



Proyecto Fin de Carrera

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL

Especialidad Mecánica

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Autor

José Antonio Martínez Mestre

Directores

Jorge A. Barroso Estébanez

Félix M. Barreras Toledo

Antonio Lozano Fantoba

Escuela de Ingeniería Técnica Industrial, Universidad de Zaragoza

Marzo, 2013

Índice

1. Introducción	3
1.1. Contenido del proyecto	4
2. Estado de arte	5
2.1. Definición del proceso de atomización	5
2.2. Historia de la atomización	5
2.3. Atomización en combustión	6
2.4. Boquillas para la atomización de combustibles líquidos	7
3. Instalación experimental de atomización	10
3.1. Sistema de aire	11
3.2. Sistema de agua	12
3.3. Sistema de sujeción y desplazamiento del atomizador	14
3.4. Sistema de drenaje	14
3.5. Atomizador	16
3.6. Procedimiento de operación	25
4. Descripción y resultados de los experimentos	30
4.1. Pruebas para corregir las presiones de aire bajas	30
4.2. Pruebas para corregir el caudal de aire medido con el rotámetro	31
4.3. Pruebas para determinar la presión en la cámara de mezcla	33
4.4. Pruebas para evaluar el funcionamiento de la boquilla	38
5. Conclusiones	46
6. Bibliografía	47
7. Anexos	49

1. Introducción

La atomización por doble fluido (o por fluido auxiliar) es un proceso en el que se fragmenta una masa de líquido en pequeñas gotas debido al efecto desestabilizador inducido por el fluido auxiliar en su interacción con el fluido atomizado. El proceso es complejo y ha sido objeto de numerosos estudios, aunque todavía se requiere mucho trabajo de investigación para comprender en profundidad sus detalles y mejorar el control sobre el mismo.

En el Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC) se han realizado numerosas investigaciones sobre esta temática.

Este proyecto se presenta como un estudio experimental de un modelo a escala real de un atomizador de doble fluido, diseñado para atomizar líquidos de gran viscosidad, empleando vapor de agua como fluido auxiliar. El modelo del atomizador se evalúa en un banco de laboratorio utilizando agua como fluido a atomizar y aire en sustitución del vapor de agua para un rango de números de Reynolds que garantiza la semejanza con el prototipo real.

La boquilla objeto de estudio está formada por dos piezas independientes que al montarse conforman un conjunto único (el atomizador) con una cámara de mezcla entre las dos piezas. Es en esta cámara donde confluyen varios canales de agua que llegan por la periferia y el aire que entra por un orificio central. La fuerte interacción de ambos fluidos dentro de la cámara favorece la formación de una mezcla bifásica homogénea, la cual sale del atomizador por varios orificios practicados en la pieza externa.

En este PFC se pretende analizar la influencia de diferentes parámetros de trabajo sobre la razón entre el flujo de aire y agua que se establece en el atomizador, elaborando un procedimiento para determinar las condiciones de bloqueo de la tobera de aire. En el estudio se incluye un análisis del caudal de aire volumétrico medido por el Dr. Germán Ferreira en su tesis doctoral *“Study of the Flow Inside a Twin Fluid Atomizer with Internal Mixing Chamber and its Influence on the Spray Quality”* (2010) porque, según la corrección usada, en ocasiones el valor del flujo másico calculado a través de la medida experimental superaba al máximo que teóricamente puede salir por un orificio en condiciones isoentrópicas.

1.1. Contenido del proyecto

El proyecto se estructura de la siguiente manera:

En este **Capítulo 1** se realiza una breve introducción del problema, los objetivos y el contenido de este proyecto.

En el **Capítulo 2** se presenta un resumen de las características de los atomizadores de doble fluido o de fluido auxiliar, y también se comentan las aplicaciones de estos dispositivos.

El **Capítulo 3** describe y explica las diferentes partes y sistemas de la instalación experimental.

En el **Capítulo 4** se realiza un análisis de los experimentos realizados.

El **Capítulo 5** se dedica al procesamiento de las medidas experimentales.

En el **Capítulo 6** se presentan las conclusiones sobre los resultados de los estudios realizados.

En el **Capítulo 7** se citan las bibliografías empleadas.

En los **Anexos** se ubican las tablas de mediciones y de resultados de los cálculos realizados.

2. Estado del Arte

2.1. Definición del proceso de atomización

La atomización es el proceso por el cual una masa de líquido se disgrega y pasa a formar ligamentos y gotas de dimensiones menores que la masa inicial.

La rotura ocurre cuando las fuerzas cohesivas (interacción molecular y tensión superficial) que tienden a mantener la masa líquida unida, son superadas por fuerzas que tienden a su rotura (centrífugas, aerodinámicas, de presión, etc.). La atomización puede producirse por la propia energía cinética del fluido; aunque puede verse favorecida por la aplicación externa de energía mecánica a través de una rotación, un mecanismo vibrante o un impacto, o también mediante la exposición de la masa líquida a una corriente de gas con velocidad relativamente alta. Este último método constituye la denominada atomización asistida por gas, o de doble fluido, y permite obtener gotas de tamaño reducido con presiones de trabajo moderadas.

2.2. Historia de la atomización

La atomización de líquidos es un tema de una gran importancia científica y tecnológica. Por un lado plantea una serie de problemas básicos de gran complejidad puesto que integra dinámica de fluidos multifásicos, fenómenos de transporte, evaporación, coalescencia, turbulencia, y en muchos casos, acoplamiento con reacciones químicas. Por otro lado, los procesos de atomización son determinantes en una amplia variedad de aplicaciones industriales: combustión en centrales térmicas, turbinas, motores de automoción, pintura, secado, recubrimiento y tratamiento de materiales, extinción de incendios, riegos por aspersión, aplicación de insecticidas y herbicidas, suministro de medicamentos y terapias de inhalación, etc. Todo ello ha llevado a que el estudio de la generación de aerosoles a partir de un volumen de líquido sea un tema al que se han dedicado innumerables esfuerzos de científicos e ingenieros desde los primeros estudios sistemáticos iniciados por Rayleigh a finales del siglo XIX (Rayleigh, 1878). Sin embargo, no es hasta la década de los años 30 del siglo pasado cuando este problema recibe un fuerte impulso, básicamente por los trabajos realizados por investigadores alemanes y norteamericanos entre los que hay que mencionar a

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Weber (1931), Ohnesorge (1936) y Taylor (1959). Cada uno de ellos, de alguna manera, ayudó a completar los incipientes resultados obtenidos por Rayleigh.

Desde mediados del siglo pasado, los informes de estudios tanto teóricos de estabilidad lineal (Weber, 1932; Squire, 1953; etc.) como experimentales (Haenlein, 1932; Dombrowski y col., 1960; etc.), sobre la atomización de líquidos aparecidos en la literatura científica se han multiplicado. Un compendio sobre el conocimiento actual en este campo puede consultarse en el libro *Atomization and Sprays* de A. Lefebvre (1989), así como en las referencias citadas en éste. Sin embargo, dado el enorme volumen de trabajos sobre el tema de atomización, un resumen global sería excesivamente extenso. Por ello, esta revisión se va a limitar a un área específica, la combustión, y dentro de ella, a las boquillas atomizadoras de combustibles líquidos para plantas de generación de electricidad, comúnmente denominadas centrales térmicas.

2.3. Atomización en combustión

Dentro de la gran variedad de aplicaciones de la atomización, quizá una de las de mayor importancia económica y social es la combustión. En el mundo actual la mayor parte de la electricidad se genera en centrales térmicas, donde la energía química de los combustibles fósiles (generalmente petróleos o carbón) se utiliza en producir vapor de agua en grandes calderas industriales. El vapor es llevado hasta una turbina la cual está acoplada a un generador eléctrico. Sin embargo, estos procesos generan CO₂ y otros productos contaminantes, cuyas emisiones deben minimizarse todo lo posible para alcanzar el mayor grado posible de sostenibilidad y cumplir con las cada vez más estrictas normativas medioambientales.

Es bien conocido que una combustión rápida y eficiente de sustancias líquidas o sólidas exige su atomización o pulverización previa, de modo que se aumente la relación de superficie/volumen y se acelere la mezcla con el oxidante, y los procesos de evaporación o devolatilización. A su vez, dentro de los procesos de combustión de líquidos, un caso de especial relevancia es aquel en que los combustibles son fluidos de muy alta viscosidad, como es el caso de fuelóleos o petróleos crudos sin refinar. Esta situación se presenta, por ejemplo, en algunas centrales térmicas, en las que, debido a la creciente escasez de petróleo, se están quemando combustibles de calidad decreciente según sus propiedades físico-químicas. Hoy en día, es cada vez más común el uso de petróleos pesados (muy viscosos) y con alto contenido de azufre, vanadio y asfaltenos

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

en las calderas de las centrales térmicas. La combustión limpia y eficiente de los petróleos pesados presenta dificultades adicionales respecto a los combustibles más ligeros. En primer lugar, lograr una calidad de atomización adecuada, definida por el diámetro medio de las gotas y la distribución de tamaños de éstas, resulta difícil debido a su alta viscosidad; mientras que la elevada concentración de compuestos pesados en su composición química hace que el tiempo característico del proceso de evaporación de los mismos sea muy grande. Ambas características contribuyen a una emisión apreciable de fracciones de combustible no quemado y partículas que se convierten en hollines ácidos. Por ello, resulta imprescindible aumentar la eficiencia del proceso de atomización, reduciendo el tamaño de las gotas producidas. De esta forma se garantiza un mejor encendido y control de las calderas, así como una disminución de la formación y emisión de NOx, hollín y otros agentes contaminantes.

2.4. Boquillas para la atomización de combustibles líquidos

Como se ha indicado, la combustión eficiente de combustibles sólidos requiere la atomización previa en gotas del menor tamaño posible, con una distribución preferentemente homogénea. Para esta aplicación, un tamaño medio óptimo se situaría en torno a las 20 micras. Para lograr este tamaño, se requiere un precalentamiento adecuado del líquido. Debido a la elevada viscosidad de muchos de los combustibles utilizados en centrales térmicas, y a los altos caudales de operación, las boquillas adecuadas son siempre de doble fluido, en las que la atomización se ve asistida por un flujo de gas a alta velocidad. Por lo general el gas auxiliar utilizado es vapor de agua que se produce en el propio generador de vapor de la central, de forma que su calor también es transferido al combustible evitando que se enfríe. Sin embargo, esto incrementa los gastos de combustible y la cantidad de agua en los gases de combustión con todos los inconvenientes que ocasiona.

Si el flujo de vapor requerido para la atomización es elevado se produce un enfriamiento excesivo de la zona de reacción por la adición de agua, contribuyendo a las inestabilidades de la llama o incluso a su extinción. Las llamas inestables que generan mucho hollín pueden llegar incluso a tocar las paredes de la caldera y esta situación produce la emisión de grandes cantidades de gases contaminantes y partículas sólidas. Por otra parte, el incremento del flujo de vapor de atomización ocasiona un incremento de la fracción de agua en los productos gaseosos de la combustión con el consiguiente

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

aumento de los problemas corrosivos de estos gases en todas las superficies de intercambio de calor. Minimizar la adición de vapor de agua aumenta la eficiencia de la combustión, siempre y cuando esto no conlleve un aumento del diámetro de las gotas de combustible.

El modelo más común de boquilla industrial para la atomización de fuelóleos pesados es el denominado de tipo “Y”. Recibe este nombre porque el líquido y el gas circulan por conductos separados que confluyen en el conducto de salida. Como el diámetro de las gotas normalmente se relaciona con el tamaño del orificio de salida, una única estructura en “Y” no tendría suficiente capacidad para atomizar los elevados caudales requeridos en una central térmica. Por ello, casi todas las boquillas comerciales suelen tener múltiples orificios de salida, cada uno de ellos conectado a una “Y”.

Estas boquillas funcionan bien para aceites ligeros. Sin embargo, como se ha mencionado, muchas centrales los están sustituyendo por petróleo crudo, y el valor de los parámetros de trabajo con mayor influencia en los procesos de atomización-combustión de estos nuevos combustibles supera a menudo ampliamente los límites recomendados por los fabricantes de las boquillas comerciales, lo que da lugar a obstrucciones de difícil limpieza. Esta situación combinada con el impacto de los productos de la combustión de hidrocarburos sobre el calentamiento global ha motivado el desarrollo de diferentes estudios para obtener nuevos diseños de atomizadores, con el fin de conseguir un mejor rendimiento de la combustión, especialmente al quemar combustibles de peor calidad. Estas variaciones están sujetas a una serie de restricciones, y en particular deben mantenerse los caudales y presiones requeridos en las centrales térmicas. El proceso de diseño requiere un estudio detallado en modelos a escala, que simplifican y facilitan los ensayos y las medidas, pero exige como paso final, la fabricación y caracterización de boquillas de escala industrial, de modo que se asegure su funcionamiento en las condiciones de trabajo, es decir, con caudales elevados (toneladas por hora) y a las presiones reales de trabajo (en torno a los 10 bar). Este tipo de estudios excede normalmente las capacidades de la mayoría de las instalaciones experimentales que normalmente se califican como “de laboratorio”. Sin embargo, las medidas realizadas en las centrales en las condiciones reales de trabajo suelen ser poco precisas, y generalmente insuficientes para permitir un proceso de optimización de diseños.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

En cuanto a los diseños de las boquillas en sí, han de tenerse en cuenta aspectos no sólo científicos, sino también tecnológicos y económicos. Su fabricación no debe resultar excesivamente difícil ni tampoco cara. Un dispositivo demasiado complejo aumenta la posibilidad de desajustes y fallos y, en general, dificulta el mantenimiento y las posibles reparaciones. Por otro lado, puesto que va a utilizarse con fluidos muy viscosos, hay que procurar que no se obture, y que de hacerlo, la misma pueda desmontarse y limpiarse con facilidad. La mezcla de combustible y gas auxiliar es determinante para el funcionamiento de la boquilla, aunque los detalles del flujo en el interior de estos dispositivos se han estudiado poco y son, por tanto, poco conocidos. Como muestra de este tipo de atomizadores, pueden consultarse las patentes de Hayne y McDonald. (1922), Mitchel, y Cunningham. (1965), Reich, (1981), la más reciente de Strupp y Chung I-P. (2001), y los trabajos de Jicha y colaboradores (2003).

En los últimos años el grupo de investigadores del Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC) ha trabajado en el desarrollo de boquillas para la atomización de líquidos muy viscosos (Barreras y col. 2006, Ferreira y col. 2009a, 2009b), con orientación preferente a su uso en centrales térmicas en las que se queman de manera eficaz hidrocarburos pesados de baja calidad, aunque podrían aplicarse a usos alternativos, como la atomización de pinturas, betunes, etc. Como se ha adelantado ya, y se describirá en detalle posteriormente, estas boquillas presentan un diseño novedoso en el que dos piezas separadas se acoplan para formar un atomizador con una cámara de mezcla interna que posibilita la mezcla intensiva del gas y el líquido antes de la descarga. Esta novedad, además de mejorar las facilidades para el mantenimiento de las boquillas, posee la ventaja de reducir la cantidad de fluido auxiliar necesario para lograr la misma calidad de atomización en comparación con los modelos de tipo "Y". Se han probado ya varios prototipos en una amplia gama de condiciones de funcionamiento, obteniéndose muy buenas calidades de atomización.

Al ser boquillas de doble fluido, su funcionamiento depende de las condiciones de operación y en particular de los flujos y las presiones del líquido y el gas. Por ello es de interés obtener relaciones adimensionales que incluyan estos parámetros y permitan predecir los resultados que van a obtenerse cuando se produzcan variaciones de los mismos.

3. Instalación experimental de atomización

En este capítulo se describe la instalación de laboratorio donde se realizan las pruebas de la boquilla en estudio.

En la Figura 3.1 se muestra una fotografía de la instalación experimental de atomización.

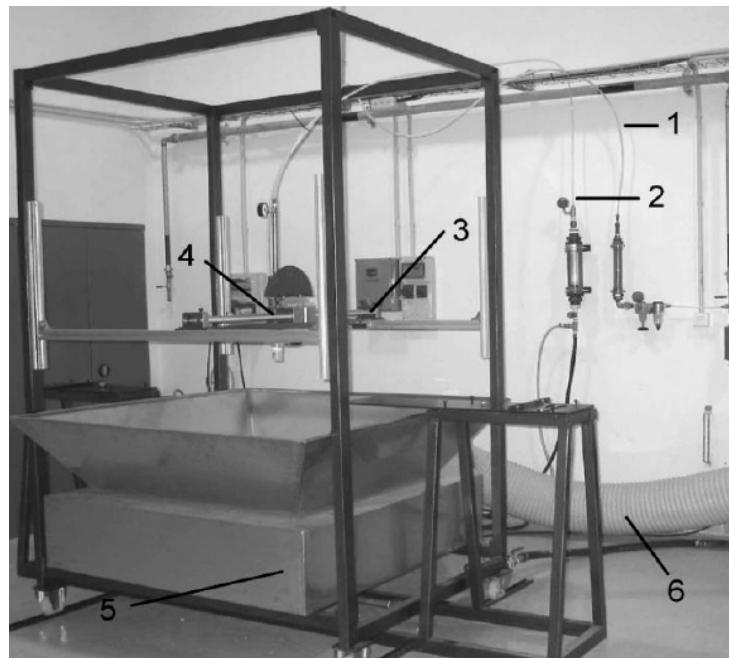


Figura 3.1: Imagen de la instalación experimental: 1) Circuito de aire; 2) Circuito de agua; 3) Sistema de desplazamiento; 4) Sistema de sujeción del atomizador; 5) Campana recolectora de gotas; 6) Tubo flexible que conecta la campana con el ventilador extractor.

La instalación experimental está soportada en una estructura metálica de 1500x1500x2500 mm (largo por ancho por alto). Esta estructura sirve para sujetar y posicionar la boquilla y para albergar el sistema de drenaje. La instalación en su conjunto está dividida en cuatro partes:

- Sistema de aire
- Sistema de agua
- Sistema de sujeción y desplazamiento del atomizador
- Sistema de drenaje.

3.1. Sistema de aire

El aire se suministra mediante un compresor Ingersoll-Rand SSR-ML 22 con una potencia nominal de 22 kW capaz de impulsar un caudal máximo de 100 Nm³/h con una presión máxima de 8 bar.

Este sistema permite trabajar con diferentes flujos de aire para cada caudal de agua establecido. En cada condición experimental es posible medir con suficiente exactitud la presión del aire mediante un manómetro con una sensibilidad de 0.1 bar. El caudal del aire se mide, dependiendo del flujo empleado, con un par de rotámetros montados en paralelo (ver Figura 3.2). Uno de los rotámetros, de la marca TECFLUID, posee un rango de escala de 10 a 100 Nm³/h y una sensibilidad de 2 Nm³/h. El otro es de la misma marca y posee un rango de trabajo mayor (0 a 8 Nm³/h) y una sensibilidad de 0,2 Nm³/h. La entrada del aire se controla con una válvula de alimentación y otras dos válvulas que permiten seleccionar el rotámetro de medición en función del caudal de aire requerido. Para caudales de aire inferiores a 8 Nm³/h se emplea el rotámetro de menor rango con el objetivo de aumentar la precisión de la medida. Sin embargo, para asegurar la precisión de las medidas, en estos experimentos se ha controlado además el flujo de aire mediante un caudalímetro másico previo a los rotámetros.



Figura 3.2: Rotámetros de aire montados en paralelo.

Para medir la presión del aire se utilizan dos manómetros. El manómetro de mayor rango con sensibilidad de 1 bar se emplea para presiones mayores de 4 bar. El manómetro de menor rango con sensibilidad de 0.1 bar se emplea para bajas presiones. Se debe prestar especial atención para no dañar el manómetro de menor rango, que solo debe habilitarse con la válvula para presiones inferiores a 4 bar. Este sistema de

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

medición de baja presión se incorpora a la instalación experimental como parte de este PFC, para poder precisar las medidas a baja presión. Con este nuevo sistema de medida se han detectado diferencias de hasta 0.3 bar con respecto a la medida del manómetro de mayor rango en la zona de bajas presiones (ver Figura 3.3).



Figura 3.3: Manómetro de mayor rango (abajo) y manómetro de menor rango (arriba)

3.2. Sistema de agua

El agua se toma de una cisterna a través de la bomba cuyas características se explican a continuación:

- **Fabricante:** Deloule
- **Modelo:** GE105/900
- **Velocidad:** 1725 rpm
- **Voltaje:** 380 V
- **Máxima presión:** 105 bar
- **Velocidad máxima de flujo volumétrico:** 18.2 l/min.

En la Figura 3.4 se muestran una foto del sistema de bombeo.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido



Figura 3.4: Bomba Deloule

El sistema de bombeo permite trabajar con diferentes flujos de agua para cada caudal de aire establecido. El caudal del agua se mide con un rotámetro (ver Figura 3.5), que posee un rango de escala de 0 a 1500 l/h y una sensibilidad de 50 l/h. Dado que la bomba es de alta presión, pese a tenerla limitada mediante un presostato, para evitar sobrepresiones al cerrar la válvula del rotámetro, la instalación se ha diseñado de modo que el agua se recircula continuamente a un depósito. El caudal derivado al rotámetro se regula mediante una válvula en el circuito de recirculación manteniendo la válvula del rotámetro siempre totalmente abierta.



Figura 3.5: Rotámetro de agua

Para medir la presión del agua, se utiliza un manómetro con rango de 6 bar y sensibilidad de 0.1 bar (ver Figura 3.6).

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido



Figura 3.6: Manómetro

3.3. Sistema de sujeción y desplazamiento del atomizador

Dependiendo del objetivo del experimento es necesario desplazar o inclinar la boquilla, así que la instalación posee un sistema de fijación que permite mover y girar las boquillas a estudiar. El sistema de fijación está acoplado a la estructura metálica y puede ser desplazado verticalmente, deslizando las barras de soporte a lo largo de los cuatro pilares de la estructura metálica, que se fija en su posición mediante tornillos M6. El sistema también puede desplazarse horizontalmente gracias a un engranaje de tipo tornillo, y por último la inclinación de la boquilla también puede ser ajustable a través del sistema que se muestra en la Figura 3.7.

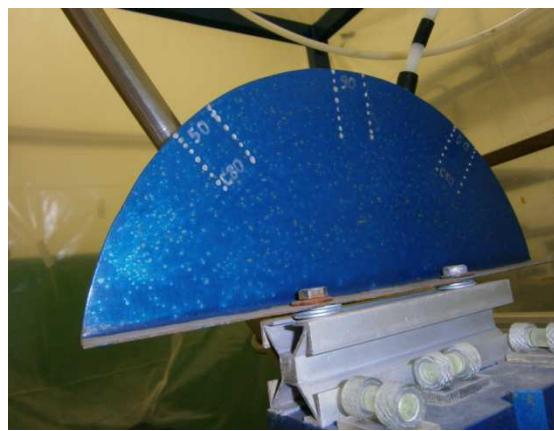


Figura 3.7: Bancada con sistema de desplazamiento.

3.4. Sistema de drenaje

El aerosol procedente del atomizador se descarga en un recipiente de extracción diseñado para eliminar las perturbaciones que puede ocasionar la propia extracción sobre el aerosol durante el experimento.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

En la Figura 3.8 se muestra una fotografía del sistema de extracción.



Figura 3.8: Sistema de extracción.

El contenedor tiene la forma de una pirámide truncada e invertida con una base de menor área, en la parte inferior, como se ve en la Figura 3.9 con sus medidas correspondientes. En la figura también se muestra el orificio que se utiliza para la extracción del agua. En cada uno de los cuatro lados de la pirámide hay sendas aberturas triangulares empleadas para la succión del aire mediante un ventilador modelo HXB/4-450/36 S&P a 1400 rpm. De esta forma se garantiza que las perturbaciones al proceso de pulverización sean las menores y se evita la recirculación del aire y de las pequeñas gotas de agua a la zona de medida de su tamaño. Estas aberturas tienen diferentes secciones transversales que permiten garantizar un correcto balance de la cantidad de aire succionado por cada pared.

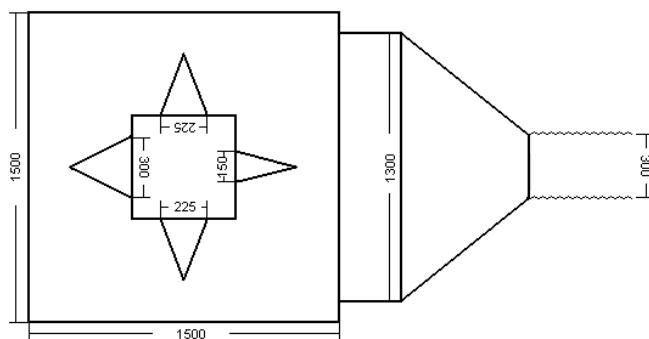


Figura 3.9: Croquis del contenedor

Es importante destacar que las dimensiones de la estructura del bastidor se han calculado considerando una amplia variedad de características geométricas de pulverización, para disponer de suficiente espacio libre para que las trayectorias de las pequeñas gotas queden confinadas al interior del marco metálico.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

De forma adicional se dispone de un selector de chorro como se aprecia en la Figura 3.10, que sirve para seleccionar solamente una de las salidas del atomizador, sin afectar al resto. En este PFC este dispositivo se ha utilizado para evitar que las gotas del spray salpiquen los instrumentos de medición que rodean el banco experimental. También se emplean unas cortinas de plástico, tal como se ve en la Figura 3.10, como prevención adicional, ya la instalación está rodeada de aparatos bastante delicados como un láser, un difractómetro Malvern, ordenadores, etc.



Figura 3.10: Selector de chorro y cortinas de plástico.

3.5. Atomizador

El conjunto del atomizador está formado por una pieza interior y otra exterior, tal y como se muestra en la Figura 3.11. De la misma forma, en la Figura 3.12 se pueden ver diferentes imágenes donde se observan las diferentes piezas y cómo queda montado el selector de orificios.

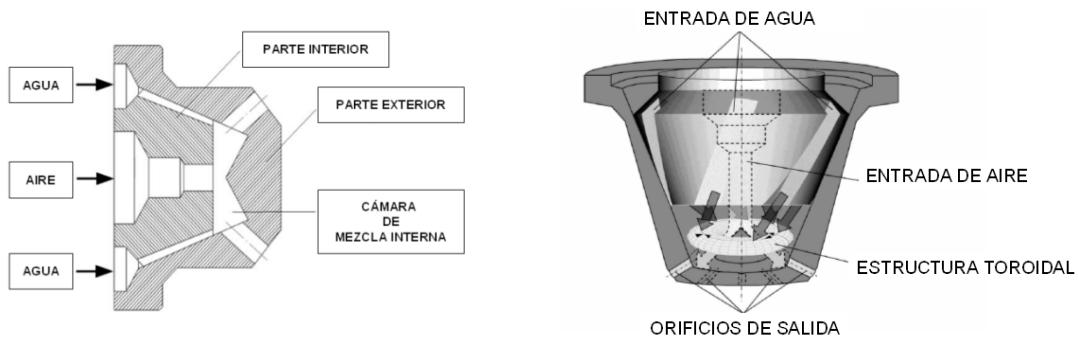


Figura 3.11: Conjunto de las piezas interior y exterior del atomizador.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

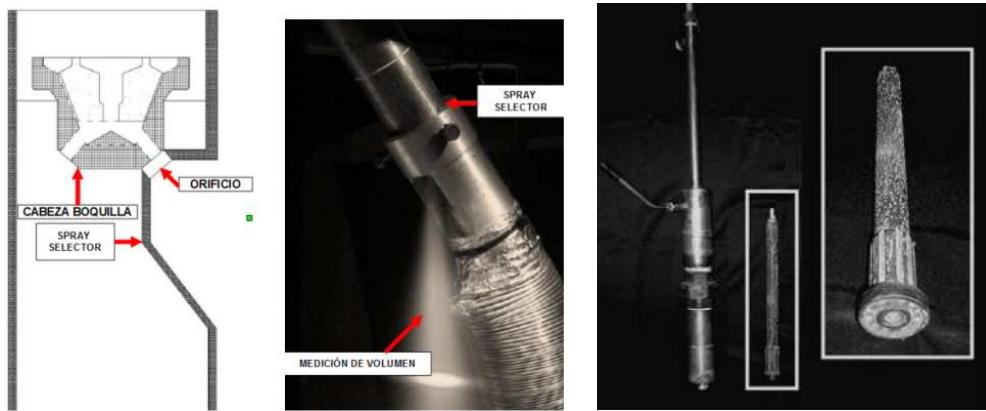


Figura 3.12: Imágenes del atomizador

La pieza interior (Figura 3.13) tiene una forma de cono truncado con 6 ranuras exteriores de sección rectangular que introducen el agua en la cámara de mezcla creando una estructura vortical en forma de toroide (ver imagen derecha de la Fig. 3.11). Esta pieza también posee un orificio central por donde se suministra el aire al interior de la cámara de mezcla.

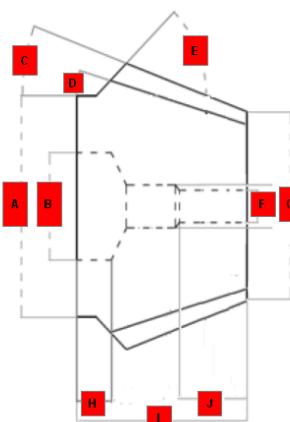
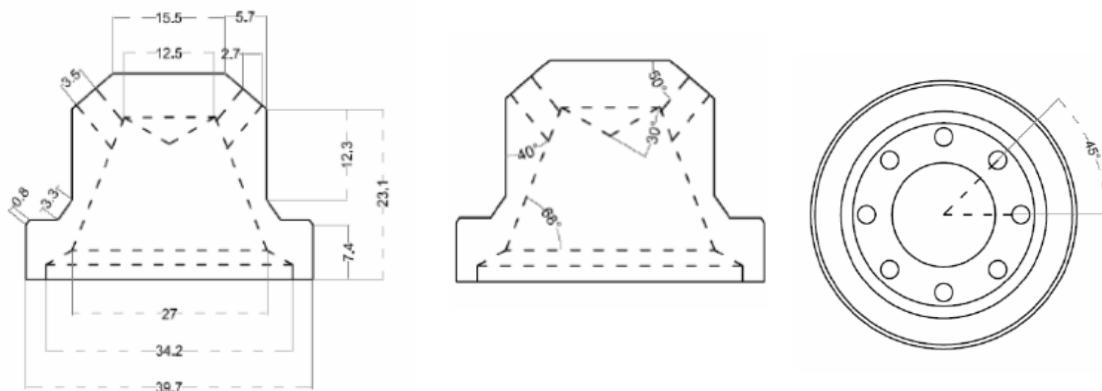


Figura 3.13: Croquis de la pieza interior

Un esquema con diferentes vistas de la pieza exterior con sus principales medidas se muestra en la Figura 3.14.



Corte longitudinal

Vista desde la zona de salida

Figura 3.14: Croquis de la pieza exterior

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Para realizar algunos experimentos fue necesario cortar una de las piezas exteriores de forma que parte de la pieza interior quedase al descubierto. Un esquema se muestra en el Figura 3.15).

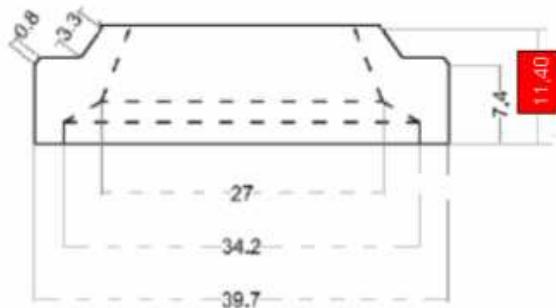


Figura 3.15: Pieza exterior recortada

Para la realización de los experimentos, se emplean varios tipos de boquillas (piezas interiores) con medidas diferentes. En las Tablas 3.1 a 3.4 se muestran las medidas de las diferentes boquillas ensayadas.

Tabla 3.1: Medidas para la pieza I (Pieza gris normal)

LETRA	MEDIDA
A	20.60 mm
B	14.00 mm
C	22°
D	18°
E	45°
F	4 mm
G	17.25 mm
H	3.50 mm
I	16.30 mm
J	8.00 mm

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Tabla 3.2: Medidas para la pieza II (pieza marrón larga)

LETRA	MEDIDA
A	20.60 mm
B	13.70 mm
C	22°
D	18°
E	45°
F	4 mm
G	21.00 mm
H	2.90 mm
I	11.25 mm
J	3.85 mm

Tabla 3.3: Medidas para la pieza III (pieza marrón media)

LETRA	MEDIDA
A	20.60 mm
B	13.95 mm
C	22°
D	18°
E	45°
F	9 mm
G	26.50 mm
H	3.50 mm
I	7.50 mm
J	3.50 mm

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Tabla 3.4: Medidas para la pieza IV (pieza marrón corta)

LETRA	MEDIDA
A	20.60 mm
B	13.85 mm
C	22°
D	18°
E	45°
F	9 mm
G	26.70 mm
H	3.50 mm
I	5.40 mm
J	1.50 mm

Para calcular el área de la ranura de la boquilla se utilizan las dimensiones que se muestran en la Figura 3.16 y en las Tablas 3.5 a 3.7.

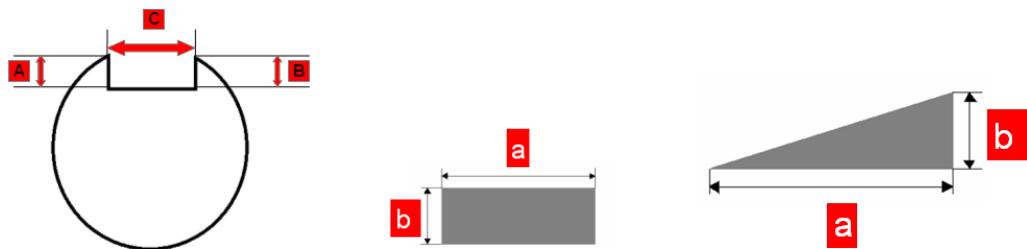


Figura 3.16: Medidas para el cálculo del área de flujo.

El área de la sección transversal se determina por la siguiente ecuación:

$$\text{Área total} = \text{Área del rectángulo} + \text{Área del triángulo}$$

$$A_T = [(a * b) + (\frac{b * h}{2})]$$

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Tabla 3.5:

Dimensiones de las ranuras
de agua para la pieza II

LETRA	MEDIDA
A	1.9 mm
B	2.1 mm
C	3.5 mm

Tabla 3.6:

Dimensiones de las ranuras
de agua para la pieza III

LETRA	MEDIDA
A	3.5 mm
B	4 mm
C	3.5 mm

Tabla 3.7:

Dimensiones de las ranuras
de agua para la pieza IV

LETRA	MEDIDA
A	3 mm
B	4 mm
C	3.5 mm

3.6. Procedimiento de operación

Para poder realizar los experimentos en esta instalación se deben cumplir un procedimiento sistemático de encendido y apagado que posee una serie de pasos de obligado cumplimiento.

Sistema de encendido

Para el uso correcto de la instalación es necesario cumplir con el procedimiento de puesta en marcha que se describe a continuación:

1. Extender el tubo flexible de 45 metros de longitud con diámetro interior de 25 mm y conectarlo mediante una abrazadera a la toma de aire comprimido, como se muestra en la Figura 3.17



Figura 3.17: Tubo flexible. Abrazadera y toma de aire comprimido

2. Encender el caudalímetro másico en el panel situado en la sala de control que se muestra en la Figura 3.18

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido



Figura 3.18: Caudalímetro másico situado en la sala de control

3. Conectar las dos fuentes de alimentación en el panel de control. (ver Fig. 3.19)



Figura 3.19: Botones de las dos fuentes de alimentación del panel de control

4. Cambiar a la posición activada el botón “AIRE 3 $\underline{\Omega}$
5. Poner la consigna del caudalímetro de aire en el 50 % del rango de la escala.

Ver Figura 3.20



Figura 3.21: Caudal aire

6. Abrir la válvula de aire en la toma donde se conecta el tubo flexible para permitir la entrada de aire a la instalación de atomización (ver Figura 3.21)

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido



Figura 3.21: Apertura de la válvula de aire

7. Conectar y encender el termopar de la línea de aire comprimido (Figura 3.22)



Figura 3.22: Termómetro electrónico

8. Encender el panel electrónico del banco de ensayos de atomizadores que se muestra en la Figura 3.23



Figura 3.23: Panel electrónico

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

- 9.** Comprobar que la válvula de recirculación del agua está completamente abierta
- 10.** Conectar la bomba de agua
- 11.** Conectar el extractor de aire (ventilador de extracción)
- 12.** Abrir al máximo la válvula del caudalímetro de agua de mayor rango ubicada a la derecha
- 13.** Regular el caudal con la válvula de agua de la izquierda hasta fijar el valor de medida correspondiente (ver Figura 3.24)



Figura 3.24: Válvula roja de la izquierda

- 14.** Abrir al máximo la válvula roja
- 15.** Fijar el caudal de aire con la válvula negra (Figura 3.25).



Figura 3.25: Válvula negra a la izquierda

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Sistema de apagado

Al finalizar las mediciones es necesario seguir el siguiente procedimiento para apagar la instalación:

- 1.** Abrir completamente la válvula de recirculación del agua
- 2.** Cerrar la válvula del rotámetro del agua
- 3.** Apagar el botón de la bomba
- 4.** Apagar el botón del extractor
- 5.** Apagar la fuente de alimentación del panel eléctrico
- 6.** Desconectar el termómetro electrónico
- 7.** Poner a 0 % el caudalímetro de aire en la sala de control
- 8.** Esperar a que la presión en la línea baje a cero
- 9.** Cerrar la válvula
- 10.** Ir a la sala de control para apagar el caudalímetro mísico de aire pulsando el botón “AIRE 3o” y desconectando las dos fuentes de alimentación
- 11.** Cerrar la válvula de aire de la manguera conectada
- 12.** Desconectar y recoger la manguera.

4. Descripción y resultados de los experimentos

En este apartado se describen los experimentos realizados para la caracterización del dispositivo de atomización.

Se realizan varios conjuntos de experimentos denominados “pruebas”. En los siguientes epígrafes se describen las diferentes pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

4.1. Prueba para corregir las presiones de aire bajas

La comparación del caudal de aire medido por el Dr. Germán Ferreira en su Tesis con los valores teóricos, obtenidos por simulación 1D para esta boquilla, muestra algunas inconsistencias, ya que en ocasiones el flujo másico de aire medido supera al máximo que teóricamente puede salir por un orificio en condiciones isoentrópicas.

Los primeros estudios realizados se dedican a la comprobación de la precisión de la instrumentación del banco de pruebas de atomizadores. En particular estos ensayos se emplean para cuantificar la incertidumbre de la medida de la presión del aire en la zona de bajas presiones. Para realizar esta prueba se ha tomado la pieza interior II (ver Figura 3.13 y Tabla 3.2) y la pieza exterior no recortada.

Se parte de la siguiente hipótesis: “atendiendo al rango y la sensibilidad del manómetro instalado en la línea de aire, las incertidumbres de los valores de presión medidos a presiones bajas deben ser elevadas”.

El manómetro de aire instalado en el banco de pruebas posee un rango de 0-10 kg/cm², así que se instala un nuevo manómetro de rango 0-4 kg/cm² y mayor sensibilidad, que permita medir por duplicado la presión en la zona de baja presión. En la Tabla 7.1 de los Anexos se muestran las medidas realizadas.

En la Figura 4.1 se muestra la relación existente entre las presiones medidas en los dos manómetros. Como se puede apreciar, la coincidencia es casi total en la zona de presiones mayores que 0.5 bar, pero para presiones inferiores a 0.5 bar el manómetro antiguo no detecta presión, mientras que el de menor rango sí.

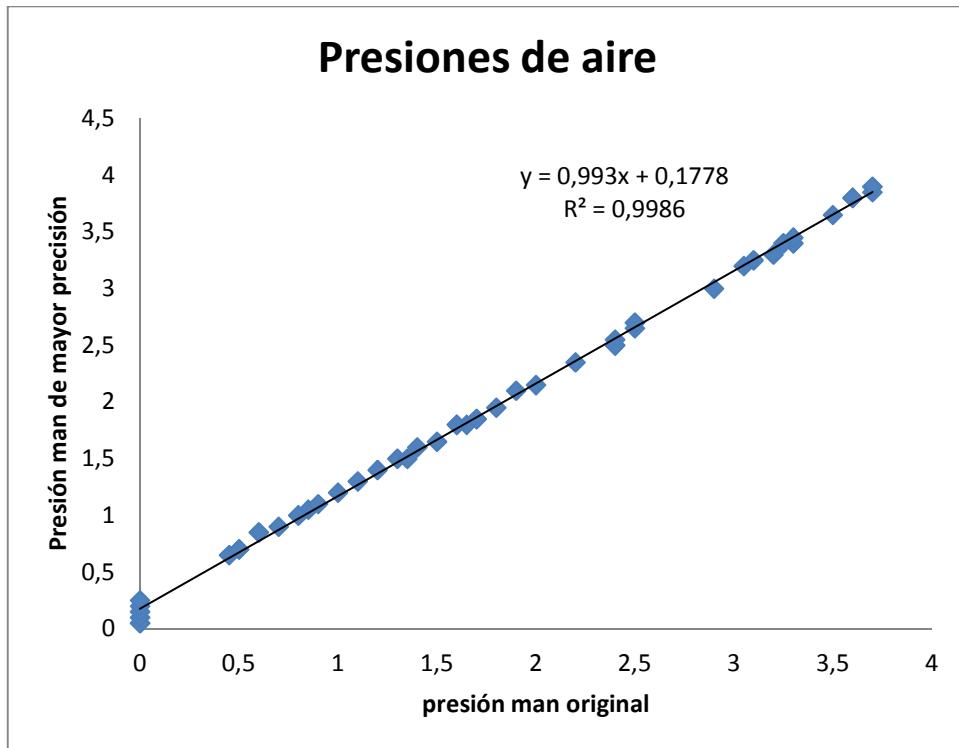


Figura 4.1: Relación entre la presión del manómetro original y la del nuevo manómetro instalado de mayor precisión

Para corregir el error de la medida de la presión en la zona de bajas presiones se ajusta un modelo estadístico lineal con un adecuado coeficiente de correlación ($R^2 = 0.9986$, ver Figura 4.1) que relaciona la presión del manómetro instalado en el banco con la presión real que mediría un manómetro de mayor precisión. Este es,

$$p_{a_corr} = 0.993p_{a_med} + 0.1778 \quad \text{kg/cm}^2 \quad (4.1)$$

Con esta ecuación se pueden corregir los valores de la presión del aire medidos con el manómetro del banco de pruebas de atomizadores para presiones en el rango de 0.5 kg/cm^2 a 3.9 kg/cm^2 .

4.2. Prueba para corregir el caudal de aire medido con el rotámetro

La corrección de la presión del aire por la ecuación (4.1) no elimina las inconsistencias ya comentadas en el flujo de aire medido en pruebas anteriores. Se considera que debe existir otro factor para que algunos valores del flujo máscico medidos sean superiores al máximo teórico para la presión de aire establecida.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

La hipótesis para estas pruebas es que: “las ecuaciones para determinar el flujo másico de un gas mediante un rotámetro son diversas y se pueden cometer errores de cálculo con frecuencia”.

Para comprobar esta hipótesis se instaló un caudalímetro másico para medir por duplicado el flujo másico de aire. Estas medidas también se realizaron con la pieza interior II (ver Figura 3.13 y Tabla 3.2) y la pieza exterior no recortada. En la Tabla 7.1 de los Anexos se muestran los resultados obtenidos en estos experimentos. Se puede apreciar que el caudal normal medido con el rotámetro difiere del medido con el caudalímetro másico. Cuando se trabaja en condiciones diferentes de la normales es necesario aplicar la corrección que indica el fabricante para determinar el caudal normal en el rotámetro,

$$Q_G[Nm^3/h] = Q_{G_medido}[Nm^3/h] \sqrt{\left(\frac{p+p_{atm}}{p_{calibración}+p_{atm}}\right) \left(\frac{T_{calibración}}{T}\right)} \quad (4.2)$$

Las presiones y temperaturas son absolutas en Pa y K, respectivamente. La presión de calibración es 3 kg/cm² manométrica (395525 Pa absoluta) y la temperatura de calibración es 20°C (293.15K).

Para determinar el flujo másico se emplea la siguiente ecuación,

$$\dot{m}_G = \rho_N \frac{Q_G[Nm^3/h]}{3600} = \frac{p_N}{R_a T_N} \frac{Q_G[Nm^3/h]}{3600} \quad \text{kg/s} \quad (4.3)$$

Donde:

$$p_N = 101325 \text{ Pa}$$

$$T_N = 273.15 \text{ K}$$

$$R_a = 287 \text{ J/(kgK)}$$

Sustituyendo la ec. (4.2) en la (4.3) se tiene,

$$\dot{m}_G = \frac{p_N}{R_a T_N} \frac{Q_{G_med}[Nm^3/h]}{3600} \sqrt{\left(\frac{p+p_{atm}}{p_{calibración}+p_{atm}}\right) \left(\frac{T_{calibración}}{T}\right)} \quad \text{kg/s} \quad (4.4)$$

y sustituyendo finalmente los valores se obtiene que,

$$\dot{m}_G = \frac{Q_{G_med}[Nm^3/h]}{3600} \frac{101325}{273.15(287)} \sqrt{\left(\frac{p}{395525}\right) \left(\frac{293.15}{T}\right)} \quad \text{kg/s} \quad (4.5)$$

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

En la ecuación (4.5), la p y la T son, respectivamente, la presión y la temperatura absolutas medidas en los experimentos. Se ha comprobado que una variación de $\pm 5^\circ$ en la temperatura no afecta a los resultados obtenidos.

Con estas pruebas se pudo comprobar que existía un error en los cálculos de flujo másico en las medidas anteriormente realizadas para esta boquilla, ya que se tomó la presión normal en lugar de la presión de calibración en la ecuación (4.4).

En la Tabla 7.1 de los Anexos también se muestran los resultados obtenidos al corregir el caudal del rotámetro por la ecuación (4.2).

4.3. Prueba para determinar la presión en la cámara de mezcla

Otro aspecto que debe estudiarse con mayor profundidad en estas boquillas es el referente a las condiciones para que se produzca el bloqueo de la tobera de aire que descarga en la cámara de mezcla. A esta prueba se le denomina Prueba 2.

Se podría considerar que el proceso es adiabático reversible (isoentrópico) y que la tobera se bloquea para número de Mach igual a 1 en la salida, pero las pérdidas por irreversibilidad no son despreciables y el error será elevado. Además se ha comprobado que la tobera se bloquea para flujos de aire inferiores al flujo sónico isoentrópico.

Estas pruebas consisten en realizar 8 mediciones para diferentes caudales de agua sin emplear el caudal del aire con la pieza exterior recortada y cuatro variantes de piezas interiores. En cada experimento se evalúa un rango de caudal de agua desde 200 l/h hasta 900 l/h con incrementos de 100 l/h.

Los valores medidos en la prueba 2 para la pieza interior II (larga, con una longitud de 11.25 mm) se muestran en la Tabla 7.2 de los Anexos, mientras que los valores medidos para las piezas interiores III (media, con una longitud de 7.5 mm) y IV (corta, con una longitud de 5.4 mm) se muestran en las Tablas 7.3 y 7.4, respectivamente. Por último, los valores medidos sin pieza interior se muestran en la Tabla 7.5 de los Anexos. La configuración geométrica de cada una de las piezas interiores se puede analizar en las Tablas 3.5 a 3.6 y la Figura 3.16. En la Figura 4.2 se muestran de forma gráfica los resultados obtenidos en este experimento.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

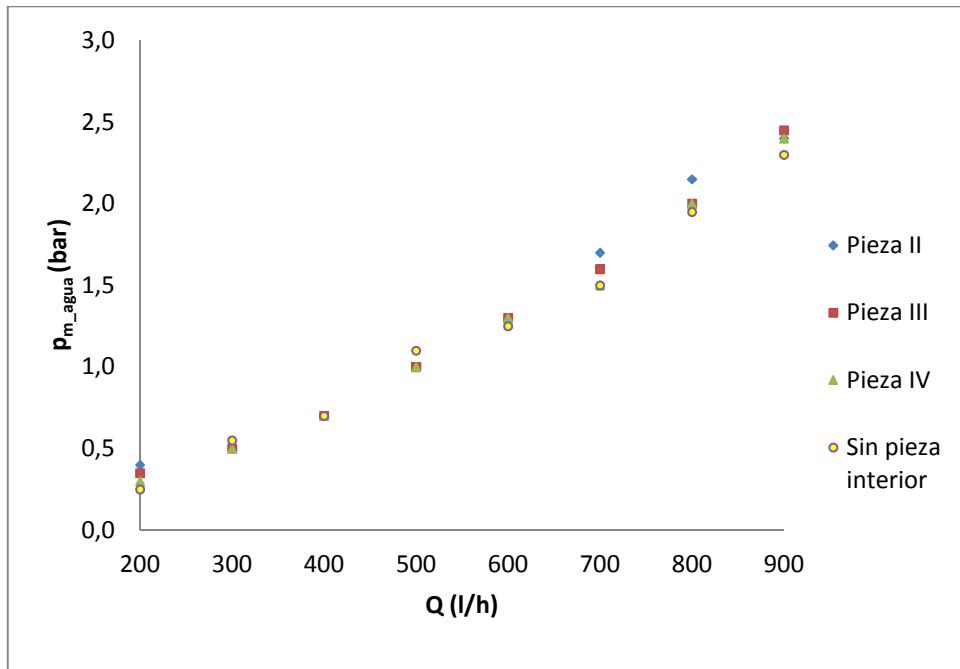


Figura 4.2: Resultados de la prueba 2

Como se puede apreciar en la Figura 4.2, en la medida que se reduce la longitud de la pieza interior disminuye la presión necesaria para que el agua pueda vencer las pérdidas de carga en toda la línea y en la boquilla. La configuración de la boquilla en esta prueba permite evaluar la pérdida que existe entre la toma de presión del agua a la entrada del banco y la presión de descarga. Es importante puntualizar que, al recortar la pieza exterior (eliminando la cámara de mezcla) se consigue que los canales de agua, que en la boquilla original descargan a la cámara de mezcla, salgan como chorros libres a presión atmosférica. De esta manera, la presión manométrica medida a la entrada será igual a las pérdidas de presión en todo el recorrido de agua desde la ubicación del manómetro. En el caso de operación real de la boquilla, la presión de descarga de los chorros de agua sería la presión en la cámara.

Así pues, con las medidas de esta prueba para diferentes caudales de agua se logra determinar la presión manométrica necesaria para que un cierto caudal de agua llegue hasta la cámara. Con los datos geométricos del circuito, las presiones y caudales medidos para diferentes geometrías de boquilla se puede obtener el coeficiente de pérdida de la boquilla (k_{Boq}) a través de la ecuación de la energía mecánica

$$p_{1man} + \rho g H + \rho \frac{V_1^2}{2} - \left(f \frac{L}{d} + k_{codo} \right) \rho \frac{V_1^2}{2} - k_{Dist} \rho \frac{V_1^2}{2} - k_{Boq} \rho \frac{V_2^2}{2} = \rho \frac{V_2^2}{2} \quad (4.6)$$

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Como se realizan experimentos con diferentes longitudes de la pieza interior de la boquilla (piezas II, III y IV) e incluso una variante solo con el distribuidor, es decir, sin pieza interior, en principio se podría determinar el coeficiente de pérdidas en la boquilla en función de su longitud y el coeficiente del distribuidor (k_{Dist}).

Primero se trabaja con las medidas sin pieza interior (solo el distribuidor), así que el último término de la parte izquierda de la ec. (4.6) se anula y despejando se obtiene,

$$k_{Dist} = \frac{\frac{2p_1man}{\rho} + 2gH + (1 - f_d^L - k_{codo})V_1^2 - V_2^2}{V_1^2} \quad (4.7)$$

El subíndice 1 se refiere a la entrada del agua al sistema (es decir el punto donde se mide la presión y el caudal), mientras que el subíndice 2 se refiere a la descarga de los canales de agua (cámara de mezcla en el caso real, y presión atmosférica en estas pruebas según el montaje experimental realizado). Se ha considerado que sólo existe un codo de radio largo con $k = 0.6$.

Los resultados obtenidos para el coeficiente de pérdidas del distribuidor se muestran en la Figura 4.3.

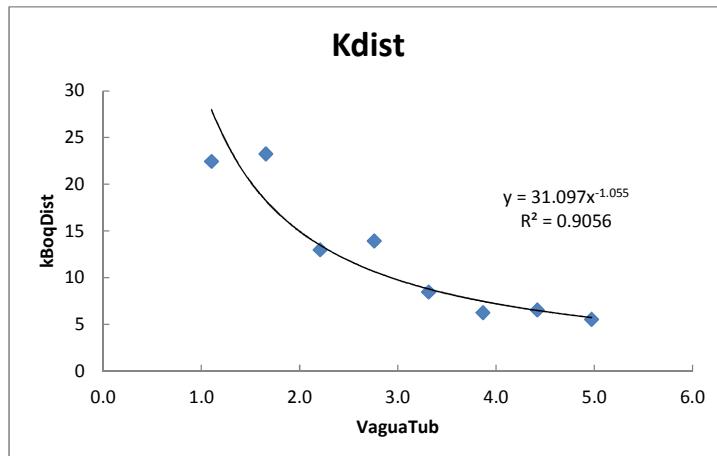


Figura 4.3: Comportamiento del coeficiente de pérdidas de carga en el distribuidor con la velocidad

El coeficiente de correlación del modelo exponencial es adecuado, pero al calcular la pérdida de carga general para varios caudales de las boquillas con pieza interna el valor obtenido es mayor que el salto medido, lo que es imposible.

Por ello, se considera que la calidad del modelo estadístico obtenido no es suficiente y se opta por obtener un modelo con un mayor coeficiente de correlación, utilizando un buscador de la curva que mejor se ajusta a los datos, obteniéndose que el mejor modelo es el de Weibull con coeficiente de regresión $R = 0.972$. La ecuación resultante es,

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

$$k_{Dist} = 23.1744393818 - 18.5381934121e^{-12.9469761803(v_1)^{-3.33566599428}} \quad (4.8)$$

En la Figura 4.4 se muestra el ajuste realizado.

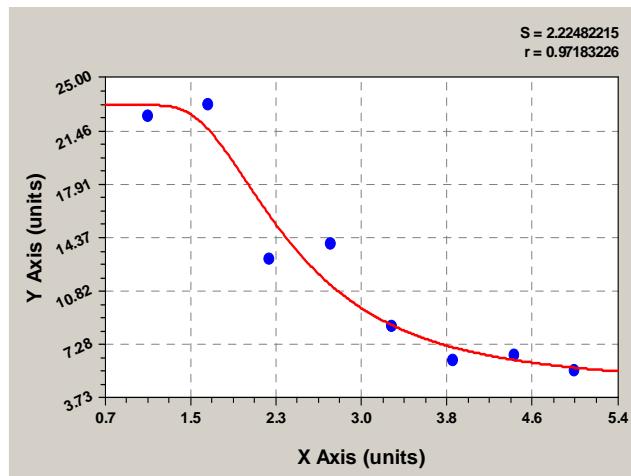


Figura 4.4: Mejor ajuste para el coeficiente de pérdidas en el distribuidor

Incluso con este modelo que tiene mejor coeficiente de correlación, los resultados no son adecuados al restar el valor obtenido a la pérdida total para obtener la pérdida solo en la boquilla (en muchos casos se obtienen valores negativos de pérdidas en boquilla). Es posible que la explicación de este hecho esté en que el distribuidor se comporta de forma diferente (en cuanto a pérdidas de carga) cuando está solo que cuando se combina con la pieza interior de la boquilla. Para solucionar este problema se ha decidido determinar el modelo de pérdidas del distribuidor y pieza interna en conjunto. En estas nuevas condiciones la ecuación de la energía mecánica queda,

$$p_{1man} + \rho g H + \rho \frac{V_1^2}{2} - \left(f \frac{L}{d} + k_{codo} \right) \rho \frac{V_1^2}{2} - k_{Boq} \rho \frac{V_2^2}{2} = \rho \frac{V_2^2}{2} \quad (4.9)$$

Así, se evaluó la pérdida de carga para tres longitudes diferentes de la pieza interna, la normal (pieza interna II), la denominada larga con una longitud de 11.25 mm y un área de flujo de 44.1 mm², y las otras dos recortadas, la primera denominada media (pieza interna III) con una longitud de 7.5 mm y un área de flujo de 69.68 mm² y la segunda (pieza interna IV) con longitud de 5.4 mm y un área de flujo de 84 mm².

La razón de área de flujo entre la salida y la entrada es $A_2/A_1 = 0.2773$ para la pieza interna larga, 0.4381 para la pieza interna media y 0.5282 para la pieza interna corta, donde A_1 es el área de flujo del distribuidor.

En la Figura 4.5 se muestran los valores de pérdidas obtenidos para los tres tipos de boquilla.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

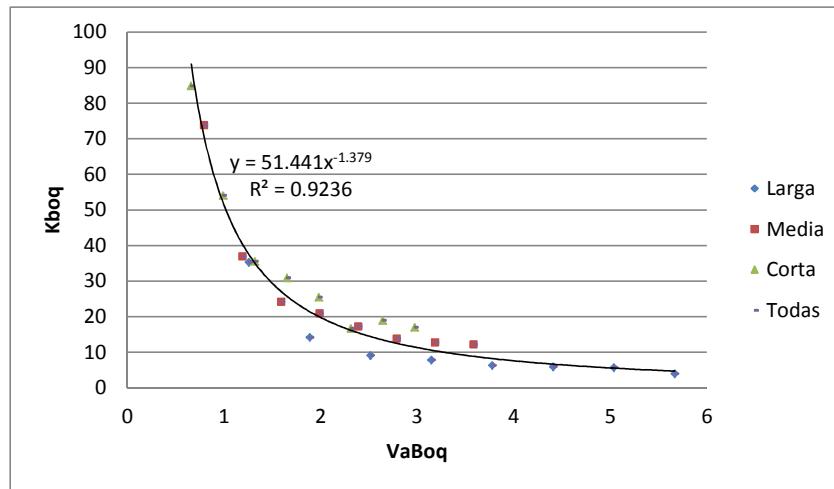


Figura 4.5: Comportamiento del coeficiente de pérdidas de carga en la boquilla con la velocidad

Tratando de encontrar el mejor coeficiente de regresión se ha ajustado el modelo en función del número de Reynolds y del parámetro adimensional de forma $\left(\frac{L^2}{A}\right)$ con el software STATGRAPHIC, obteniéndose una correlación de 96.6%.

$$k_{Boq} = \frac{e^{13.5278}}{\left(\frac{L^2}{A}\right)^{0.244331} Re_{Boq}^{1.22719}} \quad (4.10)$$

Lo que es lo mismo que,

$$k_{Boq} = \frac{749978.636169911}{\left(\frac{L^2}{A}\right)^{0.244331} Re_{Boq}^{1.22719}} \quad (4.11)$$

Si se utiliza solamente el número de Reynolds en el ajuste, el coeficiente de correlación disminuye hasta el 91.8% y el modelo resulta

$$k_{Boq} = \frac{4039372.839}{(Re_{Boq})^{1.41917}} \quad (4.12)$$

Con el buscador de curvas del CurvExpert se obtiene que

$$k_{Boq} = \frac{2355129.62}{(Re_{Boq})^{-1.35}} \quad (4.13)$$

Con un coeficiente de correlación de 0.98. En la Figura 4.6 se muestra la calidad de este ajuste.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

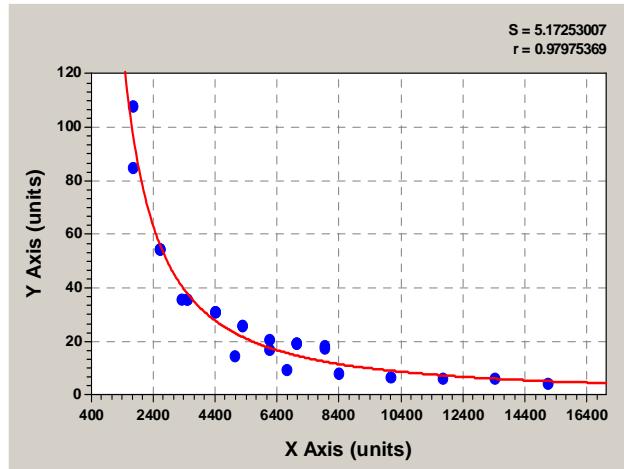


Figura 4.6: Mejor ajuste para el coeficiente de pérdidas en la boquilla

A pesar de la calidad del ajuste estadístico, la ec. (4.13) subestima demasiado el coeficiente de pérdidas k_{Boq} para números de Reynolds elevados y los resultados de bloqueo no coinciden con lo observado en los experimentos.

Con la ecuación del coeficiente de pérdidas para la boquilla y distribuidor en conjunto, considerando el Reynolds y el parámetro de forma (ec. 4.11), se puede determinar la presión en la cámara de mezcla por la siguiente ecuación:

$$p_{cam} = p_1 + \rho g H + \left(1 - f \frac{L}{d} - k_{codo}\right) \rho \frac{V_1^2}{2} - (k_{Boq} + 1) \rho \frac{V_{Boq}^2}{2} \quad (4.14)$$

Una vez determinada la presión en la cámara de mezcla, se puede comprobar el bloqueo de la tobera de aire de la boquilla a través de la relación

$$\frac{p_{cam}}{p_0} \leq \frac{p_{cr}}{p_0} = 0.528281788 \Rightarrow \text{tobera bloqueada}$$

4.4. Prueba para evaluar el funcionamiento de la boquilla

A esta prueba se le denomina Prueba 3 y cuenta con dos tipos de experimentos identificados como Experimento 1 (medidas para la pieza interior I, de longitud normal, ver Figura 3.13 y Tabla 3.1) y Experimento 2 (medidas para la pieza interior II, de longitud larga, ver Figura 3.13 y Tabla 3.2). Esta prueba consiste en medir los parámetros de operación de la boquilla para las dos variantes geométricas variando los caudales de agua y diferentes razones de flujo de aire con respecto al flujo de agua (ALR).

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Experimento 1

El experimento 1 consiste en realizar 10 mediciones para diferentes caudales de aire con el mismo caudal de agua. El primer caudal de agua es 200 l/h y el caudal del aire en el rotámetro se va subiendo paulatinamente desde 8 Nm³/h hasta 46 Nm³/h. Para cada una de las medidas se anotan los valores de las presiones del agua y del aire y la temperatura del aire, que se ha mantenido prácticamente constante a lo largo de los experimentos. Una vez realizadas las diez mediciones se incrementa el caudal del agua y se repiten las medidas para los diez puntos de caudal de aire. Los caudales de agua se incrementan de 100 en 100 l/h hasta llegar a un valor final de 900 l/h.

En la Tabla 7.6 del Anexo se muestran los valores para el Experimento 1 de la prueba 3. En la Figura 4.7 se muestran de forma gráfica los resultados obtenidos en este experimento.

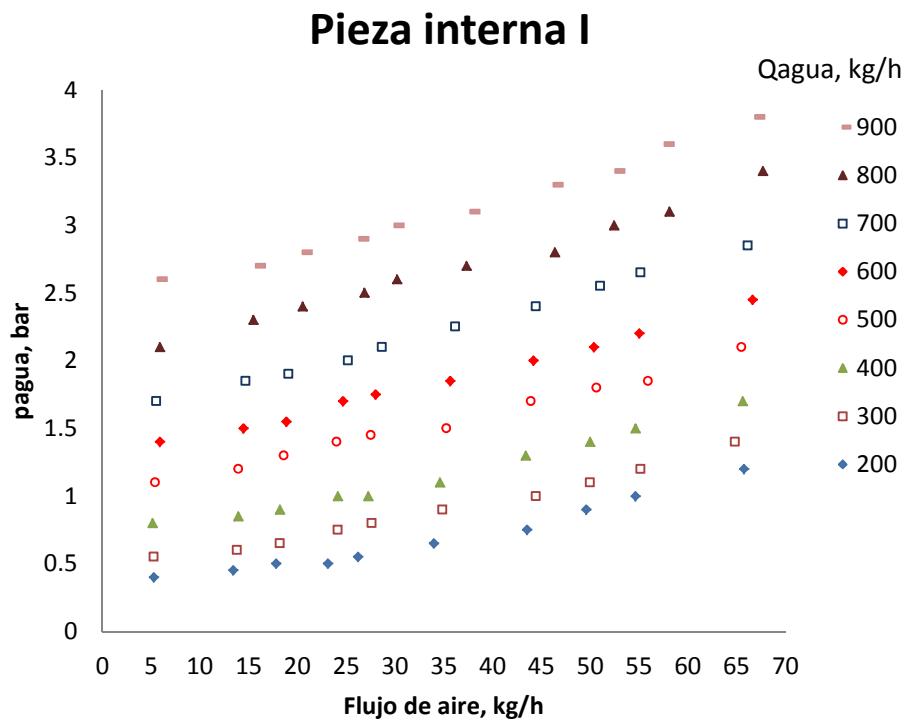


Figura 4.7: Influencia del flujo de aire en la presión del agua. Experimento 1 de la Prueba 3

En la Figura 4.7 se puede apreciar como para caudal de agua constante, la presión del agua debe ir aumentando en la medida que se incrementa el flujo de aire y también la presión del aire, como también se muestra en la Figura 4.8.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

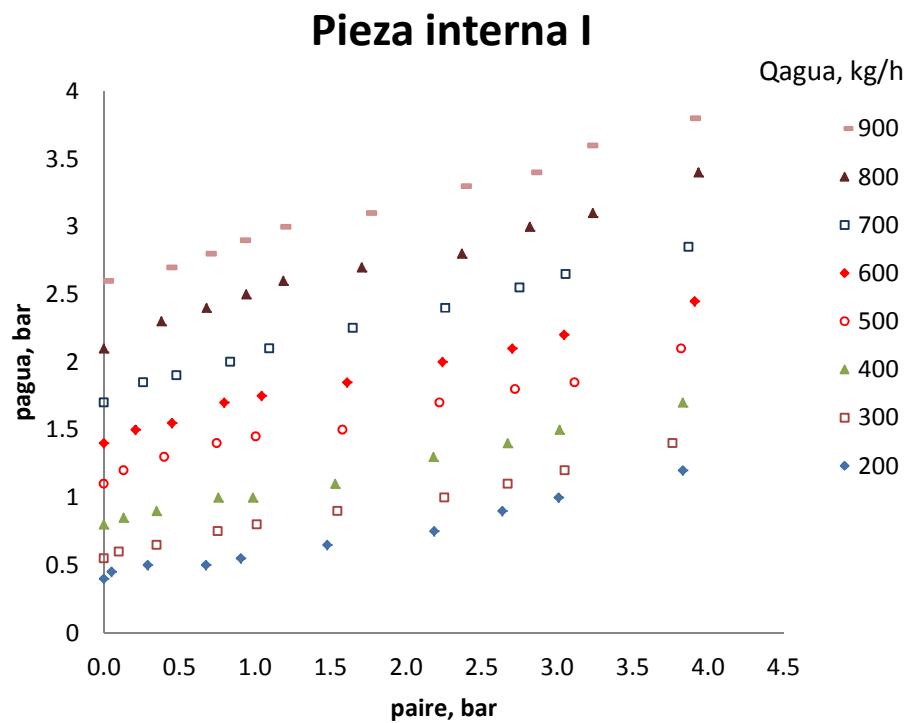


Figura 4.8: Influencia de la presión del aire en la del agua. Experimento 1 de la Prueba 3

En la Figura 4.9 se muestra el comportamiento de la razón aire/líquido con respecto a la presión del aire para diferentes caudales de agua.

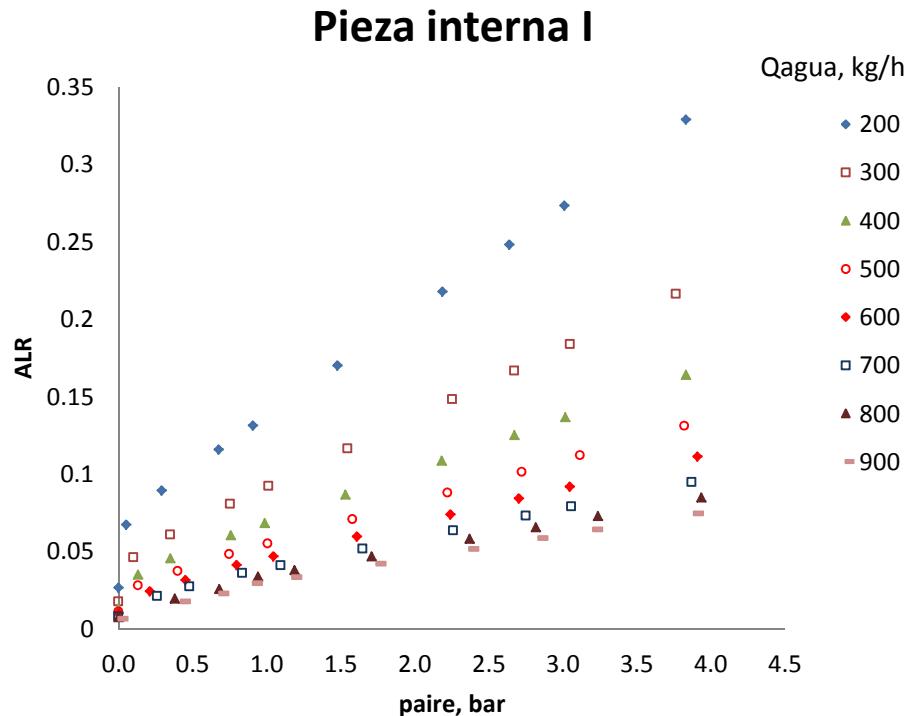


Figura 4.9: Influencia de la presión del aire en ALR. Experimento 1 de la Prueba 3

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Como es lógico, para un caudal de agua constante la razón aire/líquido aumenta con la presión del aire y también con la del agua (ver Figura 4.10), ya que ambas presiones están acopladas en la cámara de mezcla.

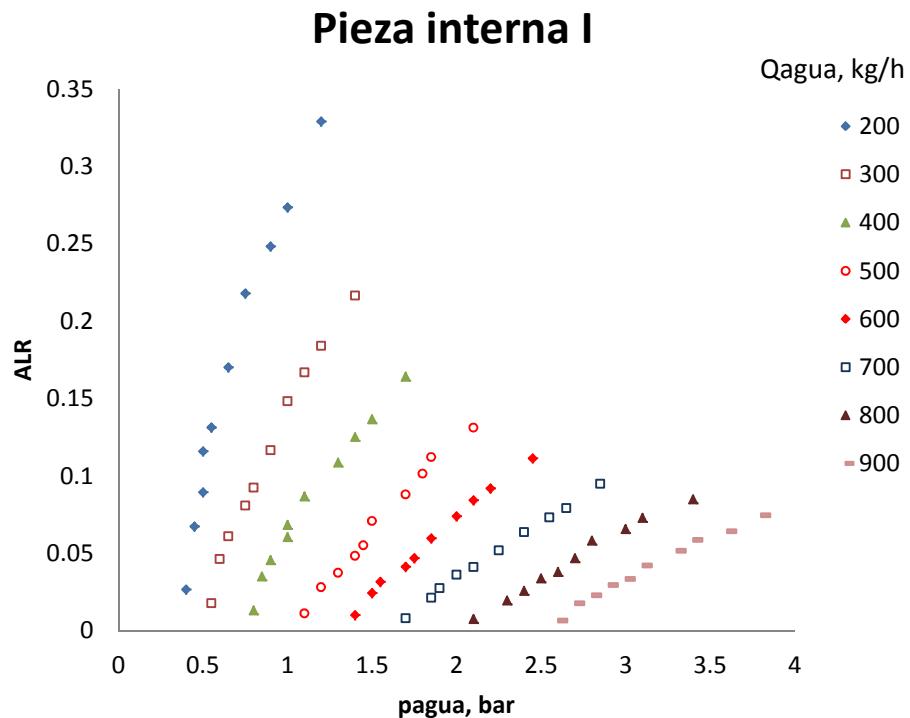


Figura 4.10: Influencia de la presión del agua en ALR. Experimento 1 de la Prueba 3

Experimento 2

El experimento 2 (pieza interior II, ver Figura 3.13 y Tabla 3.2) consiste en realizar 9 mediciones para diferentes caudales de aire con el mismo caudal de agua. El primer caudal de agua es 200 l/h y el caudal del aire en el rotámetro se va subiendo paulatinamente desde 8 Nm³/h hasta 46 Nm³/h. Como los flujos de agua y aire interactúan de forma violenta en la cámara de mezcla, para cada valor impuesto del flujo de aire es necesario corregir ligeramente el caudal de agua al valor deseado.

En cada una de las medidas se anotan los valores de las presiones del agua y del aire y la temperatura del aire que se ha mantenido prácticamente constante a lo largo de los experimentos. Una vez realizadas las diez mediciones, hay que incrementar el caudal del agua y repetir los diez puntos de caudal de aire. Los caudales de agua se incrementan de 100 en 100 l/h hasta llegar a un valor final de 800 l/h.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

En la Tabla 7.1 de los Anexos se muestran los valores medidos para el experimento 2. En la Figura 4.11 se muestran de forma gráfica los resultados obtenidos.

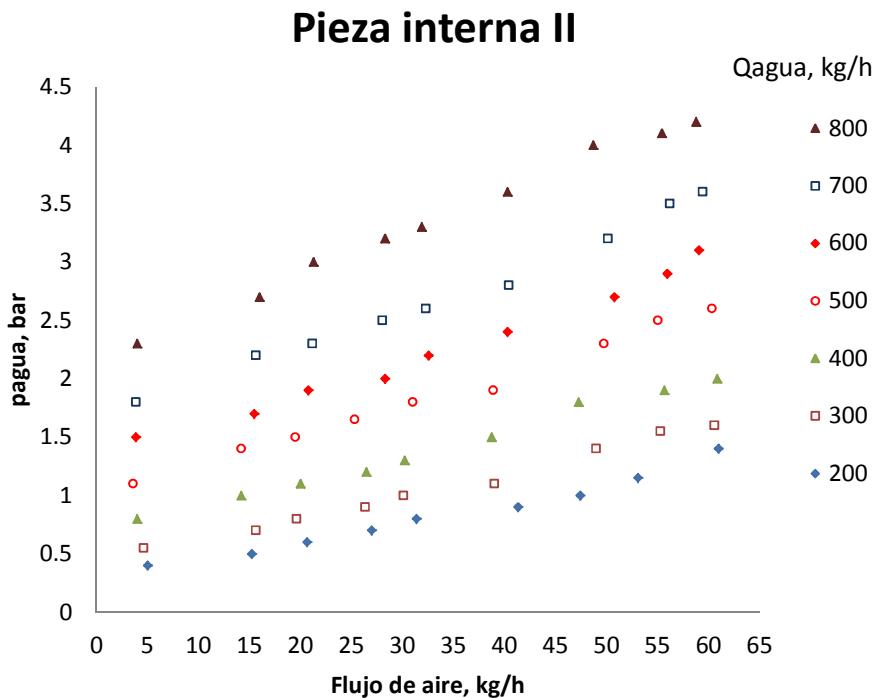


Figura 4.11: Influencia del flujo de aire en la presión del agua. Experimento 2 de la Prueba 3

Al igual que en el experimento 1, en la Figura 4.11 se aprecia que para caudal de agua constante, la presión del agua aumenta con el flujo de aire y con la presión del aire (ver Figura 4.12).

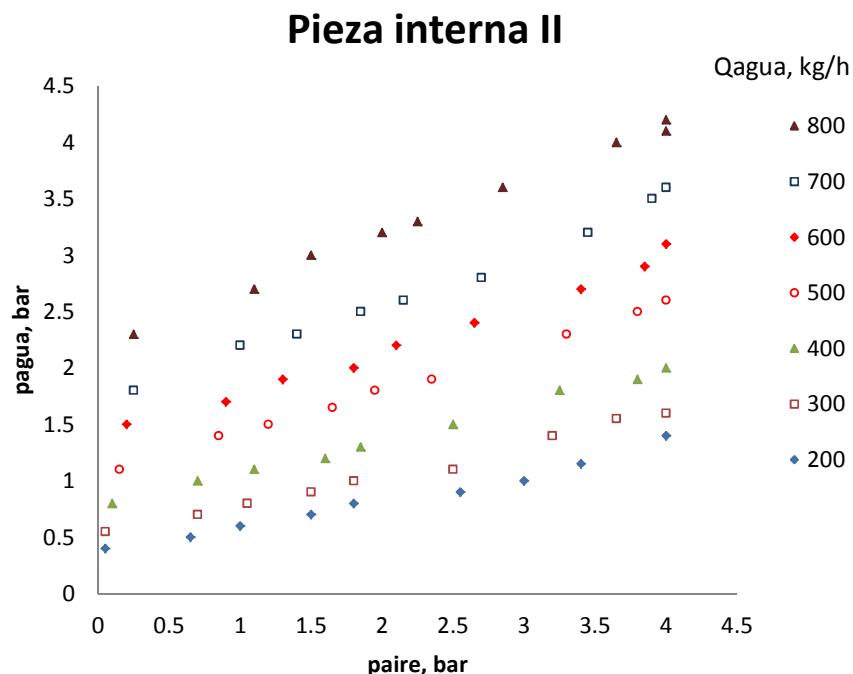


Figura 4.12: Influencia de la presión del aire en la presión del agua. Experimento 2 de la Prueba 3

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

También la relación aire/líquido se comporta de manera similar a los resultados obtenidos en el experimento 1 (ver Figuras 4.13 y 4.14).

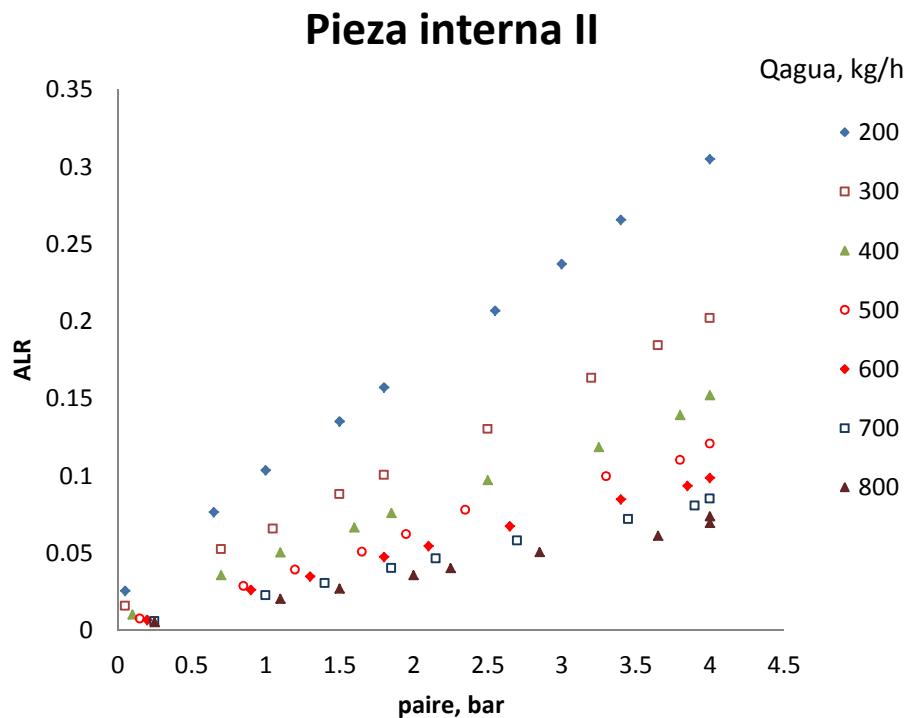


Figura 4.13: Influencia de la presión del aire en ALR. Experimento 2 de la Prueba 3

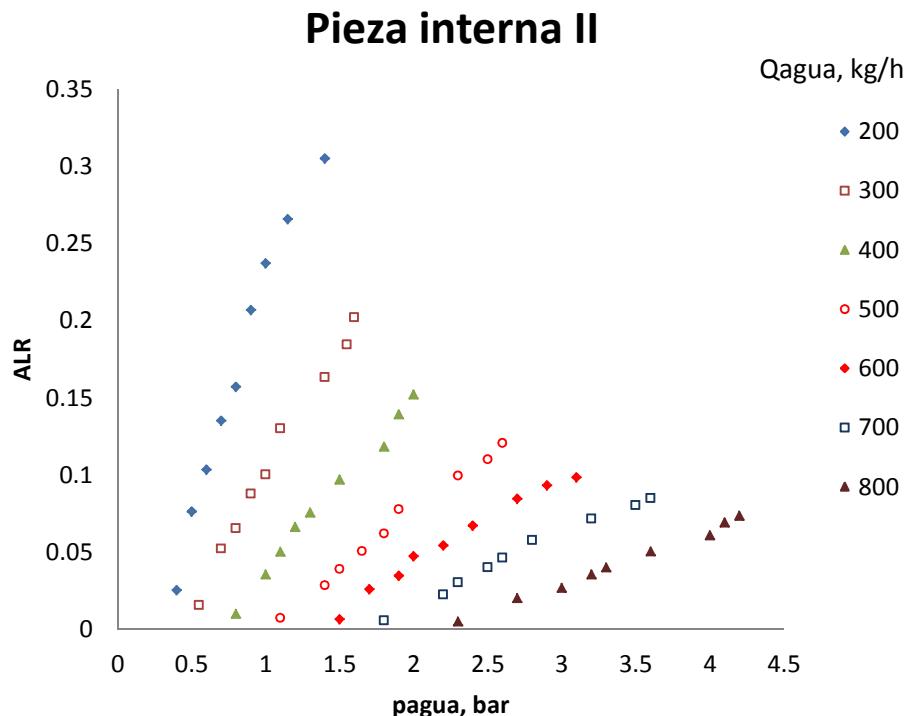


Figura 4.14: Influencia de la presión del agua en ALR. Experimento 2 de la Prueba 3

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

A pesar de que las dos piezas interiores poseen el mismo diámetro del orificio de entrada de aire a la cámara (4 mm), la pieza interior I (de longitud normal) es más corta que la pieza interior II (denominada larga), por lo que la razón aire/líquido es mayor en la pieza interior normal que en la larga para una misma presión del aire (ver Figura 4.15).

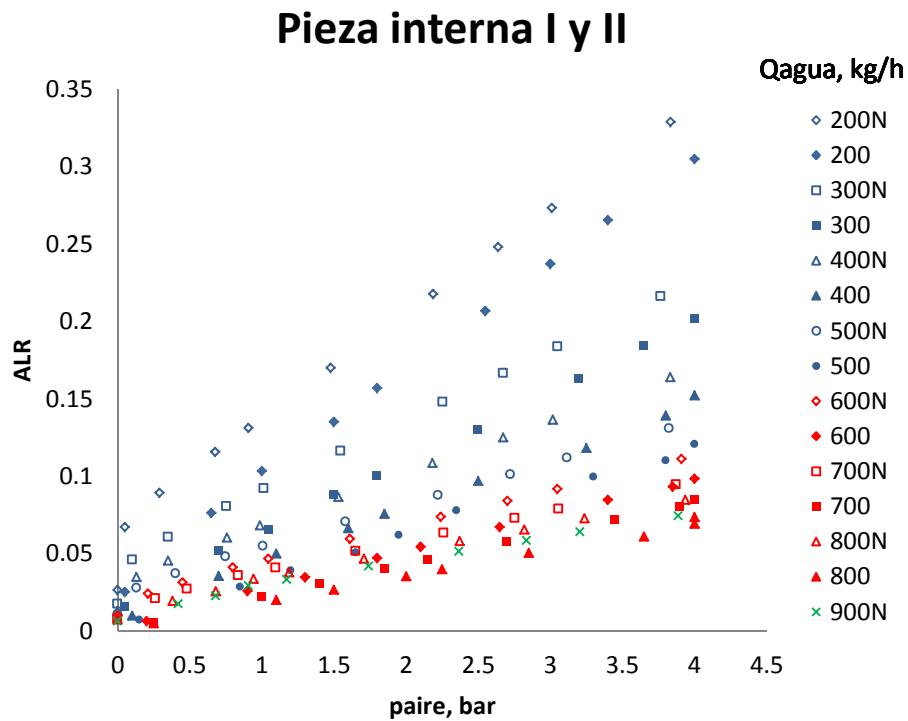


Figura 4.15: Comparación de ALR para ambas boquillas con respecto a la presión del aire

En esta Figura también se observa que al aumentar el caudal de agua se reducen las diferencias del parámetro ALR entre ambas boquillas (pieza interior normal y larga, respectivamente) para la misma presión del aire, es decir, la diferencia de la razón aire/líquido entre las dos boquillas estudiadas se reduce al aumentar el caudal de agua.

El mismo resultado se observa al analizar el parámetro ALR en las dos boquillas con respecto a la presión del agua, es decir la razón aire/líquido es mayor en la pieza interior normal que en la larga para una misma presión del agua (ver Figura 4.16). Pero a diferencia del experimento anterior, las diferencias en ALR entre ambas boquillas para la misma presión de agua se reducen al disminuir el caudal de agua.

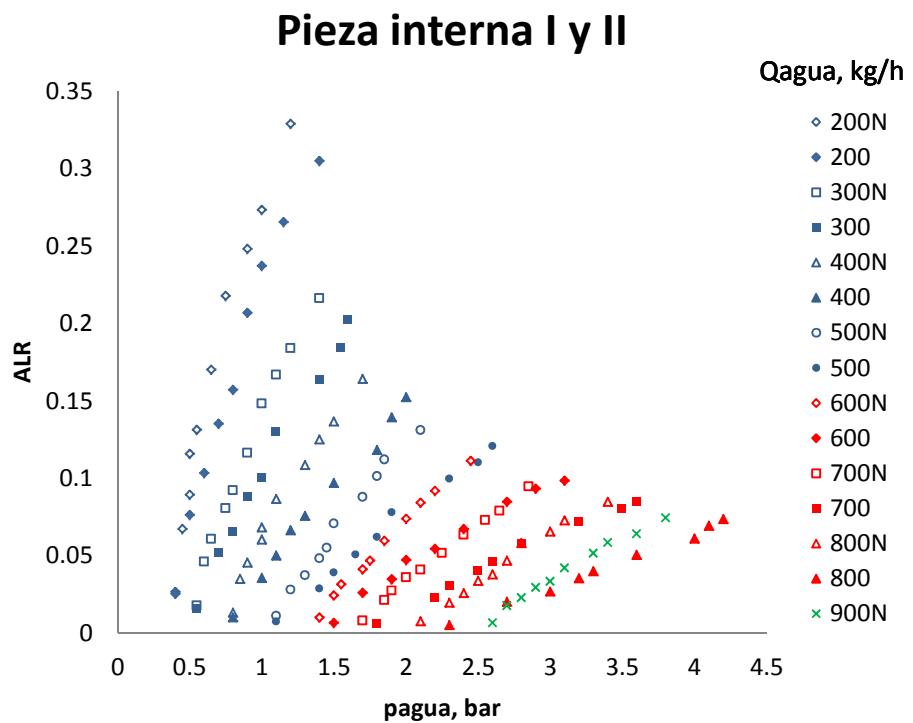


Figura 4.16: Comparación de ALR para ambas boquillas con respecto a la presión del agua

5. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en este PFC se detallan a continuación.

1. Con las pruebas realizadas para corregir las medidas de presión del aire en la zona de bajas presiones se pudo comprobar que existía un error en los cálculos de flujo másico en las medidas anteriormente realizadas para esta boquilla.
2. Los ensayos realizados para determinar la presión en la cámara de mezcla permitieron establecer un criterio sobre las condiciones de bloqueo de la tobera de aire. Con estos experimentos se pudo determinar el coeficiente de pérdidas para la boquilla y el distribuidor en conjunto, en función del número de Reynolds y el parámetro de forma. Se obtuvo una ecuación para el cálculo de la presión en la cámara de mezcla y, una vez calculada ésta, se puede comprobar el bloqueo de la tobera de aire de la boquilla a través de la siguiente relación

$$\frac{p_{cam}}{p_0} \leq \frac{p_{cr}}{p_0} = 0.528281788 \Rightarrow \text{tobera bloqueada.}$$

3. Se realizaron dos experimentos para diferentes piezas internas para evaluar el funcionamiento de la boquilla. Se observó que para un caudal de agua constante la razón aire/líquido aumenta con la presión del aire y también con la del agua, ya que ambas presiones están acopladas en la cámara de mezcla. De igual forma, se observa que al aumentar el caudal de agua se reducen las diferencias del parámetro ALR entre ambas boquillas (pieza interior normal y larga) para la misma presión del aire.
4. Un resultado similar se observó al analizar el comportamiento del ALR con respecto a la presión del agua al analizar las dos piezas interiores (una normal y otra larga): la razón aire/líquido es mayor en la pieza interior normal que en la larga para una misma presión del agua. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, las diferencias en ALR entre ambas boquillas para la misma presión de agua se reducen al disminuir el caudal de agua.

6. Bibliografía

- Barreras, F., Lozano, A., Barroso J., Lincheta, E. (2006), Experimental Characterization of Industrial Twin-Fluid Atomizers, *Atomization and Sprays* 16 (2): 127-145
- Dombrowski, N., Hasson, D., & Ward, D.E. (1960), Some Aspects of Liquid Flow Through Fan Spray Nozzles, *Chem. Eng. Sci.*, vol.12, pp. 35-50
- Ferreira, G., (2010), Study of the flow inside a twin fluid atomizer with internal mixing chamber and its influence on the spray quality. February 2010.
- Ferreira, G., García, J.A., Barreras, F., Lozano, A., Lincheta, E. (2009a), Design optimization of twin-fluid atomizers with an internal mixing chamber for heavy fuel oils, *Fuel Processing Technology*, 90, 270–278
- Ferreira, G., Barreras, F., Lozano, A., García, J.A., Lincheta, E. (2009b), Effect of the inner two-phase flow on the performance of an industrial twin-fluid nozzle with an internal mixing chamber, *Atomization and Sprays* 19 (9), 873-884
- Haenlein, A. (1932), Disintegration of Liquids Jets, NACA TN 659
- Hayne, P. and McDonald, J. (1922), Steam-atomizing fuel-oil burner. Patent number US1428896
- Jedelski, J., Jicha, M., Slama, J., (2003), Discharge coefficient and operational flow characteristics of multi-hole effervescent atomizer, 9th. Intl. Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Julio 13 – 17, Sorrento, Italia
- Lefebvre, A. (1989), Atomization and Sprays, Ed. Hemisphere Publishing Corp., USA
- Mitchel, G.T. & Cunningham, Jr. R. (1965), Burner for a boiler. Patent number US3185202.
- Newton, D. (2000), Twin fluid nozzle and method. Patent number US6088934
- Ohnesorge, W. (1936), Formation of drops by nozzles and the breakup of liquid jets, *Z. Angew. Math. Mech.* Vol. 16 355-358.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

- Rayleigh, L. (1878), On the Instabilities on Jets, *Proceedings of the London Math. Society*, vol. 10, pp. 4-13
- Reich, R.B. (1981), Heavy Fuel Oil nozzle. Patent number US4249885
- Strupp, Ch. & Chung I-P. (2001), High Efficiency Fuel Oil Atomizer. Patent number US2001030247
- Squire, H.B. (1953), Investigation of the Instability of Moving Liquid Film, *Brit. J. Appl. Phys.*, vol. 4, pp. 167-169
- Taylor, G.I. (1959a), The dynamics of thin sheets of fluids. I. Water bells," *Proc. R. Soc. London*, Ser. A 253, 289
- Taylor, G.I. (1959b), The dynamics of thin sheets of fluid. II. Waves on fluid sheets, *Proc. R. Soc. London*, Ser. A 253, 296
- Taylor, G.I. (1959c), The dynamics of thin sheets of fluid. III. Disintegration of fluid sheets, *Proc. R. Soc. London*, Ser. A 253, 313
- Weber, C. (1931), Disintegration of Liquids Jets, *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 11, No. 2, pp. 136-159

7. Anexos

7.1 Tablas de los experimentos

En este anexo se incluyen todas las tablas obtenidas en los experimentos.

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Tabla 7.1. Resultados de las pruebas preliminares (pieza interior I)

Qagua	pagua man	paire man	paire man 0-4	Qaire rotam	Qaire correg	Qaire sala	Difer	maire
l/h	bar	kg/cm ²	kg/cm ²	Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h		kg/s
200	0.4	0	0.05	6	3.11	3.9	-0.79	0.00140022
200	0.5	0.45	0.65	20	12.13	11.8	0.33	0.00423656
200	0.6	0.8	1	24	16.18	16	0.18	0.00574448
200	0.7	1.3	1.5	28	21.30	20.9	0.40	0.00750373
200	0.8	1.65	1.8	30	24.47	24.3	0.17	0.00872443
200	0.9	2.4	2.55	34	31.37	32	-0.63	0.01148897
200	1	2.9	3	38	37.53	36.7	0.83	0.01317641
200	1.15	3.3	3.4	40	41.46	41.1	0.36	0.01475614
200	1.4	3.9	4	41	45.34	47.2	-1.86	0.01694623
300	0.55	0	0.05	6	3.11	3.6	-0.49	0.00129251
300	0.7	0.5	0.7	20	12.33	12.1	0.23	0.00434427
300	0.8	0.85	1.05	24	16.40	15.2	1.20	0.00545726
300	0.9	1.35	1.5	28	21.52	20.4	1.12	0.00732422
300	1	1.6	1.8	30	24.24	23.3	0.94	0.0083654
300	1.1	2.4	2.5	34	31.37	30.2	1.17	0.01084271
300	1.4	3.05	3.2	38	38.23	37.9	0.33	0.01360725
300	1.55	3.5	3.65	40	42.41	42.8	-0.39	0.01536649
300	1.6	4	4	41	45.80	46.9	-1.10	0.01683852
400	0.8	0	0.1	6	3.18	3.1	0.08	0.00111299
400	1	0.5	0.7	20	12.33	11	1.33	0.00394933
400	1.1	0.9	1.1	24	16.62	15.5	1.12	0.00556497
400	1.2	1.4	1.6	28	21.75	20.5	1.25	0.00736012
400	1.3	1.7	1.85	30	24.70	23.4	1.30	0.00840131
400	1.5	2.4	2.5	34	31.37	30	1.37	0.01077091
400	1.8	3.1	3.25	38	38.47	36.6	1.87	0.01314051
400	1.9	3.6	3.8	40	42.87	43.1	-0.23	0.0154742
400	2	4	4	41	45.80	47.1	-1.30	0.01691032
500	1.1	0	0.15	6	3.25	2.8	0.45	0.00100528
500	1.4	0.6	0.85	20	12.73	11	1.73	0.00394933
500	1.5	1	1.2	24	17.04	15.1	1.94	0.00542136
500	1.65	1.5	1.65	28	22.19	19.6	2.59	0.00703699
500	1.8	1.8	1.95	30	25.14	24	1.14	0.00861673
500	1.9	2.2	2.35	34	30.44	30.1	0.34	0.01080681
500	2.3	3.2	3.3	38	38.93	38.5	0.43	0.01382266
500	2.5	3.6	3.8	40	42.87	42.6	0.27	0.01529469
500	2.6	4	4	41	45.80	46.7	-0.90	0.01676671
600	1.5	0	0.2	6	3.32	3	0.32	0.00107709
600	1.7	0.7	0.9	20	13.11	12	1.11	0.00430836
600	1.9	1.1	1.3	24	17.45	16.1	1.35	0.00578039
600	2	1.6	1.8	28	22.62	21.9	0.72	0.00786276
600	2.2	1.9	2.1	30	25.58	25.2	0.38	0.00904756
600	2.4	2.5	2.65	34	31.82	31.2	0.62	0.01120174
600	2.7	3.25	3.4	38	39.16	39.3	-0.14	0.01410989
600	2.9	3.7	3.85	40	43.33	43.3	0.03	0.01554601
600	3.1	3.9	4	41	45.34	45.7	-0.36	0.01640768
700	1.8	0	0.25	6	3.38	3	0.38	0.00107709
700	2.2	0.8	1	20	13.48	12.1	1.38	0.00434427
700	2.3	1.2	1.4	24	17.86	16.4	1.46	0.0058881
700	2.5	1.7	1.85	28	23.05	21.7	1.35	0.00779096
700	2.6	2	2.15	30	26.02	25	1.02	0.00897576
700	2.8	2.5	2.7	34	31.82	31.3	0.52	0.01123765
700	3.2	3.3	3.45	38	39.39	38.8	0.59	0.01393037
700	3.5	3.7	3.9	40	43.33	43.5	-0.17	0.01561781
700	3.6	4	4	41	45.80	46	-0.20	0.01651539
800	2.3	0	0.25	6	3.4	3.1	0.3	0.00111299
800	2.7	0.9	1.1	20	13.8	12.4	1.4	0.00445197
800	3	1.3	1.5	24	18.3	16.5	1.8	0.00592400
800	3.2	1.8	2	28	23.5	21.9	1.6	0.00786276
800	3.3	2.1	2.25	30	26.4	24.7	1.7	0.00886805
800	3.6	2.7	2.85	34	32.7	31.2	1.5	0.01120174
800	4	3.5	3.65	38	40.3	37.7	2.6	0.01353544
800	4.1	3.9	4	40	44.2	42.9	1.3	0.01540240
800	4.2	4	4	41	45.8	45.5	0.3	0.01633588

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Tabla 7.2: Resultados de la Prueba 2 con la pieza interior II

	Qagua (l/h)	Pagua man (bar)
1	200	0.45
2	300	0.5
3	400	0.7
4	500	1.0
5	600	1.25
6	700	1.6
7	800	2.0
8	900	2.4

Tabla 7.3: Resultados de la Prueba 2 con la pieza interior III

	Qagua (l/h)	Pagua man (bar)
1	200	0.45
2	300	0.5
3	400	0.7
4	500	1.1
5	600	1.25
6	700	1.6
7	800	1.9
8	900	2.4

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Tabla 7.4: Resultados de la Prueba 2 con la pieza interior III

	Qagua (l/h)	Pagua man (bar)
1	200	0.45
2	300	0.5
3	400	0.7
4	500	1.0
5	600	1.2
6	700	1.55
7	800	1.9
8	900	2.3

Tabla 7.5: Resultados de la Prueba 2 sin pieza interior

	Qagua (l/h)	Pagua man (bar)
1	200	0.25
2	300	0.55
3	400	0.7
4	500	1.1
5	600	1.25
6	700	1.5
7	800	1.95
8	900	2.3

Evaluación de una boquilla de atomización de doble fluido

Tabla 7.6: Resultados de la prueba 3 experimento 1 (pieza interior I)

Qagua	pagua man	paire man	paire man 0-4	Qaire rotam	Qaire correg	Qaire sala	Difer	maire
l/h	bar	kg/cm ²	kg/cm ²	Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h		kg/s
200	0.4	0	0	10	5.1	4.1	1.0	0.00147202
200	0.45	0	0.05	20	10.4	10.4	0.0	0.00373391
200	0.5	0.5	0.29	24	13.8	13.8	0.0	0.00495462
200	0.5	0.8	0.68	28	18.4	17.9	0.5	0.00642664
200	0.55	1	0.91	30	21.0	20.3	0.7	0.00728831
200	0.65	1.5	1.48	34	27.0	26.3	0.7	0.00944249
200	0.75	2.2	2.19	38	34.2	33.7	0.5	0.01209932
200	0.9	2.7	2.64	40	38.4	38.4	0.0	0.01378676
200	1	3.1	3.01	42	42.3	42.3	0.0	0.01518698
200	1.2	3.9	3.83	46	50.9	50.9	0.0	0.01827464
300	0.55	0	0	10	5.1	4.1	1.0	0.00147202
300	0.6	0.2	0.1	20	10.7	10.7	0.0	0.00384162
300	0.65	0.6	0.35	24	14.1	14.1	0.0	0.00506233
300	0.75	0.9	0.75	28	18.8	18.7	0.1	0.00671387
300	0.8	1.1	1.01	30	21.5	21.4	0.1	0.00768325
300	0.9	1.6	1.55	34	27.4	27	0.4	0.00969382
300	1	2.3	2.26	38	34.5	34.4	0.1	0.01235064
300	1.1	2.7	2.67	40	38.5	38.7	-0.2	0.01389447
300	1.2	3	3.05	42	42.6	42.7	-0.1	0.01533059
300	1.4	3.9	3.76	46	50.5	50.2	0.3	0.01802332
400	0.8	0	0	10	5.1	4	1.1	0.00143612
400	0.85	0.2	0.13	20	10.8	10.8	0.0	0.00387753
400	0.9	0.6	0.35	24	14.1	14.1	0.0	0.00506233
400	1	0.9	0.76	28	18.8	18.7	0.1	0.00671387
400	1	1.1	0.99	30	21.3	21.1	0.2	0.00757554
400	1.1	1.6	1.53	34	27.3	26.8	0.5	0.00962201
400	1.3	2.2	2.18	38	34.1	33.6	0.5	0.01206342
400	1.4	2.7	2.67	40	38.5	38.7	-0.2	0.01389447
400	1.5	3.1	3.02	42	42.3	42.3	0.0	0.01518698
400	1.7	3.9	3.83	46	50.8	50.8	0.0	0.01823874
500	1.1	0	0	10	5.1	4.2	0.9	0.00150793
500	1.2	0.4	0.13	20	10.8	10.8	0.0	0.00387753
500	1.3	0.6	0.4	24	14.4	14.4	0.0	0.00517004
500	1.4	1	0.75	28	18.7	18.6	0.1	0.00667796
500	1.45	1.2	1.01	30	21.4	21.3	0.1	0.00764734
500	1.5	1.7	1.58	34	27.5	27.3	0.2	0.00980153
500	1.7	2.3	2.22	38	34.3	34	0.3	0.01220703
500	1.8	2.6	2.72	40	38.8	39.2	-0.4	0.01407398
500	1.85	3.1	3.12	42	42.8	43.3	-0.5	0.01554601
500	2.1	3.9	3.82	46	50.7	50.7	0.0	0.01820283
600	1.4	0	0	10	5.1	4.6	0.5	0.00165154
600	1.5	0.4	0.21	20	11.2	11.2	0.0	0.00402114
600	1.55	0.7	0.45	24	14.6	14.6	0.0	0.00524184
600	1.7	1	0.80	28	19.0	19.1	-0.1	0.00685748
600	1.75	1.3	1.05	30	21.6	21.7	-0.1	0.00779096
600	1.85	1.7	1.61	34	27.7	27.6	0.1	0.00990923
600	2	2.3	2.24	38	34.4	34.2	0.2	0.01227883
600	2.1	2.7	2.70	40	38.7	39	-0.3	0.01400218
600	2.2	3.1	3.05	42	42.5	42.6	-0.1	0.01529469
600	2.45	3.9	3.91	46	51.2	51.6	-0.4	0.01852596
700	1.7	0	0	10	5.1	4.3	0.8	0.00154383
700	1.85	0.5	0.26	20	11.4	11.4	0.0	0.00409294
700	1.9	0.75	0.48	24	14.8	14.8	0.0	0.00531365
700	2	1.1	0.84	28	19.2	19.5	-0.3	0.00700109
700	2.1	1.3	1.09	30	21.9	22.2	-0.3	0.00797047
700	2.25	1.8	1.65	34	27.9	28	-0.1	0.01005285
700	2.4	2.4	2.26	38	34.5	34.4	0.1	0.01235064
700	2.55	2.8	2.75	40	39.0	39.5	-0.5	0.01418169
700	2.65	3.1	3.06	42	42.5	42.7	-0.2	0.01533059
700	2.85	3.9	3.87	46	51.0	51.2	-0.2	0.01838235
800	2.1	0	0	10	5.1	4.6	0.5	0.00165154
800	2.3	0.5	0.38	20	12.0	12	0.0	0.00430836
800	2.4	0.8	0.68	24	15.9	15.9	0.0	0.00570858
800	2.5	1.2	0.94	28	19.9	20.8	-0.9	0.00746783
800	2.6	1.4	1.19	30	22.6	23.4	-0.8	0.00840131
800	2.7	1.8	1.71	34	28.5	28.9	-0.4	0.01037597
800	2.8	2.4	2.37	38	35.5	35.9	-0.4	0.01288919
800	3	2.8	2.82	40	39.7	40.6	-0.9	0.01457663
800	3.1	3.2	3.24	42	43.9	45	-1.1	0.01615636
800	3.4	3.9	3.94	46	51.9	52.4	-0.5	0.01881318
900	2.6	0	0	10	5.1	4.4	0.7	0.00157973
900	2.7	0.6	0.42	20	12.2	12.2	0.0	0.00438017
900	2.8	0.9	0.68	24	15.9	15.9	0.0	0.00570858
900	2.9	1.2	0.91	28	19.7	20.4	-0.7	0.00732422
900	3	1.5	1.17	30	22.5	23.2	-0.7	0.00832950
900	3.1	1.9	1.74	34	28.6	29.2	-0.6	0.01048368
900	3.3	2.5	2.37	38	35.4	35.8	-0.4	0.01285328
900	3.4	2.9	2.84	40	39.7	40.7	-1.0	0.01461253
900	3.6	3.3	3.21	42	43.7	44.6	-0.9	0.01601275
900	3.8	3.9	3.89	46	51.5	51.8	-0.3	0.01859777