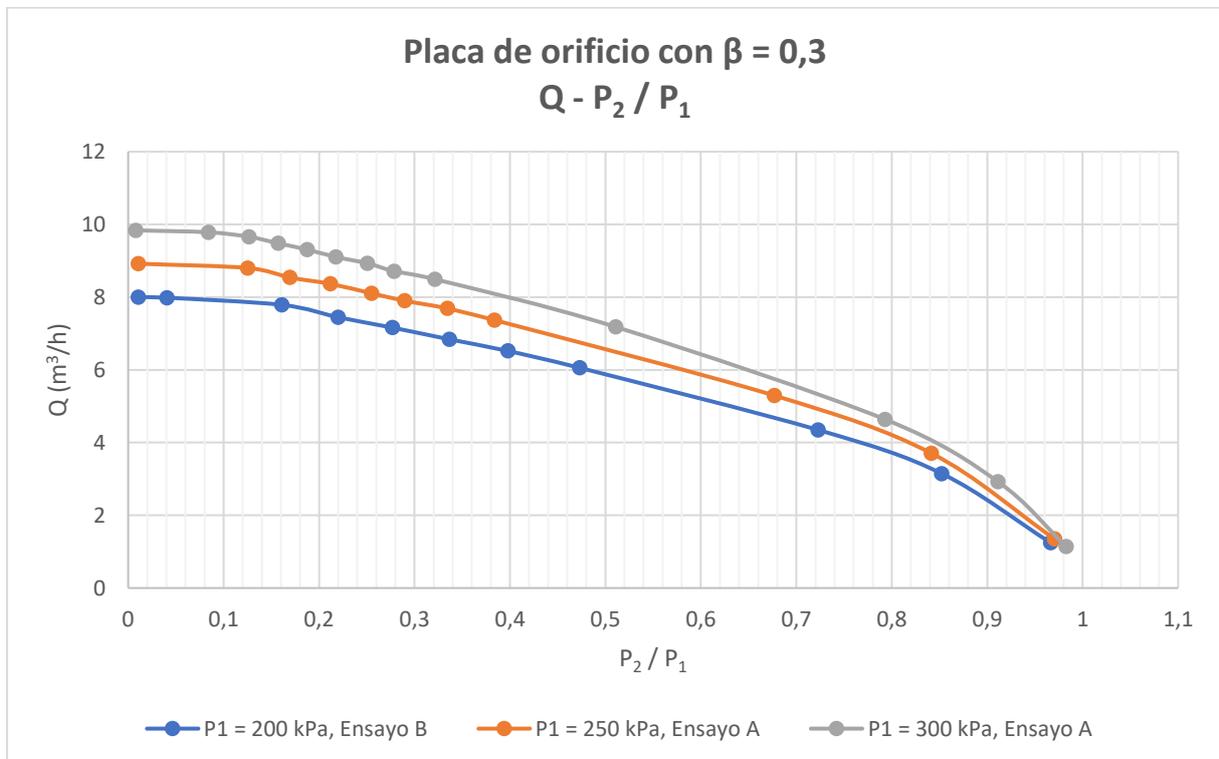


Figura 96 Curvas características $Q - P_2/P_1$ correspondientes a la placa de orificio con $\beta = 0,3$.

Como puede verse, y tal como se dedujo en las gráficas $Q - \sqrt{\Delta P}$, dada una presión aguas arriba constante, el caudal volumétrico a través de la placa de orificio aumenta según se reduce la contrapresión P_2 , es decir, según disminuye la relación P_2/P_1 (y aumenta el salto de presión ΔP). Esta tendencia, que coincide con la de la figura 43, continúa hasta que se llega a un valor crítico en la relación P_2/P_1 denominado relación de presión crítica. Cuando se alcanza este valor, se produce el bloqueo del flujo de manera que el caudal deja de aumentar aún con una disminución de la presión aguas abajo. Las dos figuras anteriores muestran que tal condición para la placa de orificio con $\beta = 0,5$ se produce aproximadamente a un valor de $\frac{P_2}{P_1} = 0,25$, mientras que cuando $\beta = 0,3$ tiene lugar aproximadamente cuando $\frac{P_2}{P_1} = 0,1$. Por debajo de estos valores el flujo se bloquea. Además, cabe destacar que esto se produce para todos los grupos de datos de cada placa de orificio.

Por tanto, de lo anterior se deduce que cuanto menor es el valor de la relación de diámetros, más difícil será alcanzar la condición de flujo bloqueado puesto que menor será el valor de la relación de presión crítica. Dicho de otra forma, dada una presión aguas arriba constante, cuanto menor sea β , más pequeño tendrá que ser el valor de la presión aguas abajo para conseguir el bloqueo del orificio.

La razón de esto último puede ser, tal y como apunta T. S. Koivula [7], que cuanto mayor es el diámetro del orificio, más fácil se produce la cavitación, como se ha mostrado en la figura 38, porque hay más espacio para la nucleación y crecimiento de las burbujas de vapor. Es decir, con un aumento en la relación de contracción, aumenta la vida de las cavidades antes de su colapso, tal y como puede verse en la siguiente imagen extraída de [18].

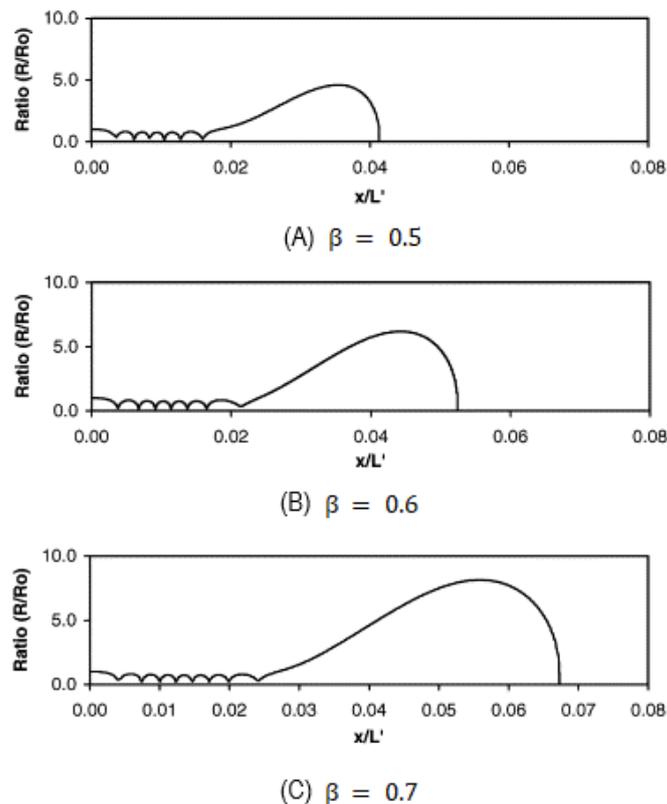


Figura 97 Influencia de la relación de contracción de una placa de orificio sobre el crecimiento de las burbujas de vapor. Imagen modificada de Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. V. S Moholkar y A. B Pandit.

Se aprecia que a medida que aumenta la relación de diámetros, el tamaño que alcanza la burbuja de vapor antes de su colapso también aumenta. Esto entra en concordancia con lo comentado por P. M. Kanthale et al. [12] acerca de que, para un mismo número de cavitación, es decir, para unas mismas condiciones de presión y características del fluido de trabajo, la extensión de la cavitación se incrementa con el aumento de la relación de contracción, algo que también se puede ver en las figuras anteriores puesto que el colapso de las cavidades tiene lugar a una mayor distancia de la placa de orificio (posición indicada por el 0) conforme β es mayor. De este modo, se apunta a que como con el aumento de β se generan más burbujas de vapor con una vida mayor dado que permanecen en la zona de baja presión durante más tiempo, el mayor número y tamaño que pueden alcanzar acelera la fusión entre ellas propiciando antes la aparición de una gran bolsa de vapor a la salida de la placa de orificio, lo que se traduce en el bloqueo del flujo. En resumen, cuanto mayor es el valor de la relación de diámetros, antes se alcanzará la condición de cavitación por asfixia, lo que también concuerda con la figura 40.

Comparando los resultados obtenidos con la literatura consultada, se observa que no entran en conflicto entre sí. En particular, B. Ebrahimi et al. [10] han obtenido que para una placa de orificio con $\beta = 0,223$, la relación de presión crítica tiene un valor de $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{crit} = 0,45$, como muestra la figura 98. Esto puede parecer que discrepe de los resultados aquí presentados, sin embargo, no es así puesto que la placa de orificio empleada en su investigación se clasifica como una placa de orificio gruesa, es decir, la relación L/d es mayor o igual que dos, concretamente en ese caso es igual a dos, mientras que las empleadas en este proyecto, si se recuerda, se clasifican como delgadas, por lo que las características del flujo son distintas.

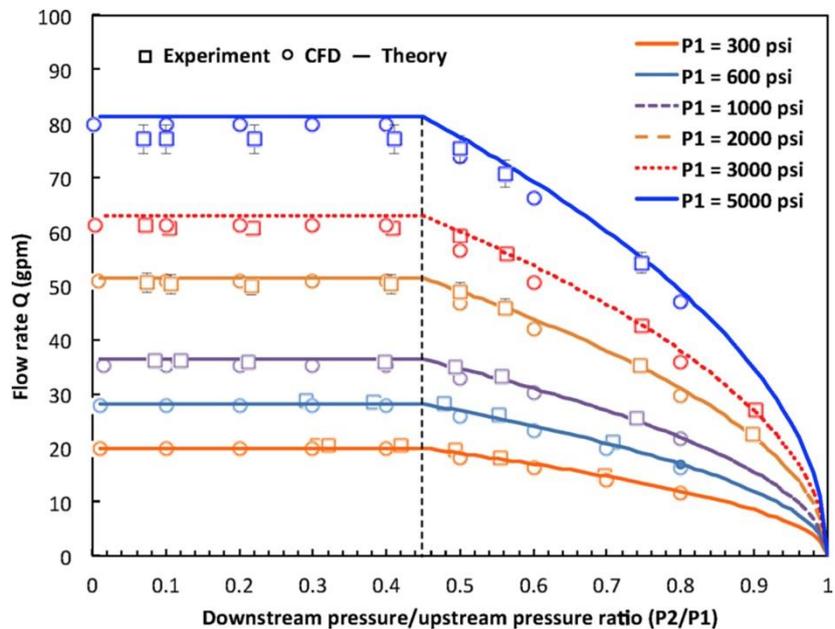
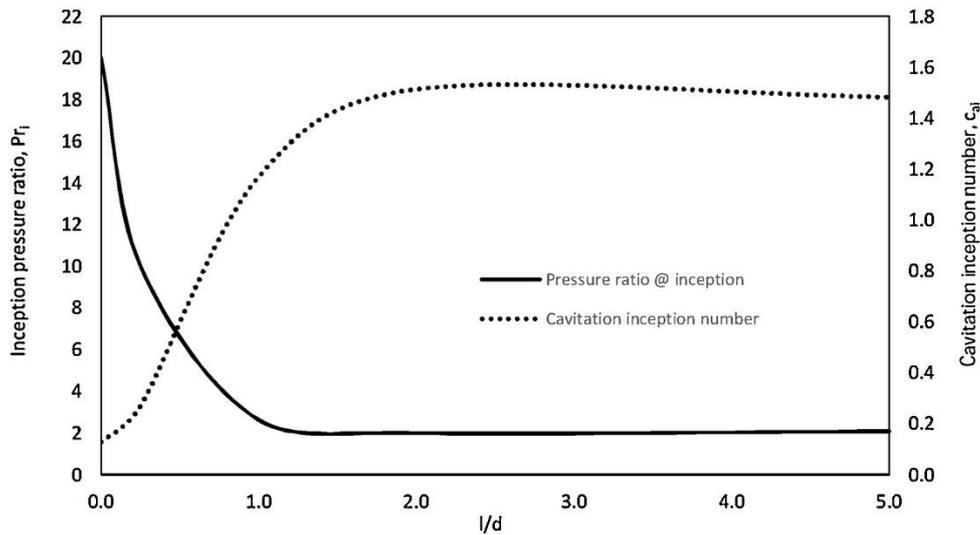


Figura 98 Curvas características $Q - P_2/P_1$ para una placa de orificio gruesa con $\beta = 0,223$. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. B. Ebrahimi et al.

Por tanto, la relación de presión crítica depende en gran medida de los parámetros geométricos de la placa de orificio, no solo de la relación de contracción sino también del espesor relativo L/d . La influencia de este último en el fenómeno de cavitación y particularmente en la cavitación por asfixia como se ha visto es que, dado un valor de la

relación de contracción, cuanto menor es el espesor relativo de una placa de orificio, se requieren grandes relaciones de presión P_1/P_2 , o lo que es lo mismo, relaciones de presión P_2/P_1 más bajas, para inducir la cavitación (figura 99) y alcanzar el bloqueo del flujo.



a: Cavitation inception number vs aspect ratio

Figura 99 Influencia del espesor relativo de una placa de orificio con $\beta = 0,223$ en el flujo cavitante. Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs. Alister Simpson y Vivek V. Ranade.

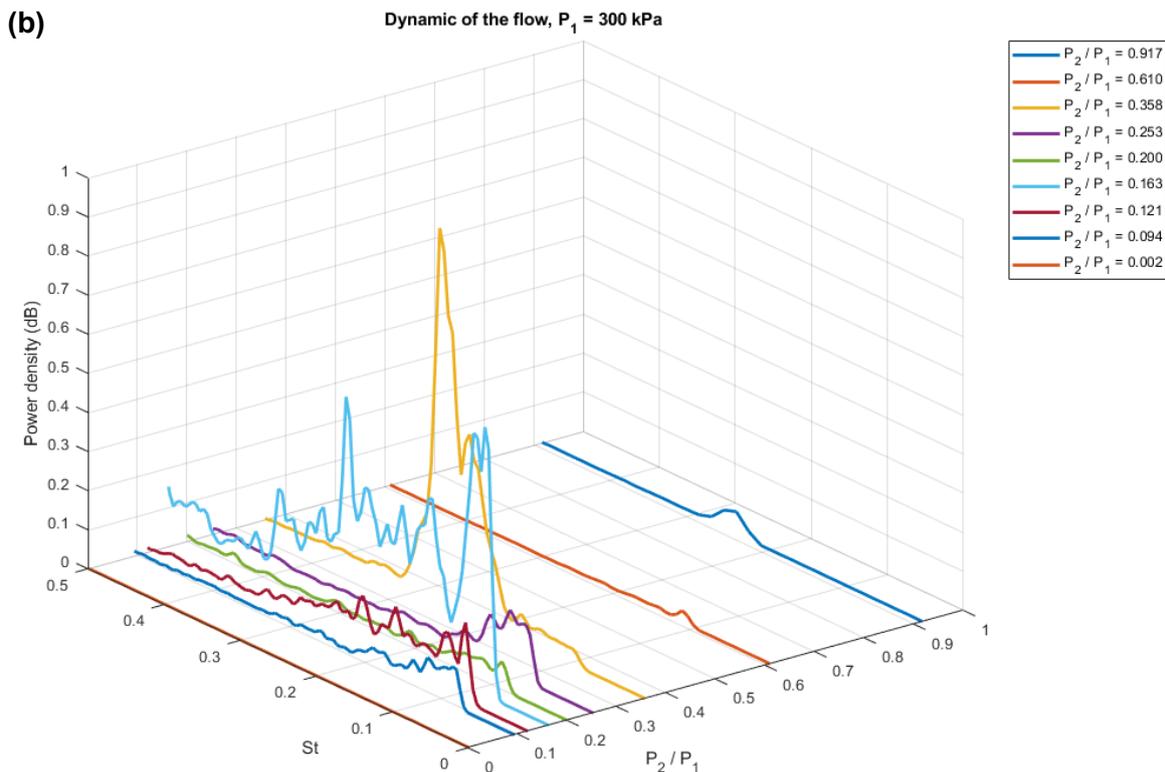
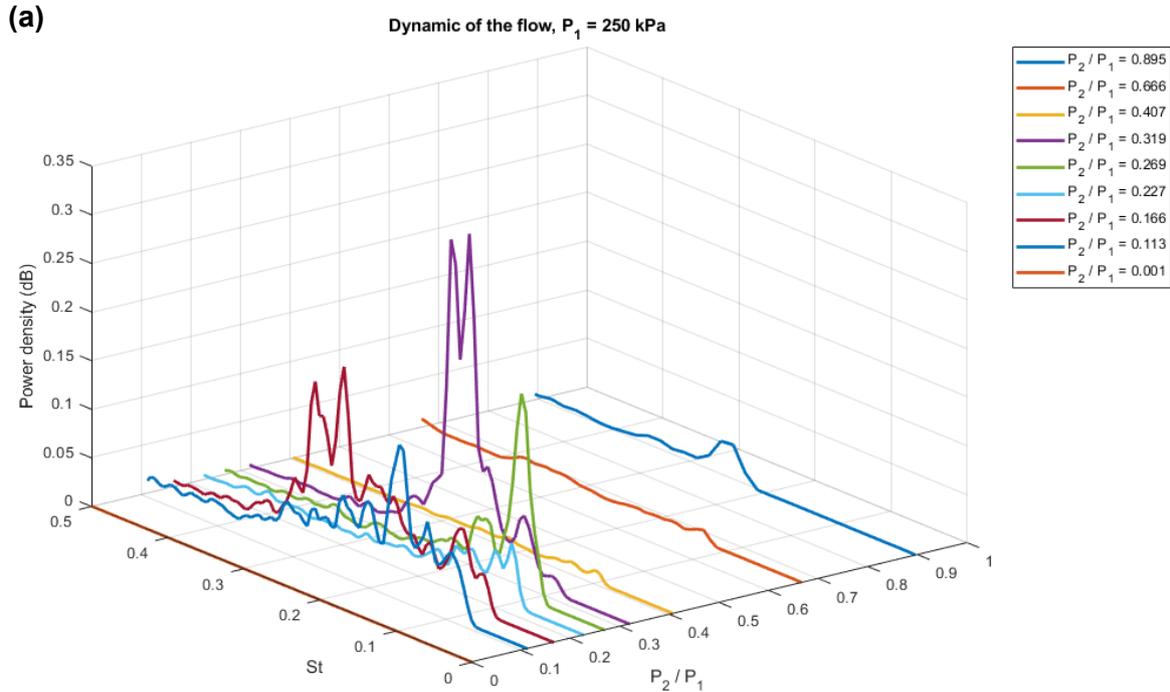
En la imagen anterior la relación de presión crítica se define como P_1/P_2 y verifica lo acabado de comentar acerca de que, para un determinado valor de la relación de contracción, cuanto mayor es el espesor relativo, menor es dicha relación (mayor P_2/P_1) y mayor el número de cavitación por lo que el inicio de la cavitación se adelanta. A. Simpson [19] apunta a que la razón de esto es que un aumento en la relación L/d tiene el efecto de retrasar la recuperación de la presión, ya que la extensión de la región de baja presión es mayor, de tal forma que la extensión de las cavidades de vapor también es mayor por estar sometidas a esas condiciones durante más tiempo. Esto, junto con la reducción paulatina de la presión aguas abajo, propicia el alcance de la condición de flujo bloqueado antes que en otra placa de orificio con igual β y menor L/d .

Además, otro parámetro geométrico que también influye y al que también se debe la diferencia entre los resultados de esta investigación y la de B. Ebrahimi et al. [10] es el chaflán en la cara aguas abajo de la placa de orificio. Mientras que las empleadas en el presente trabajo tienen un bisel de 45° , la otra carece de bisel y su acabado es recto, lo cual hace que el flujo se desprenda con más facilidad de la pared del orificio por lo que la cavitación se produce más fácilmente; sin embargo, si el orificio presenta bisel, la trayectoria del flujo es más suave y menor es la formación de burbujas de vapor por lo que la extensión de la cavitación también lo es, tal como describe T. S. Koivula [7].

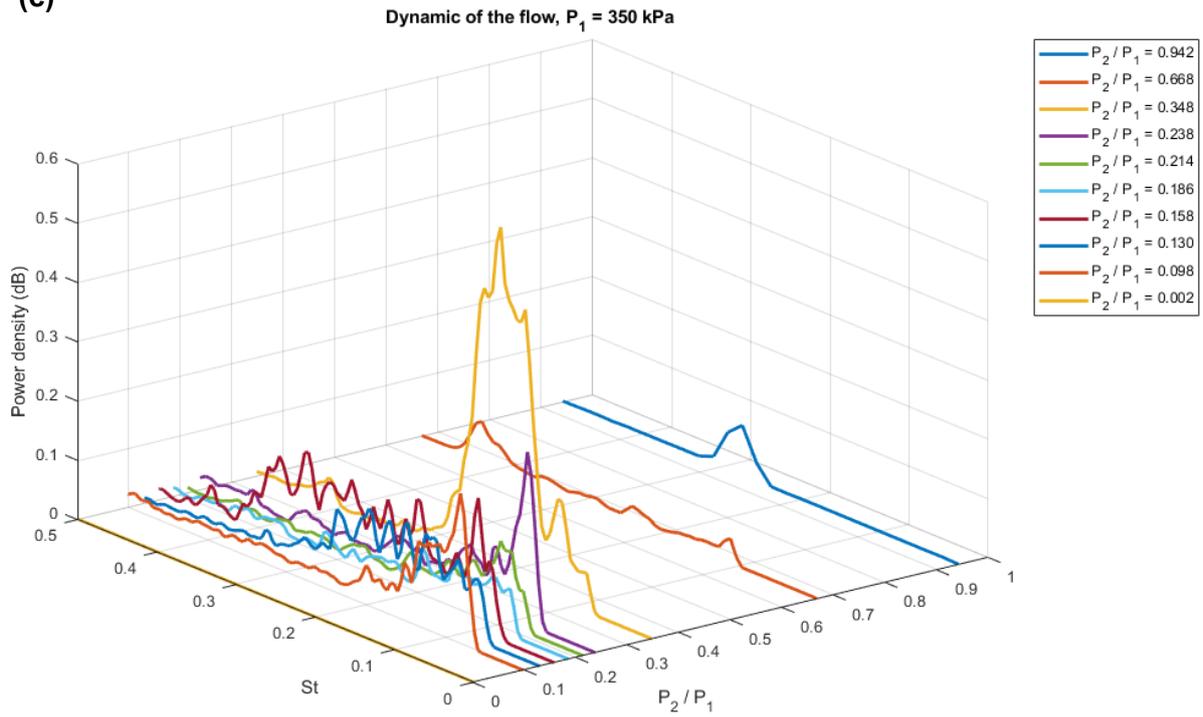
Los motivos comentados en los párrafos anteriores con relación al espesor relativo y el chaflán de las placas de orificio, son las razones por las que la condición de flujo bloqueado se alcanza antes en la investigación de B. Ebrahimi et al. [10] que en la actual a pesar de que el valor de la relación de contracción es inferior en la primera, lo cual hacía pensar que tal condición se retrasaría.

7.2 Dinámica del flujo

Contribuyendo a la caracterización del flujo, se ha llevado a cabo un estudio dinámico del mismo para la placa de orificio con $\beta = 0,3$, para lo que se ha utilizado un transductor de presión no estacionario aguas abajo de la placa de orificio. Los resultados se presentan en las figuras adjuntas, en las cuales se distinguen cuatro casos (uno por cada valor de presión aguas arriba) y en cada uno se presenta la representación tridimensional $P_2/P_1 - St - Power\ density$.



(c)



(d)

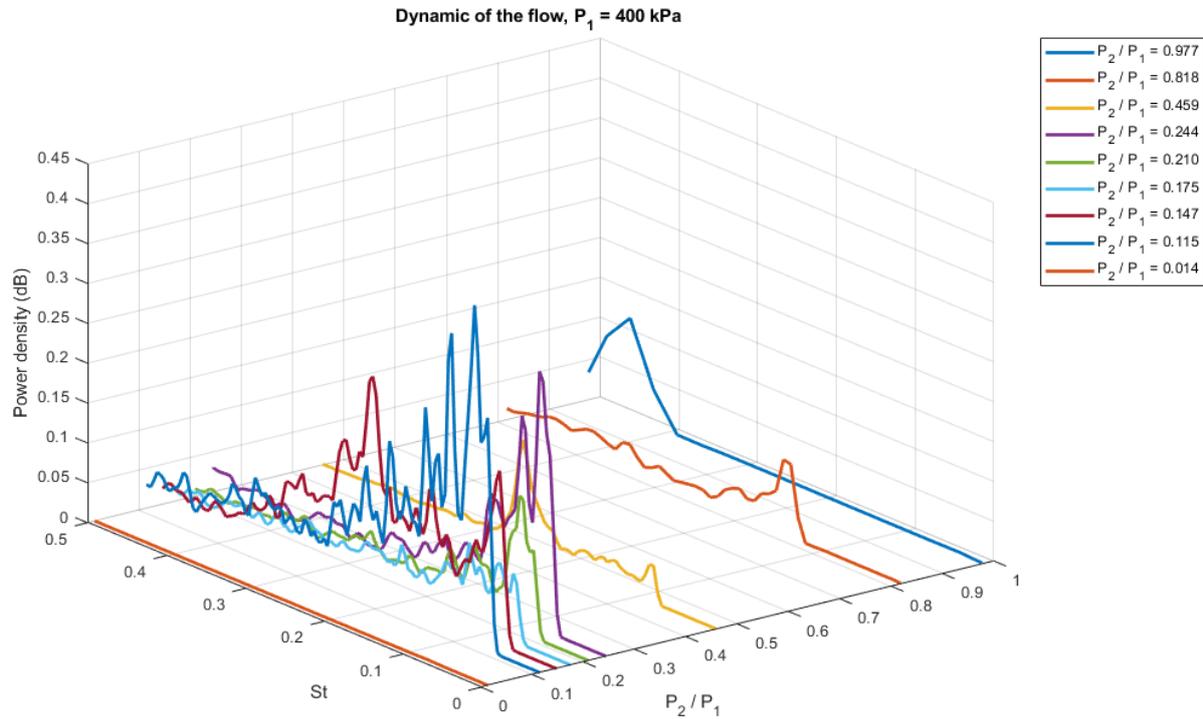


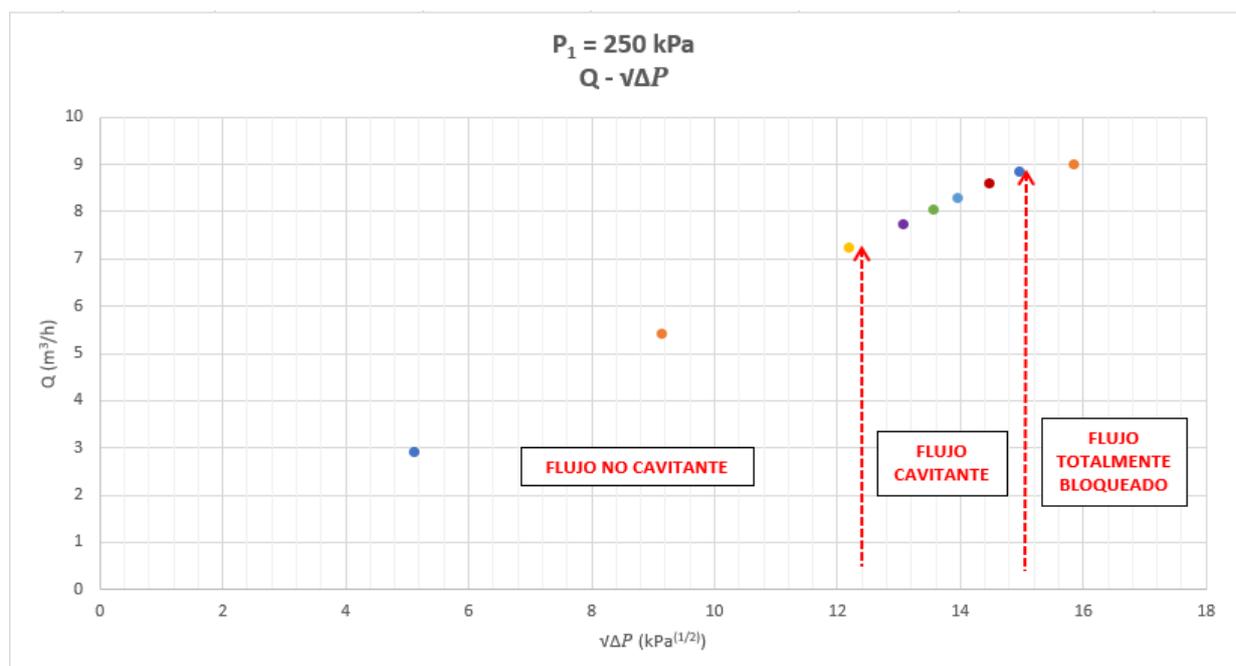
Figura 100 Dinámica del flujo y curva $Q - \sqrt{\Delta P}$ correspondiente a una presión aguas arriba igual a: (a) 250 kPa, (b) 300 kPa, (c) 350 kPa, (d) 400 kPa.

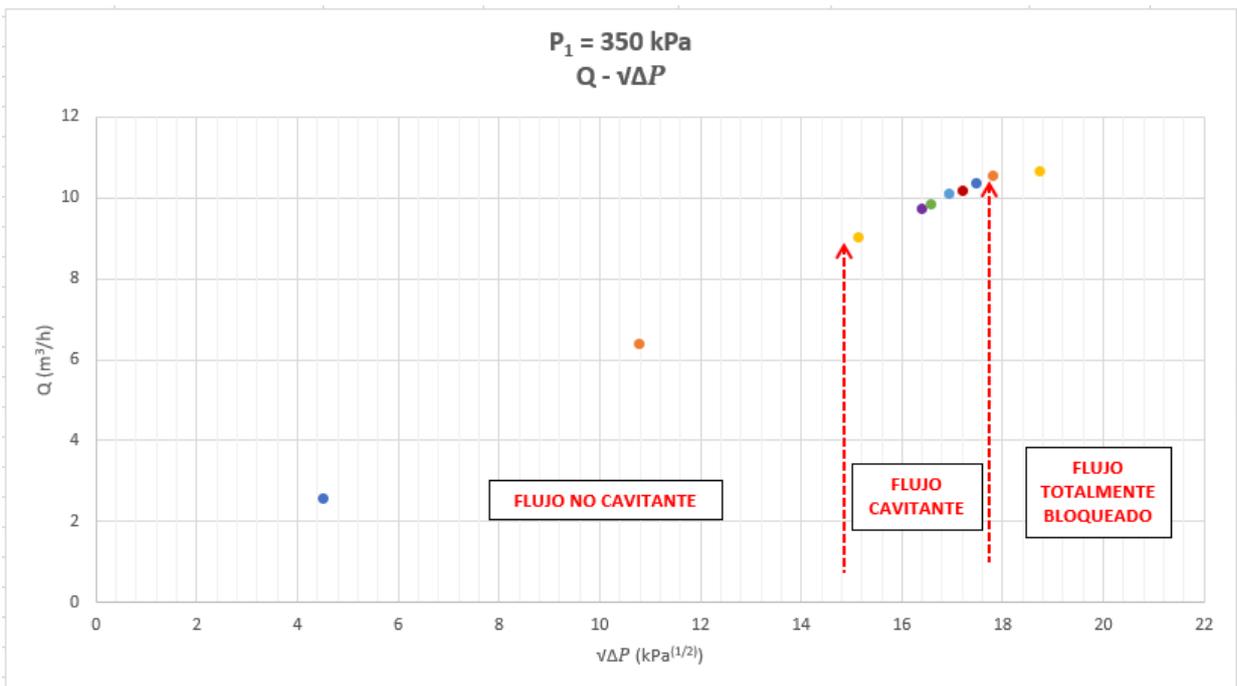
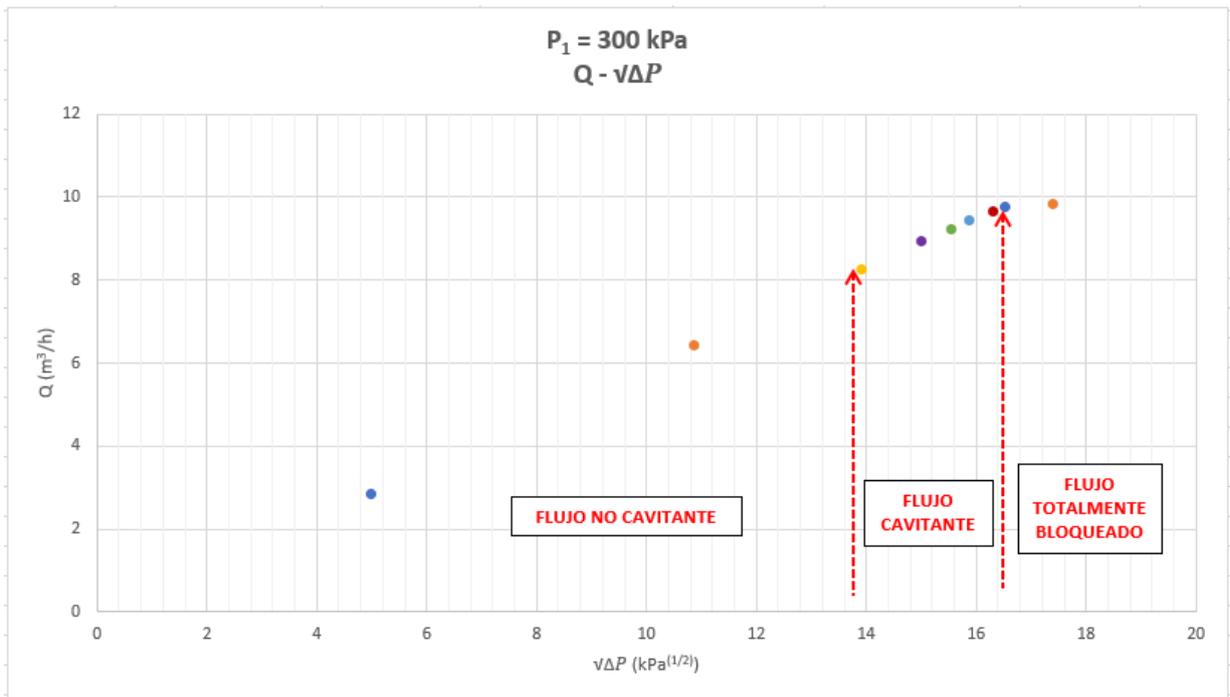
Los resultados muestran que una vez empieza a tener lugar la cavitación, el espectro se vuelve más energético, mientras que cuando el flujo se encuentra totalmente bloqueado, lo

cual para una placa de orificio con $\beta = 0,3$ ocurre a una relación de presión inferior a 0,1 (valor obtenido en el experimento anterior), la dinámica observable no es significativa, tal y como se muestra en la gráfica con un espectro plano. Esto, que evidencia lo observado en la instalación experimental durante el transcurso de los experimentos que componen el presente proyecto acerca de la ausencia de vibración con flujo no cavitante, la aparición de la misma cuando el flujo comienza a cavitarse y su cese cuando se bloquea totalmente, concuerda también con lo expuesto en la figura 42. Por tanto, resulta evidente que, para la aparición de vibraciones, es más crítico trabajar con una placa de orificio parcialmente bloqueada que bajo la condición de flujo totalmente bloqueado.

Además, dado el característico comportamiento del flujo ante la presencia de cavitación, es posible estimar el valor de la relación de presión, P_2/P_1 , a la que dicho fenómeno se inicia, observándose que esto ocurre aproximadamente para un mismo valor de P_2/P_1 independientemente del valor de presión aguas arriba, lo que demuestra la ausencia de efectos de escala de presión en la cavitación incipiente. Considerando esto, se estima que el inicio del fenómeno de cavitación para una placa de orificio con $\beta = 0,3$ ocurre a una relación de presión comprendida en el rango 0,35 – 0,40. Para poder especificar un valor más concreto sería necesaria la obtención de más datos en dicho rango para ser capaces de observar con mayor detalle el cambio en el comportamiento del flujo. Cabe mencionar que, aunque para el caso de $P_1 = 400 \text{ kPa}$ no se han obtenido datos en ese rango de P_2/P_1 , debido a la mencionada ausencia de efectos de escala de presión, es posible establecer tal afirmación. Asimismo, se observa también que, cuando el flujo comienza a cavitarse, los máximos picos correspondientes a los espectros de frecuencia tienen lugar a un número de Strouhal en el rango 0,21 – 0,26, concordando con lo expuesto por P. Testud en su artículo [20] donde obtuvo unos valores entre 0,18 y 0,26, por lo que esto dota de veracidad a los resultados obtenidos.

Por otro lado, teniendo en cuenta la relación de presión a la que el flujo comienza a cavitarse (0,35 – 0,40) y a la que se alcanza la condición de flujo bloqueado (0,1) es posible identificar en la curva característica $Q - \sqrt{\Delta P}$, asociada a cada valor de presión aguas arriba, la zona de trabajo sin cavitación y con ella gracias a que cada punto discreto de dicha gráfica lleva el color de la curva tridimensional a la que está asociada. Esto, que se muestra en las siguientes figuras, es de especial importancia debido a los efectos negativos que la cavitación conlleva y la criticidad que tiene trabajar con una placa de orificio parcialmente bloqueada, como se acaba de comentar.





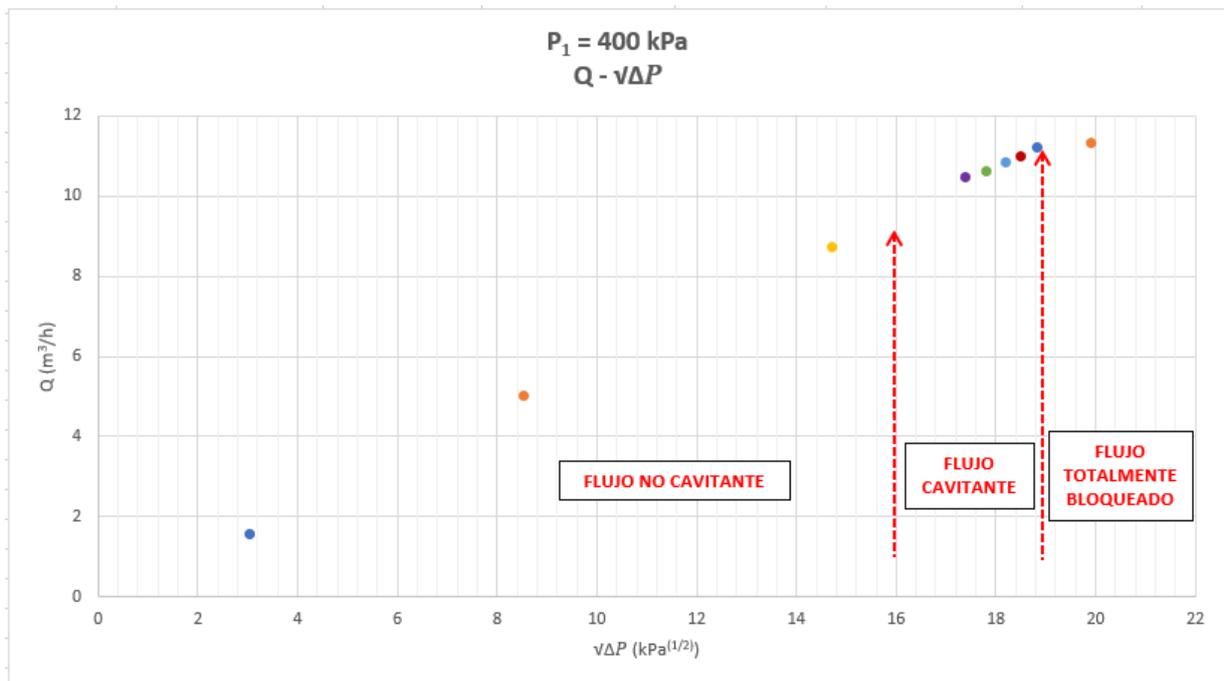


Figura 101 Identificación de las zonas de trabajo para la placa de orificio con $\beta = 0,3$.

7.3 Ecuación $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{crit} = f(\beta)$

En esta última parte de la sección de resultados se proporciona una ecuación que permita una estimación de la relación de presión crítica en función del parámetro geométrico con más influencia en el fenómeno de cavitación, la relación de contracción. Para este fin, se han recopilado los datos proporcionados por la literatura existente de la forma descrita en el apartado 6.3. Esto ha permitido crear una completa base de datos de placas de orificio delgadas con un único orificio con D entre 27,5 mm y 305 mm y β entre 0,297 y 0,884. Además, también se verifica que los resultados obtenidos en esta investigación, acerca de la relación de presión crítica, se corresponden con los publicados en la literatura y, por tanto, con la ecuación propuesta.

Las siguientes tablas recopilan la base de datos con la que se ha trabajado para la consecución del objetivo descrito.

Tullis - 1973 [6]		
D (mm)	β	$(P_2/P_1)_{crit}$
27,5	0,386	0,175
78	0,380	0,216
	0,489	0,283
	0,651	0,405
	0,782	0,626
	0,381	0,173

Tullis - 1993 [9]		
D (mm)	β	$(P_2/P_1)_{crit}$
76,2	0,389	0,216
	0,444	0,245
	0,500	0,283
	0,667	0,428
	0,800	0,642

	0,493	0,270
	0,658	0,450
	0,787	0,632
	0,884	0,818
305	0,381	0,168

Testud - 2007 [20]		
D (mm)	β	$(P_2/P_1)_{crit}$
74	0,297	0,131

Tabla 20 Base de datos empleada.

Representando los datos de la relación de presión crítica, $(P_2/P_1)_{crit}$, frente a la relación de contracción, β , se obtiene la gráfica presentada en la figura 102, en la cual se ha aplicado una regresión cúbica.

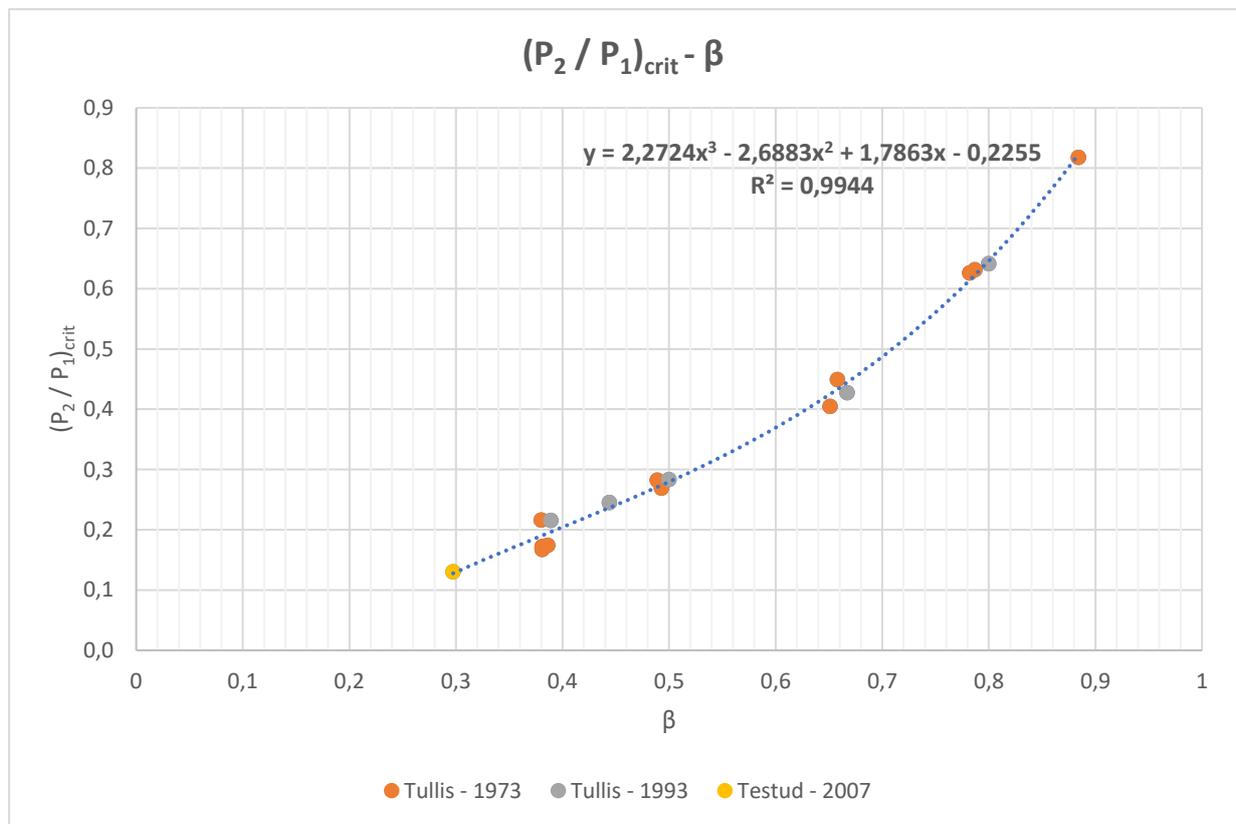


Figura 102 Tendencia de la relación de presión crítica, $(P_2/P_1)_{crit}$, frente a la relación de contracción, β .

Como puede verse en la representación anterior, independientemente del diámetro de la tubería de la sección de ensayos y las condiciones de presión a la entrada, las relaciones de presión crítica obtenidas para un valor dado de la relación de diámetros son coherentes entre sí. Esto se traduce en la ausencia de los efectos de escala de tamaño y presión en la cavitación por asfixia comentada a lo largo del presente trabajo. Además, se aprecia la tendencia comentada anteriormente acerca de que un aumento en la relación de contracción da lugar a un aumento en la relación de presión crítica y, por tanto, a un adelanto en el alcance del bloqueo del flujo. Esto también sirve para demostrar la coherencia de los resultados obtenidos con los de la literatura dando fiabilidad a lo que se ha expuesto.

Por tanto, tal y como ya se presenta en la propia figura 102, gracias a los datos publicados en la literatura, se propone una expresión polinómica de tercer orden para predecir el inicio de la condición de flujo bloqueado en una placa de orificio. Esta se reproduce a continuación:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{crit} = 2,2724 \beta^3 - 2,6883 \beta^2 + 1,7863 \beta - 0,2255 \quad (ec. 70)$$

Dicha ecuación es aplicable a placas de orificio delgadas con un solo orificio y una relación de contracción comprendida en el rango $0,297 \leq \beta \leq 0,884$.

Se observa el buen grado de ajuste entre la ecuación propuesta y los puntos representados gracias a la gran cercanía del coeficiente de determinación R^2 con la unidad.

Además, en la tabla 21 se recogen los valores de la relación de presión crítica obtenidos en la presente investigación y, en la figura adjunta a continuación, se representan dichos valores sobre la gráfica presentada en la figura 102.

Instalación CIT - EPS		
D (mm)	β	$(P_2/P_1)_{crit}$
50	0,3	0,1
	0,5	0,25

Tabla 21 Resultados de la relación de presión crítica obtenidos experimentalmente.

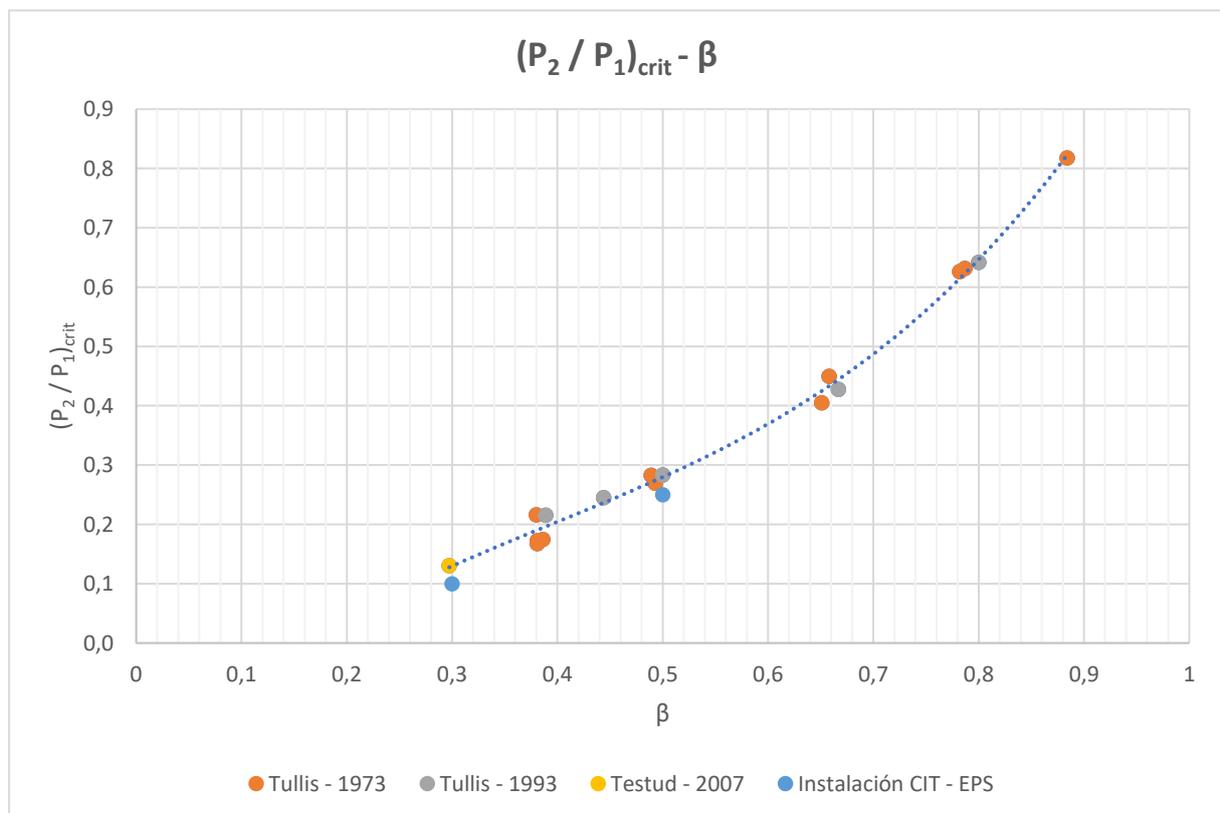


Figura 103 Comprobación de la coherencia entre los resultados experimentales y los presentados por la literatura.

Puede verse que los resultados obtenidos experimentalmente se corresponden con lo publicado en la literatura, lo cual resulta evidente gracias a su proximidad con la línea de tendencia que define la ecuación que se propone. La pequeña diferencia existente puede deberse a la influencia que pueda tener la variación en el contenido de gas disuelto, en la densidad o en la viscosidad del fluido de trabajo entre unas investigaciones y otras.

Por tanto, esto permite demostrar, una vez más, la veracidad de los resultados obtenidos en el actual estudio, así como dotar de fiabilidad a la ecuación propuesta.

8 CONCLUSIONES

En este epígrafe se exponen las conclusiones obtenidas una vez finalizado el presente trabajo de investigación. Asimismo, también se proponen nuevas líneas de estudio a desarrollar en un futuro como una continuación de la actual investigación.

Se ha conseguido modificar la sección de pruebas del banco de ensayos hidráulicos en el que se ha trabajado. Para ello, ha sido necesario sustituir la válvula de mariposa tipo wafer sin bridas que estaba instalada por un conjunto de placa de orificio compuesto por: una placa de orificio, dos bridas de alojamiento y tres juntas tóricas. Por otro lado, previamente a la obtención de los resultados finales, se llevaron a cabo una serie de ensayos de prueba con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de la instalación, así como de los sensores y el sistema de adquisición de datos de los que dispone. También se logró con éxito la incorporación a la instalación de un nuevo sensor, un transductor de presión no estacionario, con la consiguiente modificación en el código de MATLAB y en la interfaz gráfica de usuario (GUI) empleados para su adecuación a la nueva situación, posibilitando así la medición de los datos deseados en ese momento. De esta forma, se verificó en todo momento la concordancia entre el programa informático de MATLAB y la instalación hidráulica siempre que se introdujo una modificación, además del cumplimiento de la normativa por parte de la instalación y sus elementos. Por tanto, es posible afirmar que se dispone de un banco de ensayos hidráulicos validado para su utilización.

Esto último se ha visto reflejado tanto en la correspondencia observada entre los resultados de la actual investigación y los presentados en la literatura como en el bajo error de los datos obtenidos, lo cual dota de fiabilidad y veracidad a los resultados y conclusiones expuestas.

Respecto al principal objetivo del estudio experimental, ha sido posible caracterizar el flujo a través de una placa de orificio gracias al estudio dinámico efectuado y a la representación de las curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$ y $Q - P_2/P_1$. Ambas curvas han permitido determinar la condición de flujo bloqueado, especialmente la segunda, gracias a la cual se han obtenido unos valores para la relación de presión crítica de 0,1 para la placa de orificio con $\beta = 0,3$ y de 0,25 para la de $\beta = 0,5$. De esto se concluye que cuanto menor es la relación de contracción de una placa de orificio, más se retrasa el inicio de la cavitación por asfixia y, por tanto, el bloqueo del flujo.

Por otra parte, gracias al estudio dinámico del flujo, y junto con el conocimiento de la relación de presión crítica, ha sido posible identificar las distintas zonas de trabajo (sin cavitación, con cavitación y flujo totalmente bloqueado), concluyéndose que resulta más crítico trabajar con una placa de orificio parcialmente bloqueada (cavitando) que con ella bajo la condición de flujo totalmente bloqueado. Esto es debido a que, mientras en la primera situación la instalación sufre grandes vibraciones, la segunda se caracteriza por la ausencia de las mismas. Lo acabado de comentar resalta la importancia de esta forma de estudio debido a la mucha información que es posible obtener de él. Sin embargo, en el presente trabajo únicamente se ha llevado a cabo para la placa de orificio con $\beta = 0,3$, por lo que se propone para un futuro realizar el estudio dinámico del flujo para la otra placa de orificio empleada, así como disponer de más, con la intención de poder identificar también sus zonas de trabajo, especialmente el límite entre flujo no cavitante y flujo cavitante puesto que la identificación de la condición de flujo bloqueado ya se ha podido efectuar a través de las curvas características.

De lo que se ha comentado se deduce que resulta imprescindible caracterizar el flujo en sistemas hidráulicos para evitar la cavitación en aquellas aplicaciones en las que su presencia no está permitida, para lo que se sugiere mantener un nivel suficientemente alto en la relación P_2/P_1 , o para proteger las partes de la instalación hidráulica más susceptibles a la aparición de este fenómeno con la intención de reducir los daños ocasionados. Esto último se hace debido a lo negativo que resulta trabajar con una placa de orificio bajo condiciones cavitantes, como se ha mencionado.

También se ha podido verificar la ausencia de efectos de escala de presión, ya que independientemente del valor de presión aguas arriba, el valor de la relación de presión crítica no cambia para una misma placa de orificio. Esto, junto con el apoyo de la literatura, permite afirmar que el parámetro con más influencia en la condición de flujo bloqueado es un parámetro geométrico de las placas de orificio: la relación de contracción. Por este motivo, se propone una correlación (ecuación 70) que relaciona la relación de presión crítica con ese parámetro. Dicha ecuación proporciona una predicción fiable del inicio de la cavitación por asfixia en una placa de orificio y es aplicable a una amplia gama de placas de orificio delgadas. En concreto es válida para relaciones de contracción entre 0,297 y 0,884 de manera que prácticamente abarca la totalidad del rango señalado por la norma para dicha relación.

Además, consultando la literatura existente se ha visto que la diferencia en el comportamiento del flujo entre una placa de orificio delgada y gruesa, es decir, el espesor relativo, tiene también cierta influencia en el inicio del bloqueo del flujo, de ahí que la ecuación propuesta únicamente sea aplicable para placas de orificio delgadas, pues son las que se han empleado en la presente investigación y en las investigaciones de las bases de datos utilizadas. A pesar de que en este estudio experimental se ha analizado teóricamente la influencia del espesor relativo en la cavitación y, en particular, en la condición de flujo bloqueado, se propone como una futura línea de investigación la caracterización del flujo a través de una placa de orificio gruesa y su comparación con el trabajo actual, con especial atención en los valores de la relación de presión crítica. Otra posible línea de investigación podría ser realizar una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los que se obtendrían a través de un estudio CFD (Computational Fluid Dynamics), sin olvidarse de la propuesta en el apartado *Curvas características $Q - \sqrt{\Delta P}$* acerca de la determinación del margen límite que indica cuán preciso se debe ser sobre el valor de presión aguas arriba en la realización de un ensayo para que la caracterización de la placa de orificio no se vea afectada.

En definitiva, gracias a los experimentos llevados a cabo ha sido posible caracterizar el flujo a través de las placas de orificio empleadas, obteniendo unos resultados satisfactorios debido a la similitud con otros estudios experimentales y numéricos, así como proporcionar más información a la literatura existente contribuyendo, por tanto, al estudio del fenómeno de cavitación en placas de orificio.

En cuanto a lo personal, este trabajo me ha permitido poner en práctica y ampliar muchos de los conocimientos adquiridos durante el grado, por ejemplo, los relacionados con la mecánica de fluidos, las máquinas hidráulicas y la programación en MATLAB. Pero también me ha dotado de nuevos conocimientos como la instalación, calibración y tratamiento de sensores y la adquisición y análisis de datos, además de permitirme llevar el control de una instalación hidráulica y sistemas de vacío. Asimismo, gracias a la realización de un trabajo de investigación he podido conocer la metodología seguida en el método científico.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Castro, C. Méndez, M. T. Parra, y J. M. Villafruela, «Apuntes de Máquinas Hidráulicas. Universidad de Valladolid», p. 9.
- [2] «Apuntes de Mecánica de Fluidos. Escuela Politécnica Superior, Universidade da Coruña».
- [3] A. M. Domingo, «Apuntes de Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Madrid», p. 113.
- [4] «Basics of Orifice Plates», *Inst Tools*, ene. 04, 2018. <https://instrumentationtools.com/orifice-plates/> (accedido ago. 24, 2021).
- [5] P. Lau, «Calculation of flow rate from differential pressure devices – orifice plates», p. 26.
- [6] J. P. Tullis y R. Govindarajan, «Cavitation and size scale effects for orifices», *Hydraulics Division*, pp. 417-430, mar. 1973.
- [7] T. S. Koivula y A. U. Ellman, «Cavitation Behaviour of Hydraulic Orifices and Valves», *SAE Transactions*, vol. 107, pp. 387-394, 1998.
- [8] K. Takahashi, H. Matsuda, y H. Miyamoto, «Cavitation characteristics of restriction orifices», p. 8.
- [9] J. P. Tullis, «Cavitation guide for control valves», NUREG/CR--6031, 10155405, abr. 1993. doi: 10.2172/10155405.
- [10] B. Ebrahimi *et al.*, «Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section», *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 114, pp. 229-240, abr. 2017, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.01.001.
- [11] N. J. F. P. G. Adam, «Characterization of hydraulic behavior of orifices in conduits», p. 248.
- [12] P. M. Kanthale, P. R. Gogate, A. B. Pandit, y A. M. Wilhelm, «Dynamics of cavitational bubbles and design of a hydrodynamic cavitational reactor: cluster approach», *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 12, n.º 6, pp. 441-452, ago. 2005, doi: 10.1016/j.ultsonch.2004.05.017.
- [13] P. Rudolf, D. Kubina, J. Kozák, M. Hudec, y F. Pochylý, «Dynamics of the cavitating flow downstream of the orifice plate», Pilsen, Czech Republic, 2017, p. 020033. doi: 10.1063/1.5004367.
- [14] «Estudio y validación de modelos de cavitación en un código de Mecánica de Fluidos Computacional». Accedido: ago. 11, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/16435/Memoria.pdf>
- [15] A. S. Morris y R. Langari, «Flow Measurement», en *Measurement and Instrumentation*, Elsevier, 2016, pp. 493-529. doi: 10.1016/B978-0-12-800884-3.00016-2.
- [16] «Hoja técnica WIKA FL 10.01». Accedido: ago. 13, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.wika.com.mx/upload/DS_FL1001_es_es_89341.pdf
- [17] «M410 Orifice Plate Assemblies Installation and Maintenance Instructions», n.º 3, p. 8.
- [18] V. S. Moholkar y A. B. Pandit, «Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach», *Chemical Engineering Science*, vol. 56, n.º 21-22, pp. 6295-6302, nov. 2001, doi: 10.1016/S0009-2509(01)00253-6.

- [19] A. Simpson y V. V. Ranade, «Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs», *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 136, pp. 698-711, ago. 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2018.06.014.
- [20] P. Testud, P. Moussou, A. Hirschberg, y Y. Aurégan, «Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe», *Journal of Fluids and Structures*, vol. 23, n.º 2, pp. 163-189, feb. 2007, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2006.08.010.
- [21] «Norma ANSI/ISA-75.02:2008». 2008.
- [22] «Norma ASME PTC 19.1-2005». 2005.
- [23] «Norma IEC EN 60534-2-3:2016». 2016.
- [24] «Norma UNE-EN ISO 5167-1:2003». 2003.
- [25] «Norma UNE-EN ISO 5167-2:2003». 2003.
- [26] S. Malavasi, G. V. Messa, U. Fratino, y A. Pagano, «On cavitation occurrence in perforated plates», *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 41, pp. 129-139, mar. 2015, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.11.002.
- [27] «Placa orificio», *facultad-ingenieria*. <https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/copia-de-placa-orificio> (accedido ago. 13, 2021).
- [28] «Sistemas de adquisición y Procesamiento de datos. Universidad de Alicante». Accedido: ago. 16, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19119/1/Sistemas%20de%20adquisici%C3%B3n%20y%20Procesamiento%20de%20datos.pdf>
- [29] «What Is Data Acquisition - DAQ [Ultimate Guide] | Dewesoft». <https://dewesoft.com/daq/what-is-data-acquisition> (accedido ago. 20, 2021).
- [30] «White Paper - Fundamentals of orifice meter measurement-daniel-en-43736.pdf». Accedido: ago. 14, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-fundamentals-of-orifice-meter-measurement-daniel-en-43736.pdf>



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2020/21**

*CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN PLACA DE
ORIFICIO*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Documento II

ANEXOS

ÍNDICE

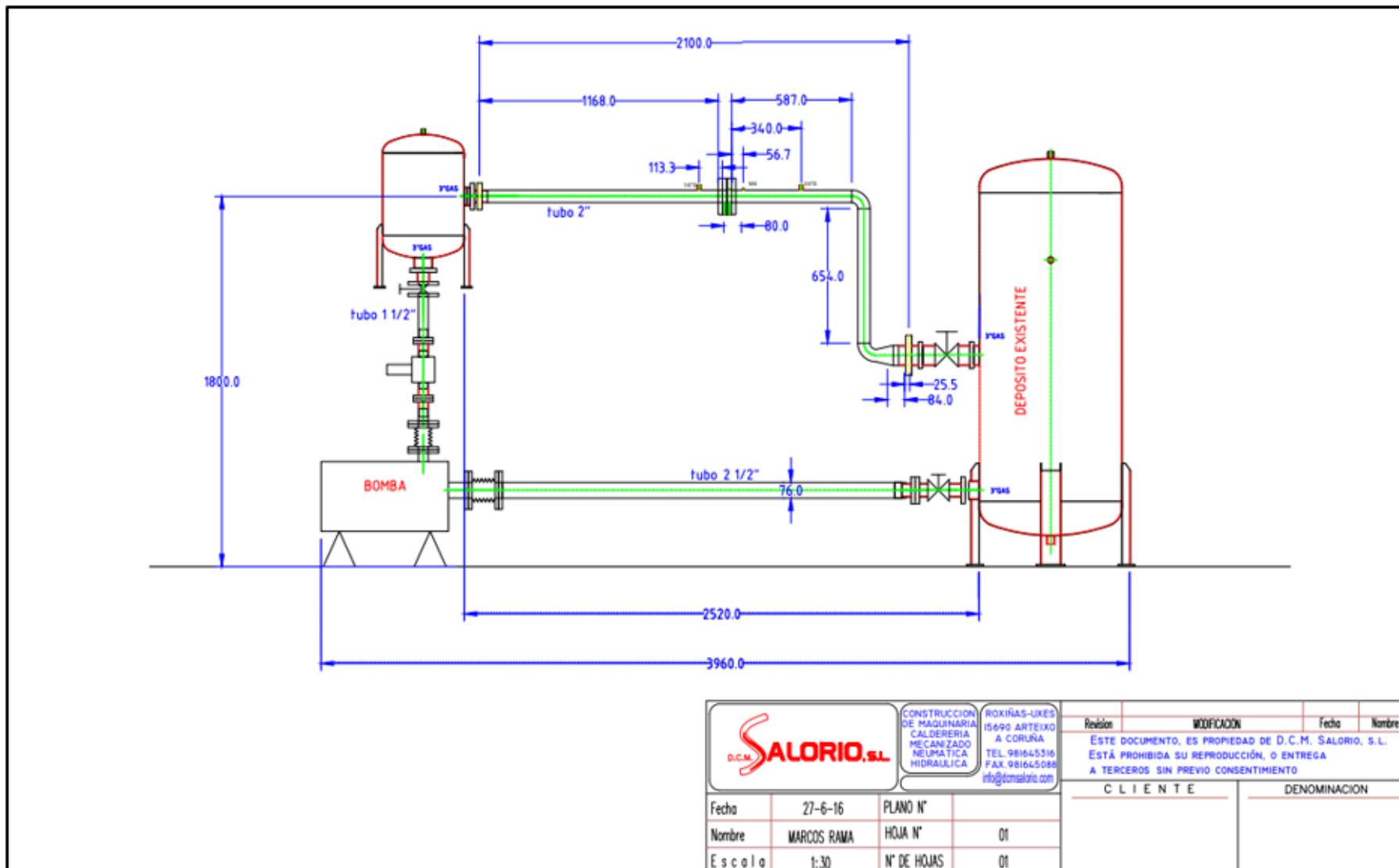
1 Anexo A: Planos	145
1.1 Plano 1: Banco de ensayos hidráulicos del CIT	146
1.2 Plano 2: Conjunto de placa de orificio	147
2 Anexo B: Programa informático en MATLAB.....	148
3 Anexo C: Interfaz gráfica de usuario (GUI).....	164
4 Anexo D: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,5$	166
5 Anexo E: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,3$	174
6 Anexo F: Dinámica del flujo. Datos obtenidos en los ensayos por los transductores estacionarios	178
7 Anexo G: Cálculo de las relaciones de presión crítica	181

1 ANEXO A: PLANOS

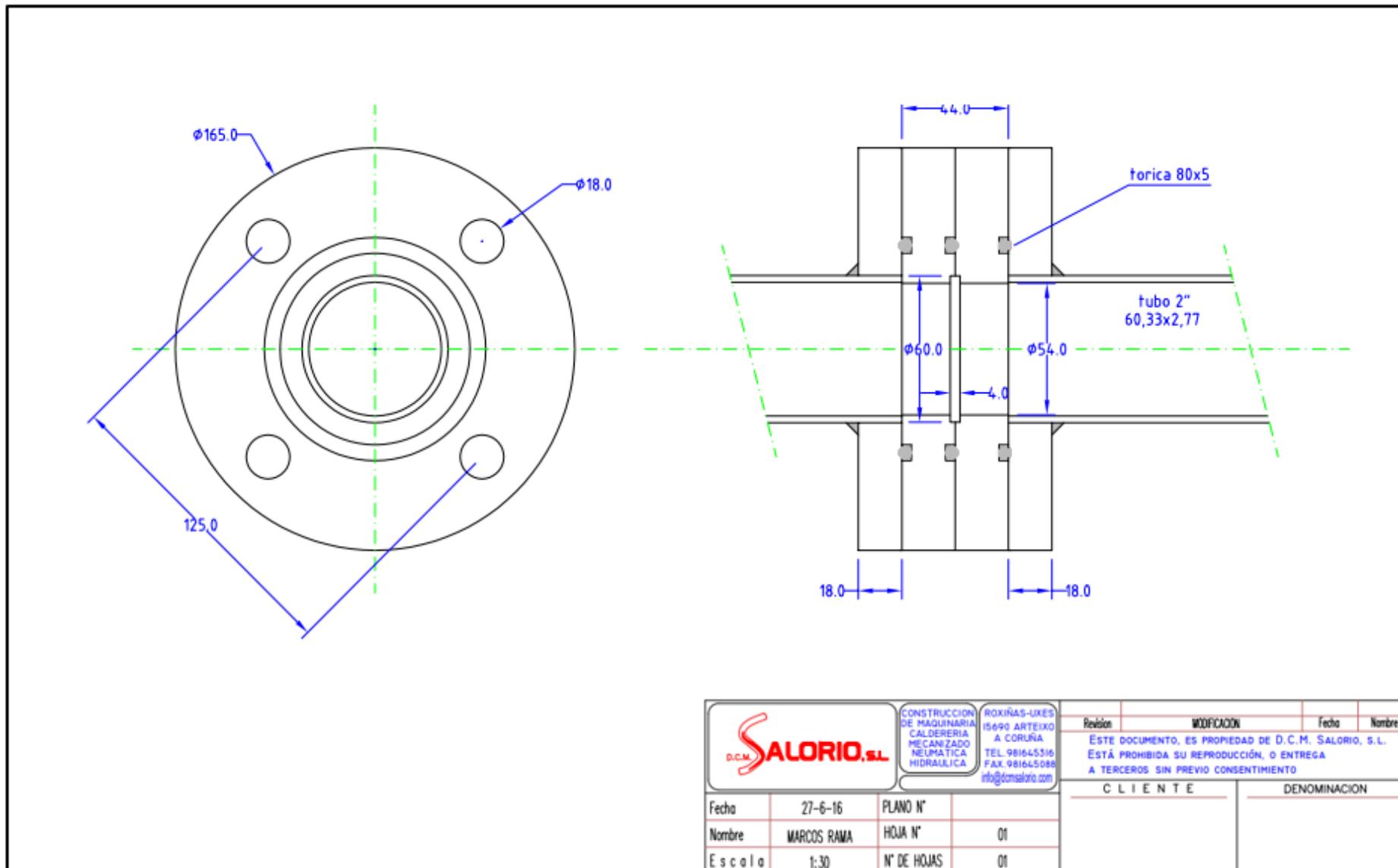
Este anexo recoge los planos a los que se ha hecho referencia en el documento anterior de memoria. Dichos planos son los siguientes:

1. Plano del banco de ensayos hidráulicos del Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIT) de Ferrol, en el Campus de Esteiro.
2. Plano del conjunto de placa de orificio instalado en la sección de ensayos.
El conjunto mencionado es el que se observa en la zona derecha del plano, mientras que a la izquierda se representa el diseño de uno de los porta placa entre los que está alojada la placa de orificio propiamente dicha.

1.1 Plano 1: Banco de ensayos hidráulicos del CIT



1.2 Plano 2: Conjunto de placa de orificio



2 ANEXO B: PROGRAMA INFORMÁTICO EN MATLAB

```
function varargout = TFG_GUI(varargin)
% TFG_GUI MATLAB code for TFG_GUI.fig
%   TFG_GUI, by itself, creates a new TFG_GUI or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = TFG_GUI returns the handle to a new TFG_GUI or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   TFG_GUI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in TFG_GUI.M with the given input arguments.
%
%   TFG_GUI('Property','Value',...) creates a new TFG_GUI or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before TFG_GUI_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to TFG_GUI_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help TFG_GUI

% Last Modified by GUIDE v2.5 07-Jul-2021 13:26:25

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @TFG_GUI_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @TFG_GUI_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
```

```
% --- Executes just before TFG_GUI is made visible.
function TFG_GUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to TFG_GUI (see VARARGIN)

% Choose default command line output for TFG_GUI
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes TFG_GUI wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
addpath('C:\Users\cavitacion\Desktop\TFG_Patricia\MATLAB\Functions')
addpath('C:\Users\cavitacion\Desktop\TFG_Patricia\MATLAB\GUI_OP')

% Titulo de la grafica y de los ejes
title(handles.axes8, 'Q-raiz(dP)');
xlabel(handles.axes8, 'raizDeltaP [(kPa)^1/2]');
ylabel(handles.axes8, 'Q[m3/h]');
%Titulo grafica Tliquid-Q y de los ejes
title(handles.axes9, 'T liquid - Q');
xlabel(handles.axes9, 'Q[m3/h]');
ylabel(handles.axes9, 'T[°C]');

%Titulo grafica Tliquid-Q y de los ejes
title(handles.axes10, 'P liquid');
xlabel(handles.axes10, 't[s]');
ylabel(handles.axes10, 'P[kPa]');

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = TFG_GUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes when uibuttongroup1 is resized.
function uibuttongroup1_SizeChangedFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to uibuttongroup1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton_start.
function pushbutton_start_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton_start (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% hObject    handle to togglebutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton1

handles.stop_now = 0;
handles.writedata = 0;
guidata(hObject,handles);
fid =
fopen('C:\Users\cavitacion\Desktop\TFG_Patricia\MATLAB\TEST_DATA\test_data.txt','
at') ;
fprintf(fid,'%s\n',"Q[m3/h]"      "DeltaP[kPa]"      "raizDeltaP"      "Pt_up[kPa]"
"Pt_down[kPa]"  "Ps_up[kPa]"      "Ps_down[kPa]"  "P_tanks[kPa]"  "T_liquid[C]"
"T_amb[C]"      "Kv");
fclose(fid);

fid =
fopen('C:\Users\cavitacion\Desktop\TFG_Patricia\MATLAB\TEST_DATA\test_data_P_unst
eady.txt','at') ;
fprintf(fid,'%s\n',"t[s]"      "P[kPa]");
fclose(fid);

while ~(handles.stop_now)

    %tic,
    % Transducer temperature

    if (get(handles.checkboxT,'Value') == get(handles.checkboxT,'Max'))

        [data_ave]=acquisition_T();
        temp_liquids = num2str(data_ave(1));
        temp_ambs = num2str(data_ave(2));

        set(handles.T_liquid,'String', temp_liquids);
        set(handles.T_atm,'String', temp_ambs);
    end
    %Transducer pressure

    % if (get(handles.radiobutton3,'Value') == get(handles.radiobutton3,'Max'))
    sampling_rate=str2num(get(handles.frecuencyp, 'String'));
    sampling_time=str2num(get(handles.timep, 'String'));

    if isnan(sampling_rate)
        sampling_rate=1000;
    end
    if isnan(sampling_time)
        sampling_time=1;
    end
end
```

```
P_sampling_rate=str2num(get(handles.edit87, 'String'));
P_sampling_time=str2num(get(handles.edit88, 'String'));

if isnan(P_sampling_rate)
    P_sampling_rate=20000;
end
if isnan(P_sampling_time)
    P_sampling_time=1;
end

% [data_ave_voltage]=acquisition_P(sampling_rate,sampling_time);
% data_ave_voltage
% data_ave_voltage(1);%=40.07757*data_ave(1)+98.574761;
% data_ave_voltage(2);%=9.7393682*data_ave(3)+0.3368127;

s=daq.createSession('ni');
s.addAnalogInputChannel('cDAQ2Mod1',0,'Voltage'); %P_up
s.addAnalogInputChannel('cDAQ2Mod1',1,'Voltage'); %P_tank
s.addAnalogInputChannel('cDAQ2Mod3',0,'Current'); %Q
s.addAnalogInputChannel('cDAQ2Mod3',1,'Current'); %P_down
s.Rate=sampling_rate;
s.DurationInSeconds=sampling_time;
data=s.startForeground;

for i=1:4
    data_ave(i)=mean(data(:,i));
end

clear s;

data_ave(1)=40.07757*data_ave(1)+98.574761; %P_up
data_ave(2)=9.7393682*data_ave(2)+0.3368127; %P_tank
data_ave(3)=3.31875*data_ave(3)*1000-13.275; %Q
if data_ave(3)< 1 % Minimum value is 0,9
    data_ave(3) = 0;
end

%data_ave(4)=37500*data_ave(4)-150; %Transductor rango -1:5 bar (rel)
%Esta presión se mide con el transductor en intensidad
%P_down
data_ave(4)=62500*data_ave(4)-250; %Transductor rango -1:9 bar (rel)

V1=(data_ave(3)/3600)/(pi()*(0.05476/2)^2); % CAMBIAR DIAMETRO TUBO
V2=(data_ave(3)/3600)/(pi()*(0.05476/2)^2); % CAMBIAR DIAMETRO TUBO
Pd1=(1/2)*1000*V1^2*(1/1000); %Divide entre mil para pasar de Pa a KPa.
Pd2=(1/2)*1000*V2^2*(1/1000);
Pt1=Pd1+data_ave(1);
Pt2=Pd2+data_ave(4);

DeltaP=Pt1-Pt2;
raizDeltaP=sqrt(DeltaP);

Kv = data_ave(3)/raizDeltaP;
```

```
P_ups = num2str(data_ave(1));
P_downs = num2str(data_ave(4));
P_tanks = num2str(data_ave(2));
Qs = num2str(data_ave(3));
Pd1s = num2str(Pd1);
Pd2s = num2str(Pd2);
Pt1s = num2str(Pt1);
Pt2s = num2str(Pt2);
V1s = num2str(V1);
V2s = num2str(V2);
DeltaPs = num2str(DeltaP);
%   raizDeltaP=num2str(raizDeltaP); %Por si nos hace falta meterlo por
%   pantalla

set(handles.edit2u,'String', P_ups);
set(handles.edit2d,'String', P_downs);
set(handles.tank,'String', P_tanks);
set(handles.flow,'String', Qs);

set(handles.edit1u,'String', V1s);
set(handles.edit1d,'String', V2s);
set(handles.edit3u,'String', Pd1s);
set(handles.edit3d,'String', Pd2s);
set(handles.edit4u,'String', Pt1s);
set(handles.edit4d,'String', Pt2s);
set(handles.drop,'String', DeltaPs);

handles = guidata(hObject);

% if (get(handles.checkbox10,'Value') == get(handles.checkbox10,'Max'))
%
%
%   fid = fopen('C:\Users\cavitacion\Desktop\TFG_Hector\Matlab\
GUI_Lema\test_data.txt','at');
%   data=[data_ave(4),DeltaP,Pt1];
%
%   fprintf(fid,'%d\t%d\t%d\n',data);
%   fclose(fid) ;
% end

if handles.writedata==1

    [data_aveT]=acquisition_T();

    fid = fopen('C:\Users\cavitacion\Desktop\TFG_Patricia\MATLAB\TEST_DATA\
test_data.txt','at');
    data=[data_ave(3),DeltaP,raizDeltaP,Pt1,Pt2,data_ave(1),data_ave(4),
data_ave(2),data_aveT(1),data_aveT(2),Kv];
    fprintf(fid,'%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n',data);
    guidata(hObject,handles);
    fclose(fid);
```

```
% Gráfica Q-raizDeltaP
title(handles.axes8, 'Q-raiz(dP)');
xlabel(handles.axes8, 'raizDeltaP [(KPa)^1/2]');
ylabel(handles.axes8, 'Q[m3/h]');
axes(handles.axes8);

plot(raizDeltaP, data_ave(3), 'xb');
grid on;
hold on;

% Gráfica T-Q
title(handles.axes9, 'T liquid - Q');
xlabel(handles.axes9, 'Q[m3/h]');
ylabel(handles.axes9, 'T[°C]');
axes(handles.axes9);

plot(data_ave(3), data_aveT(1), 'or');
grid on;
hold on;

% UNSTEADY P ACQUISITION
% =====
%
[Pdata, Ptime]=acquisition_P_unsteady(P_sampling_rate, P_sampling_time);
Const_a=str2num(get(handles.edit89, 'String'));
Const_b=str2num(get(handles.edit91, 'String'));

Pdata(:,1)=Pdata(:,1)*Const_a + Const_b;

plot(handles.axes10, Ptime, Pdata(:,1))
title(handles.axes10, 'P liquid')
xlabel(handles.axes10, 'Time [s]')
ylabel(handles.axes10, 'Pressure [kPa]')
axes(handles.axes10);

fid = fopen('C:\Users\cavitacion\Desktop\TFG_Patricia\MATLAB\TEST_DATA\
test_data_P_unsteady.txt', 'at');
% fid =
fopen('C:\Users\cavitacion\Desktop\TFG_Patricia\MATLAB\TEST_DATA\
test_data_P_unsteady.txt', 'at');
% data=[Ptime, Pdata];
% fprintf(fid, '%f\t%f\n', data');
for i=1:P_sampling_rate
fprintf(fid, '%f\t%f\n', [Ptime(i), Pdata(i)]);
end

handles.writedata=0;
guidata(hObject, handles);
fclose(fid);

end

%toc;

end
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton_stop.
function pushbutton_stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton_stop (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
handles.stop_now = 1;
guidata(hObject, handles);

function checkboxW_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkboxW (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkboxW

function tank_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tank (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of tank as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of tank as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function tank_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to tank (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function flow_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to flow (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of flow as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of flow as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function flow_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to flow (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function drop_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to drop (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of drop as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of drop as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function drop_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to drop (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function T_liquid_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to T_liquid (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of T_liquid as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of T_liquid as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function T_liquid_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to T_liquid (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function T_atm_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to T_atm (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of T_atm as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of T_atm as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function T_atm_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to T_atm (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit1u_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1u (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1u as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1u as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1u_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1u (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2u_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2u (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2u as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2u as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2u_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2u (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3u_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3u (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3u as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3u as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3u_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3u (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit4u_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4u (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4u as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4u as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4u_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4u (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in checkboxT.
function checkboxT_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkboxT (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkboxT

function edit1d_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1d (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1d as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1d as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1d_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1d (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2d_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2d (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2d as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2d as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2d_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2d (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3d_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3d (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3d as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3d as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3d_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3d (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit4d_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4d (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4d as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4d as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4d_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4d (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function frecuencyp_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to frecuencyp (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of frecuencyp as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of frecuencyp as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function frecuencyp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to frecuencyp (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function timep_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to timep (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of timep as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of timep as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function timep_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to timep (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes when uipanel3 is resized.
function uipanel3_SizeChangedFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to uipanel3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function T_liquid_t_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to T_liquid_t (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function frecuencia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to frecuencia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function time_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to time (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes on button press in write.
function write_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to write (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
handles.writedata=1;
guidata(hObject, handles);
```

```
function edit88_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit88 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit88 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit88 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit88_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit88 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit87_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit87 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit87 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit87 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit87_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit87 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit89_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit89 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit89 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit89 as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit89_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit89 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit91_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit91 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

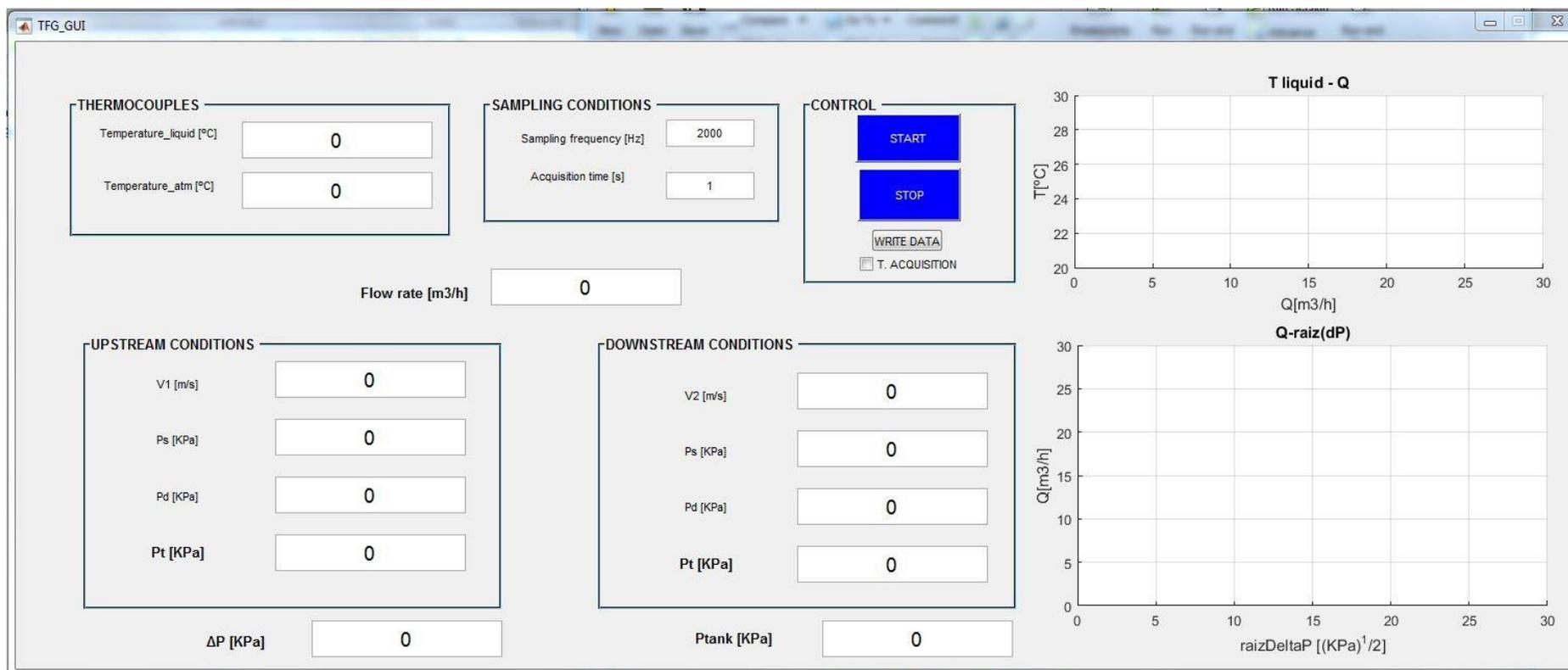
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit91 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit91 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit91_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit91 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

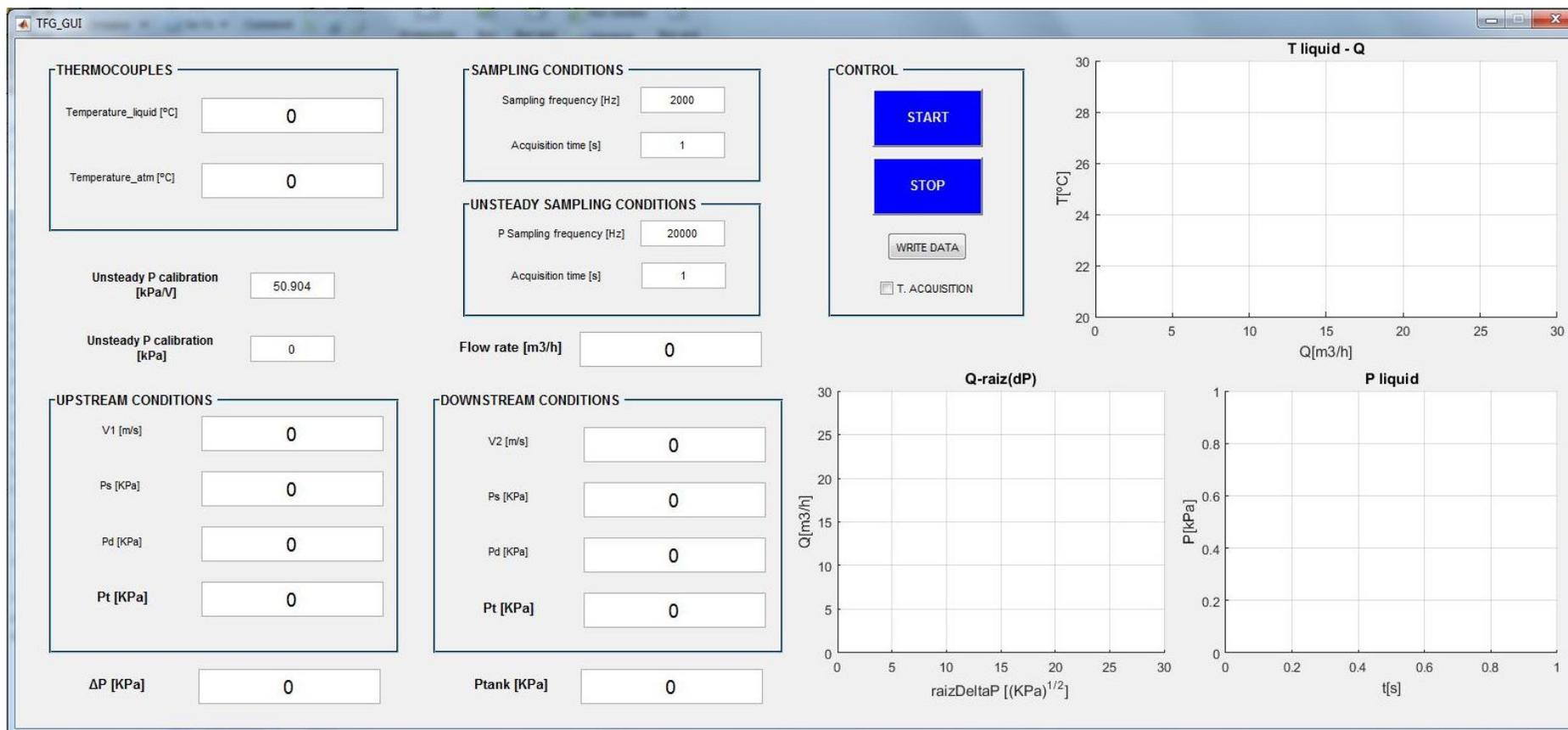
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

3 ANEXO C: INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI)

- Aspecto previo a la instalación del transductor de presión no estacionario.



- Aspecto tras la instalación del transductor de presión no estacionario.



4 ANEXO D: DATOS OBTENIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA PLACA DE ORIFICIO CON $\beta = 0,5$

$P_1 = 200 \text{ kPa}$										
Ensayo A										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}]$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,950246	2,858789	1,690795	200,504127	197,645338	200,477672	197,618883	97,906482	23,666293	22,696708	0,985741994
4,750082	8,289452	2,879141	200,290555	192,001103	200,133615	191,844163	97,77325	23,651853	22,687541	0,958612866
7,340714	17,196823	4,146905	200,510484	183,313661	200,135677	182,938854	97,823441	23,630243	22,68895	0,914234794
10,556414	35,007796	5,916739	200,396816	165,38902	199,621704	164,613908	97,785428	23,638293	22,687382	0,825307624
13,590426	57,330994	7,571723	200,507792	143,176799	199,223105	141,892111	97,95537	23,678877	22,704017	0,714070997
16,423063	83,246761	9,123966	200,290697	117,043936	198,414667	115,167906	97,985089	23,771735	22,743154	0,584370307
18,056252	99,923483	9,996173	200,231912	100,30843	197,964206	98,040724	98,008768	23,770183	22,726611	0,500961255
18,883524	109,33308	10,456246	200,399	91,06592	197,918738	88,585657	89,054212	23,841611	22,759609	0,454423026
19,701838	118,482006	10,884944	200,295287	81,813281	197,595404	79,113398	79,639144	23,885696	22,776441	0,408463335
20,3892	126,38951	11,242309	199,990619	73,601109	197,099062	70,709552	71,480399	23,943718	22,773621	0,368022807
21,331807	139,834604	11,825168	201,070739	61,236134	197,905643	58,071039	59,530459	24,077231	22,841014	0,304550201
22,272605	151,424473	12,305465	200,48258	49,058106	197,032148	45,607674	48,760415	24,181335	22,828806	0,244700093
22,236722	195,414075	13,979058	200,099885	4,68581	196,660561	1,246486	41,45579	24,234995	22,857446	0,023417355
Ensayo B										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}]$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,909735	2,541857	1,59432	200,045259	197,503401	200,019891	197,478034	98,035054	21,822416	22,824548	0,987293585
5,389991	10,121459	3,181424	201,150208	191,028749	200,948135	190,826676	97,963163	21,878983	22,85109	0,949682085
10,282284	33,726646	5,807465	200,975912	167,249265	200,240533	166,513887	98,108573	21,892207	22,863513	0,832185625
17,305073	91,81733	9,582136	200,538959	108,721629	198,456012	106,638682	98,015709	21,926612	22,899782	0,54214717

Anexo D: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,5$ / Anexos

Patricia López Morais

18,05588	98,935966	9,946656	200,116033	101,180067	197,848421	98,912455	97,982758	21,946464	22,861403	0,505607
19,378231	114,609976	10,705605	199,93183	85,321853	197,31991	82,709934	83,142024	22,018968	22,898511	0,426754724
20,316432	127,309283	11,283142	200,759689	73,450406	197,888734	70,579451	72,006212	22,085203	22,909322	0,365862322
21,377179	138,910901	11,786047	200,761811	61,850911	197,583238	58,672337	60,476741	22,12144	22,902938	0,308081057
22,031175	148,855094	12,200619	201,082275	52,227181	197,706241	48,851147	51,018799	22,18289	22,892251	0,259730406
22,349018	197,253681	14,044703	200,993255	3,739575	197,519107	0,265426	40,287771	22,22558	22,899103	0,018605475

$P_1 = 250 \text{ kPa}$ – Transductor de presión aguas abajo 0 – 6 bar (Presión absoluta)										
Ensayo A										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$\text{kPa}^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{amb} [$^{\circ}\text{C}$]	P_2/P_1
2,045283	3,15912	1,777391	250,994768	247,835649	250,965672	247,806553	97,885734	20,940372	21,81901	0,987413606
5,488287	10,697152	3,27065	250,975883	240,278731	250,766372	240,069221	98,006563	20,991364	21,864437	0,957377769
8,924916	25,96448	5,095535	250,275041	224,310561	249,721002	223,756522	97,975341	21,024662	21,941131	0,896256215
16,101137	79,52755	8,917822	250,929296	171,401746	249,126093	169,598544	97,98792	21,062147	21,978587	0,683067895
18,640628	106,436504	10,316807	250,060532	143,624027	247,643666	141,207162	98,015383	21,127414	21,971963	0,57435704
21,963477	148,185292	12,173138	250,400466	102,215174	247,045148	98,859856	98,029366	21,179629	22,000773	0,408206804
22,750118	158,883333	12,604893	250,004224	91,120891	246,404254	87,520922	87,174777	21,292206	22,063697	0,364477406
23,75389	172,358065	13,128521	251,518826	79,160762	247,594176	75,236111	75,76155	21,332903	22,066793	0,314730962
24,480042	183,275075	13,537913	252,177129	68,902054	248,00886	64,733785	65,827209	21,385801	22,072453	0,273228799
24,926406	245,095102	15,655513	250,881294	5,786192	246,559632	1,46453	55,460019	21,467214	22,06383	0,023063465
Ensayo B										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$\text{kPa}^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{amb} [$^{\circ}\text{C}$]	P_2/P_1
1,845895	2,470935	1,571921	250,543138	248,072203	250,519439	248,048503	97,979726	21,940167	21,844321	0,990137686
5,441005	9,819601	3,133624	249,847425	240,027824	249,641509	239,821908	97,942816	21,973913	21,900097	0,96069761
8,948935	25,546947	5,054399	250,463304	224,916357	249,90628	224,359333	97,963464	21,975803	21,925751	0,898001238
12,144245	45,614102	6,753821	250,770436	205,156334	249,744613	204,130511	97,970054	21,94148	21,915743	0,818104148

Anexo D: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,5$ / Anexos

Patricia López Morais

16,540601	83,870213	9,158068	250,896275	167,026062	248,993295	165,123082	97,938531	22,048636	21,973719	0,665717584
19,114239	112,505518	10,606862	250,615879	138,110361	248,07464	135,569122	97,947452	22,082482	21,971412	0,55108384
21,431307	139,876306	11,826931	250,704734	110,828428	247,510043	107,633737	97,913975	22,126912	22,004952	0,442067552
22,052584	147,226284	12,133684	250,056263	102,829979	246,673665	99,447381	97,917132	22,193809	22,020625	0,411227368
22,6781	158,316455	12,582387	251,179844	92,863389	247,602631	89,286176	88,435209	22,276192	22,068288	0,369708761
23,406974	167,216853	12,931236	250,619273	83,40242	246,808422	79,591569	79,673273	22,395114	22,094959	0,33278534
24,178706	176,696135	13,29271	251,28413	74,587995	247,217847	70,521712	71,324088	22,602049	22,137778	0,296827321
24,75614	188,705244	13,737003	250,611505	61,906261	246,348681	57,643438	60,140992	22,737983	22,166269	0,247020826
25,006879	245,789511	15,677676	250,878415	5,088904	246,528804	0,739292	52,719222	22,828964	22,19297	0,020284344
Ensayo C										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$kPa^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}C$]	T_{amb} [$^{\circ}C$]	P_2/P_1
3,517927	5,232794	2,28753	250,586445	245,353651	250,500364	245,26757	97,815272	22,215021	22,900066	0,979117809
13,777785	58,741172	7,664279	250,230444	191,489272	248,910091	190,168918	97,996064	22,244548	22,93983	0,765251697
18,75019	105,769795	10,284444	249,59155	143,821755	247,14619	141,376394	98,030594	22,298406	22,92377	0,576228462
21,969159	148,526152	12,187131	250,737393	102,211241	247,380339	98,854187	98,085946	22,30439	22,932591	0,407642593
23,308716	164,332211	12,819213	251,075749	86,743538	247,296824	82,964613	82,598721	22,397258	22,958206	0,345487521
24,405441	180,002828	13,416513	249,682735	69,679907	245,539832	65,537003	65,597779	22,481453	22,991251	0,279073789
24,945212	244,346814	15,631597	250,364668	6,017855	246,036483	1,689669	55,469691	22,504047	22,960358	0,024036359
Ensayo ± 10 kPa										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$kPa^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}C$]	T_{amb} [$^{\circ}C$]	P_2/P_1
2,642018	3,502507	1,871499	251,00113	247,498622	250,952578	247,450071	98,234188	21,019519	22,337133	0,986045848
6,239807	12,395609	3,52074	245,151608	232,755999	244,880792	232,485183	98,131151	20,995067	22,332833	0,949436966
11,546473	40,657712	6,37634	255,203864	214,546152	254,276543	213,618831	98,180214	20,993838	22,33421	0,840685359
15,864763	76,533287	8,748331	249,737237	173,20395	247,986589	171,453302	98,16781	20,997751	22,319651	0,693544752
19,930489	120,14677	10,961148	253,30916	133,16239	250,546246	130,399476	98,195023	21,023269	22,363291	0,525691175
22,08848	148,909921	12,202865	259,702546	110,792625	256,308926	107,399005	98,215946	21,106954	22,348786	0,42661355
22,433351	152,838832	12,3628	247,43719	94,598358	243,936773	91,097941	90,379219	21,253011	22,391783	0,38231261
23,219596	164,798194	12,837375	248,789757	83,991563	245,039675	80,241481	80,4218	21,359163	22,434937	0,337600567

Anexo D: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,5$ / Anexos

Patricia López Morais

24,393871	181,994152	13,490521	257,133835	75,139683	252,994859	71,000707	71,006481	21,44965	22,443509	0,292220131
24,526197	181,870566	13,48594	247,575871	65,705305	243,391869	61,521303	61,257743	21,483732	22,407804	0,265394623
25,090768	245,183654	15,65834136	250,426130	5,242476	246,104973	0,921319	52,246667	21,531349	22,418935	0,020934221

$P_1 = 250 \text{ kPa}$ – Transductor de presión aguas abajo 0 – 10 bar (Presión absoluta)										
Ensayo A										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$\text{kPa}^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{amb} [$^{\circ}\text{C}$]	P_2/P_1
1,263297	2,53394	1,591836	250,417744	247,883803	250,406643	247,872703	97,856768	19,867158	21,868589	0,989881144
5,307951	9,366058	3,060402	250,062553	240,696495	249,866585	240,500527	97,812916	19,980148	21,958254	0,96254514
8,522965	22,945937	4,790192	250,427003	227,481066	249,921746	226,975808	97,901145	20,005759	22,012478	0,908372752
11,839497	43,775915	6,616337	250,356054	206,580139	249,381069	205,605154	97,904277	19,964543	21,977885	0,825145371
16,236316	81,409053	9,022697	250,64709	169,238037	248,813482	167,404429	97,876137	20,028771	21,997005	0,675204476
20,449981	127,2774	11,281729	250,078624	122,801224	247,169801	119,892401	97,88596	20,113976	22,026887	0,491050463
22,061534	148,762092	12,196807	250,956116	102,194024	247,570771	98,808679	97,95086	20,10979	21,99421	0,407218703
22,837826	158,96828	12,608262	250,490435	91,522154	246,862654	87,894374	87,313497	20,219462	22,046711	0,365371851
23,646085	167,825607	12,954752	250,391414	82,565807	246,502306	78,6767	77,903891	20,268897	22,046811	0,329746958
24,040667	175,154469	13,234594	249,166373	74,011904	245,146387	69,991918	70,415016	20,429183	22,087504	0,297038092
24,707846	186,459304	13,65501	251,239392	64,780087	246,993184	60,533879	61,638421	20,525647	22,118789	0,257842078
25,065759	245,585599	15,671171	250,838916	5,253317	246,468797	0,883199	51,044108	20,627538	22,092669	0,02094299
Ensayo B										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$\text{kPa}^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{amb} [$^{\circ}\text{C}$]	P_2/P_1
1,377904	1,80369	1,343015	250,379742	248,576051	250,366536	248,562846	97,965894	20,671497	22,190324	0,992796178
5,82039	10,652168	3,263766	250,539172	239,887004	250,303539	239,651371	97,956723	20,718348	22,234035	0,957483024
8,195127	22,184883	4,710083	250,345784	228,1609	249,878648	227,693765	97,847621	20,711046	22,243396	0,911383033
12,148608	46,059253	6,786697	250,341334	204,28208	249,314773	203,25552	97,958628	20,723947	22,259358	0,816014186
17,381834	92,276346	9,606058	250,064652	157,788306	247,963185	155,686839	97,936652	20,775838	22,284978	0,630990045

Anexo D: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,5$ / Anexos

Patricia López Morais

22,007263	148,161917	12,172178	250,085987	101,92407	246,717278	98,555361	98,010146	20,797789	22,264045	0,407556102
22,900051	158,205589	12,57798	251,0839	92,878312	247,436324	89,230735	87,689815	20,901308	22,309111	0,369909469
23,435989	167,519464	12,942931	250,883805	83,364341	247,0635	79,544036	79,379545	21,026169	22,330121	0,332282672
24,23841	176,459237	13,283796	250,709327	74,25009	246,622938	70,1637	69,982193	21,063128	22,344389	0,296160063
24,921159	188,073702	13,713997	251,261784	63,188082	246,941941	58,868239	60,168104	21,121664	22,348801	0,251483059
25,155796	247,708819	15,738768	250,674883	2,966064	246,273312	-1,435506	51,388828	21,232649	22,382016	0,011832314
Ensayo C										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$kPa^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}C$]	T_{amb} [$^{\circ}C$]	P_2/P_1
1,126675	1,419765	1,191539	250,960789	249,541023	250,951959	249,532194	98,071012	21,26964	22,485808	0,994342678
5,113329	8,07988	2,842513	250,05989	241,98001	249,87803	241,79815	97,902373	21,313424	22,480307	0,967688221
8,986407	25,82218	5,081553	250,2295	224,407319	249,667801	223,84562	98,027812	21,352475	22,527051	0,896806008
12,28525	45,108989	6,716323	250,695107	205,586118	249,645324	204,536335	97,9902	21,345949	22,526528	0,820064342
16,501302	83,195129	9,121136	250,03612	166,840991	248,142173	164,947044	98,056553	21,409615	22,578293	0,667267557
22,09423	147,334184	12,138129	250,62076	103,286576	247,225374	99,89119	97,950083	21,464373	22,586443	0,412122986
22,850925	158,82128	12,602431	249,892059	91,070779	246,260115	87,438836	87,096171	21,626589	22,615008	0,364440468
23,703254	168,582533	12,983934	250,312396	81,729863	246,404461	77,821928	78,11157	21,643038	22,601461	0,326511449
24,297329	178,911041	13,375763	249,86995	70,95891	245,76367	66,85263	68,384006	21,721625	22,634063	0,283983368
24,742702	188,088529	13,714537	250,792878	62,704348	246,534681	58,446151	60,090024	21,850025	22,652224	0,250024436
25,104845	246,332703	15,69499	250,403229	4,070526	246,019471	0,313232	50,849809	21,910189	22,647178	0,016255885

$P_1 = 300$ kPa										
Ensayo A										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$kPa^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}C$]	T_{amb} [$^{\circ}C$]	P_2/P_1
1,854945	2,407071	1,551474	303,884049	301,476978	303,860116	301,453045	97,951812	21,524406	22,479062	0,992078982
7,732374	19,291638	4,392225	301,062754	281,771116	300,646884	281,355246	97,991428	21,577472	22,521589	0,935921539
14,089745	60,519464	7,779426	299,95635	239,436886	298,575528	238,056064	97,874007	21,595413	22,513397	0,798239097

Anexo D: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,5$ / Anexos

Patricia López Morais

22,775341	158,553063	12,591786	303,760561	145,207498	300,152604	141,599541	97,967022	21,632561	22,507195	0,478032756
25,262122	195,112471	13,968267	299,58247	104,469999	295,143613	100,031142	98,122906	21,752346	22,562584	0,348718665
26,008097	206,850526	14,382299	300,988101	94,137575	296,28322	89,432694	87,729958	21,785374	22,555505	0,312761783
26,857855	215,467629	14,678816	298,772048	83,304418	293,754701	78,287071	78,365105	21,890818	22,59192	0,278822663
27,164692	226,837493	15,061125	299,68145	72,843956	294,548807	67,711313	68,999977	21,970452	22,582585	0,243071288
27,326628	294,446627	17,159447	300,365058	5,918431	295,171038	0,724412	60,167303	22,073567	22,602486	0,019704126
Ensayo B										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$kPa^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}C$]	T_{amb} [$^{\circ}C$]	P_2/P_1
3,483548	5,707331	2,389002	301,437449	295,730118	301,353043	295,645711	97,943367	20,192572	21,590577	0,981066284
7,165701	16,979851	4,120662	301,5145	284,534649	301,157352	284,1775	97,931264	20,194966	21,581595	0,943684795
11,174528	39,356297	6,27346	300,91371	261,557413	300,04517	260,688873	97,936827	20,226681	21,602691	0,869210688
15,25942	71,793223	8,473088	300,268537	228,475314	298,648938	226,855715	97,879746	20,252911	21,630944	0,760903278
19,844111	120,523327	10,978312	300,737679	180,214352	297,998662	177,475335	97,933144	20,345346	21,652675	0,599241015
22,947541	160,468508	12,667616	299,515585	139,047077	295,852864	135,384357	97,928257	20,389825	21,612924	0,464239873
25,3839	197,72473	14,061463	301,335655	103,610926	296,8539	99,12917	97,94675	20,52844	21,680011	0,343838919
26,119059	208,353328	14,434449	302,172476	93,819148	297,427363	89,074035	88,073851	20,611853	21,661479	0,31048211
26,667883	216,426551	14,711443	300,495534	84,068984	295,548914	79,122363	78,729421	20,717333	21,674004	0,279767832
27,174556	226,666905	15,055461	300,07357	73,406665	294,937199	68,270294	69,353743	20,797055	21,665379	0,244628892
27,402258	295,308367	17,184539	300,775229	5,466862	295,55242	0,244052	59,750391	20,922372	21,72317	0,018175905
Ensayo C										
Q [m^3/h]	ΔP [kPa]	$\sqrt{\Delta P}$ [$kPa^{0.5}$]	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_{s1} [kPa]	P_{s2} [kPa]	P_{tanks} [kPa]	T_{liquid} [$^{\circ}C$]	T_{amb} [$^{\circ}C$]	P_2/P_1
1,897979	2,348078	1,532344	300,120953	297,772876	300,095897	297,74782	97,91187	20,599613	21,478194	0,992176231
5,860379	11,96707	3,459345	300,847205	288,880136	300,608323	288,641254	97,820359	20,716755	21,511851	0,960222103
9,949721	30,99661	5,56746	300,17142	269,17481	299,482842	268,486232	97,766384	20,72277	21,491483	0,896736971
13,547261	56,578376	7,52186	300,764125	244,185749	299,487585	242,909209	97,864961	20,764065	21,525959	0,811884559
17,278396	90,620687	9,51949	300,580092	209,959405	298,503561	207,882875	97,850202	20,864394	21,571732	0,698514009
21,622924	142,540148	11,939018	300,851929	158,311781	297,599856	155,059708	97,921116	20,88156	21,545137	0,52621162
25,489531	196,76068	14,027141	301,231781	104,471101	296,712647	99,951967	97,845943	21,090504	21,608349	0,346813011

Anexo D: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,5$ / Anexos

Patricia López Morais

26,111376	205,955249	14,351141	300,729324	94,774075	295,987002	90,031754	89,009158	21,323801	21,642875	0,315147435
26,626025	216,454899	14,712406	301,493632	85,038733	296,562528	80,10763	79,526885	21,54098	21,670649	0,28205814
27,102775	224,776617	14,992552	300,578383	75,801766	295,469112	70,692495	70,705637	21,668812	21,681289	0,252186352
27,417236	295,634524	17,194026	301,648147	6,013623	296,419626	0,785103	61,381604	21,8784	21,732962	0,019935886

$P_1 = 350 \text{ kPa}$										
Ensayo A										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
3,66282	4,085101	2,021163	350,126331	346,04123	350,033013	345,947912	97,954919	20,199653	22,207457	0,988332494
4,959571	7,210448	2,685228	350,134712	342,924265	349,963624	342,753176	97,937303	20,243334	22,213098	0,979406649
7,196508	15,501632	3,937211	350,582538	335,080906	350,222312	334,72068	97,949481	20,249707	22,207227	0,955783217
10,196219	31,251647	5,590317	350,319487	319,06784	349,596368	318,344721	97,919813	20,260053	22,220476	0,910791012
16,48406	82,18169	9,065412	349,220447	267,038757	347,330455	265,148765	97,855039	20,339768	22,253253	0,764671025
20,408037	126,349504	11,24053	350,548114	224,19861	347,651211	221,301707	97,982858	20,352054	22,22432	0,639565871
25,46132	196,585321	14,020889	351,2619	154,676579	346,752764	150,167443	97,953365	20,494654	22,263222	0,440345449
27,09498	221,46895	14,881833	349,488121	128,019172	344,381788	122,912838	97,955971	20,664733	22,273941	0,366304788
28,587811	243,830301	15,615066	350,166415	106,336113	344,481902	100,6516	97,922544	20,879481	22,28581	0,303673078
29,09569	254,07009	15,939576	350,023345	95,953255	344,13506	90,064971	88,244695	21,248124	22,338287	0,274133872
29,932298	276,688134	16,633945	363,211305	86,523171	356,979533	80,291398	81,721673	21,389025	22,349398	0,238217175
30,00577	355,214407	18,847133	362,051396	6,836989	355,788992	0,574585	71,308928	21,465788	22,348679	0,018884029
Ensayo B										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,429973	2,164425	1,471198	350,870624	348,706199	350,856401	348,691976	98,032999	22,596481	23,02373	0,993831273
7,8578	19,41995	4,406807	349,865306	330,445357	349,435836	330,015886	98,016235	22,647471	23,033846	0,94449307
21,519556	141,547654	11,89738	350,345611	208,797957	347,124557	205,576902	97,94888	22,681747	23,074104	0,595977088
28,519836	244,271618	15,629191	349,945158	105,67354	342,287645	100,016028	98,099327	22,800964	23,062207	0,301971716

Anexo D: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,5$ / Anexos

Patricia López Morais

29,333094	255,911322	15,997229	349,114049	93,202727	343,129282	87,217961	87,160043	22,960797	23,094562	0,266969282
29,629228	320,798895	17,91086	350,341802	29,542907	344,235587	23,436691	77,237279	23,100708	23,131308	0,084325955
29,604497	342,856001	18,516371	349,812898	6,956897	343,716871	0,86087	70,041755	23,270574	23,154495	0,01988748

$P_1 = 400 \text{ kPa}$										
Ensayo A										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}]$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,882782	2,271187	1,507046	400,635989	398,364802	400,611332	398,340145	98,044375	23,335497	23,201051	0,994331046
6,957763	15,518876	3,9394	400,317161	384,798285	399,98044	384,461564	98,046205	23,417638	23,187864	0,961233548
11,976105	44,584076	6,677131	400,016817	355,432741	399,019202	354,435127	98,032874	23,396808	23,212217	0,888544496
18,396735	103,167717	10,157151	400,703166	297,535448	398,34913	295,181413	98,067554	23,432958	23,224164	0,74253331
26,75858	215,584302	14,682789	400,828052	185,243749	395,847728	180,263425	98,006262	23,547842	23,235062	0,462152656
31,235734	294,933461	17,173627	400,993056	106,059595	394,206727	99,273266	98,062668	23,76389	23,289537	0,264492348
31,504142	300,650198	17,339268	400,312369	99,662171	393,408909	92,758711	88,435736	23,947611	23,341667	0,248961008
31,908305	468,698337	21,649442	409,195794	-59,502543	402,114071	-66,584266	79,939537	24,099376	23,354357	0

5 ANEXO E: DATOS OBTENIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA PLACA DE ORIFICIO CON $\beta = 0,3$

$P_1 = 200 \text{ kPa}$										
Ensayo A										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}]$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,205303	5,415912	2,327211	200,524585	195,108673	200,51448	195,098568	98,187506	23,922393	24,30407	0,972991282
2,662322	21,163439	4,600374	200,238076	179,074637	200,188775	179,025336	98,403754	23,975195	24,323452	0,894308618
4,511757	59,383911	7,706096	200,679162	141,295251	200,537576	141,153664	98,324096	23,940534	24,300068	0,704085315
6,049423	103,909279	10,19359	200,613232	96,703954	200,35869	96,449412	98,204319	23,943199	24,305174	0,482041753
6,48782	119,317831	10,92327	199,940767	80,622937	199,647996	80,330165	83,280494	23,937716	24,311195	0,403234109
6,896981	134,992644	11,618633	200,424165	65,431521	200,093301	65,100657	69,033254	23,957114	24,334367	0,326465229
7,214005	147,464936	12,143514	200,400017	52,935081	200,038037	52,573101	57,434975	23,970474	24,316526	0,264147088
7,474964	157,464598	12,54849	199,820429	42,35583	199,431787	41,967188	46,449233	24,036273	24,335117	0,211969468
7,837684	173,352573	13,166342	200,378705	27,026131	199,95143	26,598857	31,974519	24,017537	24,33427	0,134875265
7,983294	194,991331	13,96393	200,058816	5,067485	199,615518	4,624187	24,122156	24,115361	24,368575	0,025329976
8,004748	197,931964	14,06883	200,878197	2,946232	200,432513	2,500549	19,478669	24,122972	24,36098	0,014666758
Ensayo B										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}]$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,244279	6,715739	2,591474	200,183151	193,467411	200,172382	193,456642	98,423099	24,108408	24,348231	0,966452022
3,146169	29,601699	5,440744	200,576318	170,974619	200,507469	170,90577	98,268718	24,129081	24,345818	0,852416779
4,347228	55,392146	7,44259	199,964103	144,571957	199,832655	144,440508	98,378471	24,169676	24,383726	0,722989551
6,054952	105,831444	10,287441	200,89445	95,063006	200,639442	94,807999	98,263431	24,129713	24,373076	0,473198767
6,519984	120,676507	10,985286	200,412697	79,736189	200,117015	79,440508	82,448625	24,141877	24,390988	0,397859967
6,839632	132,846484	11,525905	200,266195	67,419711	199,94081	67,094326	71,002046	24,188776	24,407628	0,336650482

Anexo E: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,3$ / Anexos

Patricia López Morais

7,162081	144,710433	12,029565	200,095412	55,384978	199,738624	55,028191	59,217136	24,211103	24,401672	0,276792843
7,446098	156,628586	12,515134	200,809292	44,180706	200,423646	43,79506	48,325712	24,259324	24,439171	0,220013255
7,787768	168,039021	12,962987	200,257143	32,218122	199,846058	31,807037	37,828447	24,316897	24,455224	0,160883759
7,984476	191,281595	13,830459	199,383823	8,102228	198,940394	7,658799	24,369576	24,316534	24,451868	0,040636336
7,999008	198,410117	14,085813	200,572267	2,16215	200,127222	1,717105	20,092961	24,337853	24,429546	0,010779905

$P_1 = 250 \text{ kPa}$										
Ensayo A										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,349902	7,375784	2,715839	250,879058	243,503274	250,866383	243,490599	98,322768	23,266321	24,000525	0,97060024
3,706953	39,723606	6,302667	250,464693	210,741087	250,369113	210,645507	98,286759	23,322651	24,020806	0,841400377
5,294259	81,01493	9,000829	250,831523	169,816593	250,636565	169,621634	98,353113	23,256419	24,027824	0,677014559
7,368779	153,984366	12,409044	249,857624	95,873258	249,479946	95,495579	98,271825	23,295775	24,045326	0,383711557
7,688735	166,703946	12,911388	250,536565	83,832618	250,125376	83,42143	86,274926	23,279487	24,041262	0,334612307
7,901673	177,972346	13,340628	250,521198	72,548852	250,086918	72,114572	76,668166	23,336526	24,084551	0,28959167
8,104915	186,12371	13,642716	249,867464	63,743754	249,410557	63,286847	67,40808	23,357932	24,075922	0,255110261
8,364092	197,682069	14,059946	250,87231	53,190241	250,385713	52,703644	56,824617	23,419743	24,110667	0,212021171
8,540827	207,456598	14,403354	249,790085	42,333487	249,282708	41,82611	47,194302	23,454534	24,081929	0,16947625
8,801689	218,672487	14,787579	250,010089	31,337602	249,476131	30,803643	37,316667	23,494748	24,123144	0,12534535
8,920388	247,679534	15,737838	250,363341	2,683807	249,79864	2,119106	27,773428	23,535661	24,134487	0,010719648
Ensayo B										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,114351	6,137573	2,477412	250,635304	244,497731	250,626667	244,489094	98,239951	24,42526	24,44322	0,975511937
3,28351	31,768488	5,636354	250,860025	219,091537	250,785034	219,016547	98,339581	24,460822	24,457828	0,873361696
5,178378	75,885796	8,711245	251,247045	175,361249	251,060528	175,174732	98,274707	24,421934	24,461555	0,697963429
7,365842	150,587335	12,271403	249,871449	99,284113	249,494071	98,906735	98,206975	24,394919	24,448641	0,397340766

Anexo E: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,3$ / Anexos

Patricia López Morais

7,692258	169,862425	13,033128	250,176903	80,314478	249,765337	79,902912	84,775242	24,421647	24,469933	0,321030747
8,029198	182,246709	13,499878	249,672246	67,425537	249,223836	66,977126	71,032516	24,434753	24,476973	0,270056196
8,306192	196,041367	14,001477	250,827241	54,785874	250,347358	54,305991	58,977082	24,501071	24,498944	0,21842075
8,548847	206,741852	14,378521	249,660406	42,918555	249,152075	42,410224	47,035586	24,520351	24,474666	0,171907735
8,785742	216,326971	14,708058	250,345138	34,018167	249,809465	33,482495	37,498085	24,6068	24,528511	0,135885072
8,969201	248,410958	15,761058	250,896392	2,485434	250,336842	1,925884	21,66807	24,666599	24,504669	0,009906217

$P_1 = 300 \text{ kPa}$										
Ensayo A										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,140237	5,179149	2,275774	300,415283	295,236134	300,40624	295,227091	98,400221	21,872935	23,360355	0,982760035
2,925008	26,715245	5,168679	300,822179	274,106934	300,76267	274,047425	98,440414	21,834608	23,373015	0,911192569
4,639048	62,235784	7,888966	300,629339	238,393554	300,47965	238,243865	98,434225	21,782307	23,385047	0,792981666
7,180612	146,870226	12,119003	300,26905	153,398824	299,910413	153,040188	98,383984	21,765472	23,389446	0,510871247
8,491632	203,686983	14,271895	300,211942	96,524959	299,710392	96,023409	98,323068	21,801327	23,43329	0,321522716
8,713664	216,55961	14,715964	300,223047	83,663437	299,694926	83,135317	86,878819	21,836375	23,435805	0,278670934
8,93039	225,346273	15,011538	300,71155	75,365277	300,156832	74,810559	78,047899	21,851606	23,433906	0,250623154
9,105647	234,646662	15,318181	299,863649	65,216986	299,286944	64,640282	69,323348	21,923086	23,462949	0,217488803
9,30856	243,983525	15,619972	300,281329	56,297804	299,678636	55,695111	59,873851	21,919359	23,461908	0,187483531
9,480058	252,802831	15,899775	300,011648	47,208817	299,386543	46,583712	51,746478	22,038814	23,473667	0,157356614
9,659366	262,643228	16,206271	300,773433	38,130205	300,124457	37,481229	42,091281	22,090271	23,493839	0,126773846
9,783831	274,939697	16,581306	300,203192	25,263495	299,537384	24,597686	33,712052	22,148723	23,514535	0,084154651
9,837613	298,510973	17,27747	300,949168	2,438195	300,27602	1,765047	26,591878	22,700917	23,833418	0,008101684
Ensayo B										
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1
1,424761	8,041544	2,835762	300,555941	292,514397	300,541822	292,500277	98,456852	22,815784	23,858011	0,973244435

Anexo E: Datos obtenidos para la caracterización de la placa de orificio con $\beta = 0,3$ / Anexos

Patricia López Morais

3,280963	31,546927	5,616665	300,742998	269,196071	300,668124	269,121197	98,339331	22,823994	23,866528	0,89510337
5,395734	84,830564	9,210351	300,069716	215,239153	299,867213	215,036649	98,373885	22,854018	23,899362	0,717297153
7,020339	139,646374	11,817207	300,929168	161,282794	300,586362	160,939988	98,384134	22,785501	23,866533	0,535949357
8,500881	204,331504	14,294457	300,397591	96,066086	299,894948	95,563444	98,326977	22,831624	23,923013	0,319796459
8,758307	217,213515	14,738165	300,994843	83,781328	300,461297	83,247782	86,858773	22,838758	23,887426	0,278348051
9,02881	228,128849	15,103935	300,906235	72,777386	300,339222	72,210374	75,786457	22,915066	23,935607	0,241860678
9,172417	237,02476	15,395608	300,981226	63,956465	300,396033	63,371272	67,160309	22,966872	23,937561	0,212493204
9,323475	246,43047	15,698104	300,258105	53,827635	299,653479	53,223009	57,991433	23,002352	23,945901	0,179271214
9,475739	254,468254	15,952061	299,797963	45,329709	299,173427	44,705173	49,730502	23,060384	23,961646	0,151200857
9,705742	264,908809	16,276019	299,312512	34,403703	298,657289	33,74848	39,456729	23,16416	24,004189	0,114942415
9,826443	299,564714	17,307938	300,550484	0,985771	299,878864	0,31415	30,187672	23,266361	24,008445	0,003279885

6 ANEXO F: DINÁMICA DEL FLUJO. DATOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS POR LOS TRANSDUCTORES ESTACIONARIOS

$P_1 = 250 \text{ kPa}$											
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1	$v_d \text{ [m/s]}$
2,918176	26,153275	5,114027	250,086659	223,933383	250,027427	223,874152	98,0549	24,421735	26,080735	0,895423146	4,58708282
5,413529	83,578929	9,142151	249,943093	166,364164	249,739252	166,160323	98,076199	24,326078	26,036429	0,665608167	8,50952988
7,236579	148,766474	12,196986	250,743776	101,977301	250,379527	101,613052	98,039439	24,348514	26,020526	0,406699231	11,3751834
7,730563	170,917112	13,073527	251,102348	80,185236	250,686673	79,769561	83,543075	24,394606	25,926222	0,31933288	12,1516772
8,053625	183,822941	13,558132	251,578276	67,755334	251,127133	67,304191	70,905122	24,372549	25,865808	0,269321084	12,6594986
8,304114	194,533145	13,947514	251,518931	56,985786	251,039288	56,506143	60,481502	24,436875	25,837928	0,226566588	13,0532424
8,61032	209,403258	14,470773	250,964687	41,561429	250,449019	41,045761	45,66743	24,51248	25,788511	0,165606682	13,5345678
8,835724	223,615592	14,953782	252,114736	28,499145	251,571717	27,956125	33,352447	24,531162	25,699543	0,113040378	13,8888805
8,987971	251,075937	15,845376	251,372808	0,29687	250,810913	-0,265024	25,685361	24,610136	25,640352	0,001180995	14,1281977

$P_1 = 300 \text{ kPa}$											
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1	$v_d \text{ [m/s]}$
2,856688	24,8363	4,983603	300,305872	275,469571	300,24911	275,412809	98,030042	24,56185	25,193885	0,917296652	4,49042979
6,420578	117,939758	10,860007	302,463268	184,523509	302,176533	184,236775	98,111054	24,57283	25,14771	0,610069151	10,0925109
8,269206	193,608695	13,914334	301,691121	108,082426	301,215502	107,606808	98,036156	24,59992	25,121414	0,358255243	12,9983705
8,941823	224,821187	14,994038	301,09394	76,272753	300,5378	75,716614	79,295301	24,723498	25,101195	0,253318791	14,0556576
9,239278	241,947045	15,554647	302,377875	60,43083	301,78412	59,837075	63,81429	24,729896	25,073503	0,199852023	14,5232273
9,437443	251,586402	15,861475	300,521251	48,93485	299,901753	48,315351	52,110117	24,788521	25,044491	0,162833243	14,834723

Anexo F: Dinámica del flujo. Datos obtenidos en los ensayos por los transductores estacionarios / Anexos

Patricia López Morais

9,663434	265,702713	16,30039	302,127527	36,424815	301,478005	35,775292	40,852047	24,792288	24,937405	0,12056106	15,1899584
9,763286	273,482898	16,537318	301,943988	28,461091	301,280973	27,798075	34,533998	24,840327	24,911191	0,094259506	15,3469158
9,848539	302,532239	17,393454	303,16183	0,629591	302,487185	-0,045054	28,91892	24,865266	24,852826	0,002076749	15,4809251

$P_1 = 350 \text{ kPa}$											
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1	$v_d \text{ [m/s]}$
2,558896	20,412945	4,518069	350,828123	330,415177	350,782578	330,369633	98,056228	24,941518	24,604012	0,941814967	4,02233034
6,375938	116,548757	10,795775	350,802425	234,253668	350,519664	233,970907	98,121629	24,989502	24,601763	0,667765247	10,0223412
9,006	228,906728	15,129664	351,29425	122,387521	350,730098	121,82337	98,185977	24,957088	24,578001	0,348390334	14,1565375
9,739788	268,481242	16,385397	352,118767	83,637525	351,45894	82,977697	85,960952	25,005416	24,58492	0,237526462	15,3099793
9,850605	274,590525	16,570773	349,155506	74,564982	348,480579	73,890054	77,265118	25,044237	24,580754	0,213558087	15,4841726
10,102395	286,703488	16,932321	352,397187	65,693699	351,687315	64,983826	68,01914	25,106667	24,539327	0,186419476	15,8799615
10,187875	295,641219	17,194221	350,938165	55,296945	350,216229	54,575009	58,951498	25,163533	24,48619	0,157568912	16,0143276
10,346493	305,572044	17,480619	351,037426	45,465382	350,292835	44,720791	49,633554	25,163804	24,477797	0,129517193	16,2636593
10,544272	317,129776	17,808138	351,657981	34,528205	350,884651	33,754875	39,562197	25,19856	24,449089	0,098186894	16,5745482
10,656452	350,863751	18,731357	351,671842	0,808091	350,88197	0,018219	34,008235	25,214039	24,454811	0,002297855	16,7508841

$P_1 = 400 \text{ kPa}$											
$Q \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\Delta P \text{ [kPa]}$	$\sqrt{\Delta P} \text{ [kPa}^{0.5}\text{]}$	$P_1 \text{ [kPa]}$	$P_2 \text{ [kPa]}$	$P_{s1} \text{ [kPa]}$	$P_{s2} \text{ [kPa]}$	$P_{tanks} \text{ [kPa]}$	$T_{liquid} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{amb} \text{ [}^\circ\text{C]}$	P_2/P_1	$v_d \text{ [m/s]}$
1,563109	9,305777	3,050537	400,638843	391,333066	400,621849	391,316071	98,120326	25,405124	24,489296	0,976772654	2,45705209
5,013436	72,58949	8,519947	399,175571	326,586082	399,000747	326,411257	98,215746	25,479481	24,452814	0,818151475	7,88062342
8,734848	216,726217	14,721624	400,378952	183,652735	399,848261	183,122044	98,148916	25,461898	24,471212	0,458697277	13,7303134
10,465786	301,996407	17,378044	399,622695	97,626288	398,860835	96,864428	98,149317	25,444367	24,431058	0,244296155	16,4511761
10,634866	317,455906	17,817292	401,789287	84,33338	401,002611	83,546705	85,642993	25,486192	24,40833	0,209894546	16,716953
10,84032	331,221359	18,199488	401,690787	70,469427	400,873422	69,652063	72,913505	25,526011	24,369889	0,175432022	17,0399063

Anexo F: Dinámica del flujo. Datos obtenidos en los ensayos por los transductores estacionarios / Anexos

Patricia López Morais

10,987696	342,533284	18,507655	401,526647	58,993363	400,686907	58,153623	61,574073	25,599898	24,370754	0,14692266	17,2715667
11,208538	353,865147	18,811304	399,772921	45,907774	398,899086	45,033939	50,425506	25,628555	24,353675	0,114834626	17,6187084
11,336969	395,902797	19,897306	401,630578	5,727781	400,736603	4,833806	40,377001	25,670092	24,334761	0,014261317	17,8205892

7 ANEXO G: CÁLCULO DE LAS RELACIONES DE PRESIÓN CRÍTICA

En el presente anexo se reproducen los cálculos efectuados en las bases de datos consultadas en la literatura para obtener la relación de presión crítica correspondiente.

- 1973 – Tullis.

D (mm)	d (mm)	β	σ_{ch}	P_1 (kPa)	P_2 (kPa)	$(P_2/P_1)_{crit}$	$(P_2/P_1)_{crit\ medio}$	
27,5	10,615	0,386	0,2	200	35,28	0,176	0,175	
				250	43,61	0,174		
				300	51,94	0,173		
78	29,64	0,38	0,264	200	43,62	0,218	0,216	
				250	54,06	0,216		
				300	64,50	0,215		
	38,142	0,489	0,381	0,381	200	56,86	0,284	0,283
					250	70,66	0,283	
					300	84,45	0,282	
	50,778	0,651	0,665	0,665	200	81,28	0,406	0,405
					250	101,25	0,405	
					300	121,22	0,404	
	60,996	0,782	1,65	1,65	200	125,41	0,627	0,626
					250	156,54	0,626	
					300	187,67	0,626	
154	58,674	0,381	0,197	200	34,86	0,174	0,173	
				250	43,09	0,172		
				300	51,32	0,171		
	75,922	0,493	0,356	0,356	200	54,23	0,271	0,270
					250	67,35	0,269	
					300	80,48	0,268	
	101,332	0,658	0,8	0,8	200	90,18	0,451	0,450
					250	112,41	0,450	
					300	134,63	0,449	
	121,198	0,787	1,69	1,69	200	126,52	0,633	0,632
					250	157,93	0,632	
					300	189,34	0,631	
136,136	0,884	4,44	4,44	200	163,66	0,818	0,818	
				250	204,47	0,818		
				300	245,28	0,818		
305	116,205	0,381	0,19	200	33,89	0,169	0,168	
				250	41,87	0,167		
				300	49,86	0,166		

El valor de la presión de vapor del fluido a la temperatura de trabajo, P_v , que se ha empleado en la ecuación 65 para el cálculo de la presión aguas abajo, P_2 , teniendo en cuenta lo comentado en la investigación correspondiente [6], es de 2,33 kPa.

- **1993 – Tullis.**

D (mm)	d (mm)	β	σ_{ch}	P_1 (kPa)	P_2 (kPa)	$(P_2/P_1)_{crit}$	$(P_2/P_1)_{crit,medio}$
76,2	29,642	0,389	1,27	703,265	150,436	0,214	0,216
				200	43,443	0,217	
				250	54,073	0,216	
				300	64,702	0,216	
	33,833	0,444	1,32	703,265	171,377	0,244	0,245
				200	49,373	0,247	
				250	61,494	0,246	
				300	73,615	0,245	
	38,100	0,500	1,39	703,265	198,162	0,282	0,283
				200	56,958	0,285	
				250	70,987	0,284	
				300	85,016	0,283	
	50,825	0,667	1,74	703,265	299,763	0,426	0,428
				200	85,731	0,429	
				250	106,995	0,428	
				300	128,260	0,428	
60,960	0,800	2,78	703,265	450,714	0,641	0,642	
			200	128,479	0,642		
			250	160,494	0,642		
			300	192,508	0,642		

En este caso, el artículo [9] indica el valor de la presión aguas arriba, P_1 , que se ha tomado como referencia para el cálculo del número de cavitación por asfixia, σ_{ch} . Dicho valor es de 102 psi, es decir, 703,265 kPa. No obstante, también se han fijado tres valores de P_1 a mayores, los mismos que en la investigación anterior en la cual no se indicaba ninguno de referencia, con el fin de verificar la ausencia de efectos de escala de presión como se comentó en el apartado 6.3, algo que se ha conseguido ya que los valores de la relación de presión crítica son prácticamente los mismos independientemente del valor de presión aguas arriba.

En lo que se refiere a la presión de vapor para el cálculo de la presión aguas abajo a través de la ecuación 64, su valor es igual a 0,17 psi, es decir, 1,172 kPa.

- **2007 – Testud.**

D (mm)	d (mm)	β	σ_{ch}	P_1 (kPa)	P_2 (kPa)	$(P_2/P_1)_{crit}$
74	22	0,297	0,15	2140	280	0,131

A diferencia de las investigaciones anteriores, esta ya proporciona directamente los valores de la presión aguas arriba y aguas abajo con los que se ha calculado el número de cavitación por asfixia. Por tanto, el cálculo de la relación de presión crítica es directo.