

# Trabajo Fin de Máster

## Máster de Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

### Produccion masiva de microburbujas mono-dispersas para aplicaciones reales evitando la microfluídica

Autor: Enrique J. Sánchez Quintero

Tutor: José Manuel Gordillo Arias de Saavedra

**Dep. Mecánica de Fluidos e Ingeniería Aeroespacial**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Máster  
Máster de Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

# **Produccion masiva de microburbujas monodispersas para aplicaciones reales evitando la microfluídica**

Autor:  
Enrique J. Sánchez Quintero

Tutor:  
José Manuel Gordillo Arias de Saavedra  
Catedrático de Universidad

Dep. Mecánica de Fluidos e Ingeniería Aeroespacial  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Máster: Produccion masiva de microburbujas monodispersas para aplicaciones reales evitando la microfluídica

Autor: Enrique J. Sánchez Quintero  
Tutor: José Manuel Gordillo Arias de Saavedra

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

El diseño de una hoja de estilo en  $\text{\LaTeX}$  para un texto no es en absoluto trivial. Por un lado hay que conocer bien los usos, costumbres y reglas que se emplean a la hora de establecer márgenes, tipos de letras, tamaños de las mismas, títulos, estilos de tablas, y un sinfín de otros aspectos. Por otro, la programación en  $\text{\LaTeX}$  de esta hoja de estilo es muy tediosa, incluida la selección de los mejores paquetes para ello. La hoja de estilo adoptada por nuestra Escuela y utilizada en este texto es una versión de la que el profesor Payán realizó para un libro que desde hace tiempo viene escribiendo para su asignatura. Además, el prof. Payán ha participado de forma decisiva en la adaptación de dicha plantilla a los tres tipos de documentos que se han tenido en cuenta: libro, tesis y proyectos final de carrera, grado o máster. Y también en la redacción de este texto, que sirve de manual para la utilización de estos estilos. Por todo ello, y por hacerlo de forma totalmente desinteresada, la Escuela le está enormemente agradecida.

A esta hoja de estilos se le incluyó unos nuevos diseños de portada. El diseño gráfico de las portadas para proyectos fin de grado, carrera y máster, está basado en el que el prof. Fernando García García, de la Facultad de Bellas Artes de nuestra Universidad, hiciera para los libros, o tesis, de la sección de publicación de nuestra Escuela. Nuestra Escuela le agradece que pusiera su arte y su trabajo, de forma gratuita, a nuestra disposición.

*Juan José Murillo Fuentes*  
*Subdirección de Comunicaciones y Recursos Comunes*

*Sevilla, 2013*





## Resumen

---

**E**n nuestra Escuela se producen un número considerable de documentos, tantos docentes como investigadores. Nuestros alumnos también contribuyen a esta producción a través de sus trabajos de fin de grado, máster y tesis. El objetivo de este material es facilitar la edición de todos estos documentos y a la vez fomentar nuestra imagen corporativa, facilitando la visibilidad y el reconocimiento de nuestro Centro.



# Abstract

---

In our school there are a considerable number of documents, many teachers and researchers. Our students also contribute to this production through its work in order of degree, master's theses. The aim of this material is easier to edit these documents at the same time promote our corporate image, providing visibility and recognition of our Center.

*... -translation by google-*



# Índice Abreviado

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Fundamentos de la generación de burbujas	2
1.2 Dispositivos para la generación de microburbujas	3
1.3 Influencia del gradiente de presión	6
1.4 Analogía Aerodinámica	9
<b>2 Ala acuática bidimensional</b>	<b>15</b>
2.1 Diseño y fabricación	15
2.2 Experimentos	20
2.3 Resultados y discusión	24
<i>Índice de Figuras</i>	31
<i>Índice de Tablas</i>	33
<i>Índice de Códigos</i>	35
<i>Bibliografía</i>	37
<i>Índice alfabético</i>	39
<i>Glosario</i>	39



# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Fundamentos de la generación de burbujas	2
1.2 Dispositivos para la generación de microburbujas	3
1.2.1 Dispositivos de Coflow	4
1.2.2 Dispositivos de Cross-Flow	5
1.2.3 Dispositivos de Flow-Focussing	5
1.2.4 Otros dispositivos y breve reflexión	6
1.3 Influencia del gradiente de presión	6
1.4 Analogía Aerodinámica	9
<b>2 Ala acuática bidimensional</b>	<b>15</b>
2.1 Diseño y fabricación	15
2.1.1 Equipos disponibles y limitaciones	15
2.1.2 Diseño del ala	17
2.1.3 Diseño del montaje experimental	19
2.2 Experimentos	20
2.2.1 Campaña experimental	20
2.2.2 Datos obtenidos y métodos de postproceso	23
2.3 Resultados y discusión	24
2.3.1 Efecto de la posición del orificio de inyección	24
2.3.2 Resultado para un orificio situado en $\bar{s} = 0$	25
<i>Índice de Figuras</i>	31
<i>Índice de Tablas</i>	33
<i>Índice de Códigos</i>	35
<i>Bibliografía</i>	37
<i>Índice alfabético</i>	39
<i>Glosario</i>	39





# Notación

$\mathbb{R}$	Cuerpo de los números reales
$\mathbb{C}$	Cuerpo de los números complejos
$\ \mathbf{v}\ $	Norma del vector $\mathbf{v}$
$\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle$	Producto escalar de los vectores $\mathbf{v}$ y $\mathbf{w}$
$ \mathbf{A} $	Determinante de la matriz cuadrada $\mathbf{A}$
$\det(\mathbf{A})$	Determinante de la matriz (cuadrada) $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^\top$	Transpuesto de $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^{-1}$	Inversa de la matriz $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^\dagger$	Matriz pseudoinversa de la matriz $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^H$	Transpuesto y conjugado de $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^*$	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
□	Fin de la solución
e.o.c.	En cualquier otro caso
$e$	número $e$
$e^{jx}$	Exponencial compleja
$e^{j2\pi x}$	Exponencial compleja con $2\pi$
$e^{-jx}$	Exponencial compleja negativa
$e^{-j2\pi x}$	Exponencial compleja negativa con $2\pi$
$\text{Re}$	Parte real
$\text{Im}$	Parte imaginaria
$\text{sen}$	Función seno
$\text{tg}$	Función tangente
$\text{arctg}$	Función arco tangente
$\sin^y x$	Función seno de $x$ elevado a $y$
$\cos^y x$	Función coseno de $x$ elevado a $y$
$\text{Sa}$	Función sampling
$\text{sgn}$	Función signo
$\text{rect}$	Función rectángulo
$\text{Sinc}$	Función sinc
$\frac{\partial y}{\partial x}$	Derivada parcial de $y$ respecto a $x$
$x^\circ$	Notación de grado, $x$ grados.
$\text{Pr}(A)$	Probabilidad del suceso $A$
$E[X]$	Valor esperado de la variable aleatoria $X$
$\sigma_X^2$	Varianza de la variable aleatoria $X$
$\sim f_X(x)$	Distribuido siguiendo la función densidad de probabilidad $f_X(x)$
$\mathcal{N}(m_X, \sigma_X^2)$	Distribución gaussiana para la variable aleatoria $X$ , de media $m_X$ y varianza $\sigma_X^2$

$\mathbf{I}_n$	Matriz identidad de dimensión $n$
$\text{diag}(\mathbf{x})$	Matriz diagonal a partir del vector $\mathbf{x}$
$\text{diag}(\mathbf{A})$	Vector diagonal de la matriz $\mathbf{A}$
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
$\stackrel{\text{def}}{=}$	Igual por definición
$\ \mathbf{x}\ $	Norma-2 del vector $\mathbf{x}$
$ \mathbf{A} $	Cardinal, número de elementos del conjunto $\mathbf{A}$
$\mathbf{x}_i, i = 1, 2, \dots, n$	Elementos $i$ , de 1 a $n$ , del vector $\mathbf{x}$
$dx$	Diferencial de $x$
$\leq$	Menor o igual
$\geq$	Mayor o igual
$\backslash$	Backslash
$\Leftrightarrow$	Si y sólo si
$x = a + 3 \underset{a=1}{=} 4$	Igual con explicación
$\frac{a}{b}$	Fracción con estilo pequeño, $a/b$
$\Delta$	Incremento
$b \cdot 10^a$	Formato científico
$\overset{x}{\rightarrow}$	Tiende, con $x$
$\mathbf{O}$	Orden
$\text{TM}$	Trade Mark
$\mathbb{E}[x]$	Esperanza matemática de $x$
$\mathbf{C}_x$	Matriz de covarianza de $\mathbf{x}$
$\mathbf{R}_x$	Matriz de correlación de $\mathbf{x}$
$\sigma_x^2$	Varianza de $x$

# 1 Introducción

---

Producir burbujas de tamaño micrométrico tiene, hoy día, numerosas aplicaciones que van más allá de aquellas destinadas a procesos a escala de laboratorio. De hecho, el gran desarrollo y la diversidad de tecnologías desarrolladas en los últimos años han dado lugar a recientes revisiones del estado del arte que tratan con gran detalle tanto los fundamentos que sustentan la producción de microburbujas monodispersas como sus aplicaciones (véase [9]). Tanto es así que el empleo de microburbujas tiene cabida en procesos de índole tan variada como el tratamiento de aguas, la industria alimentaria, y todo tipo de procesos médicos y farmacológicos, por citar algunos ejemplos. Así, para la obtención de imágenes por ultrasonidos, el uso de microburbujas como agentes de contraste ha demostrado arrojar unos excelentes resultados [3, ?, 8]. Por otro lado, las elevadas necesidades de aireación y el gran porcentaje que esta ocupa en el coste de operación de los biorreactores [6, 10] hacen que el adecuado control del tamaño y la frecuencia de producción de las burbujas tenga un fuerte impacto en la eficiencia del proceso.

Cuando se requiere el uso de microburbujas en aplicaciones como las mencionadas anteriormente, se dispone de tres variables que se desean controlar: el diámetro medio de las burbujas,  $d_b$ , la frecuencia de producción de estas,  $f_b$  y el índice de polidispersión, PDI, ya que para considerar que la producción de microburbujas es monodispersa estas tienen que tener un PDI por debajo del 5% [9]. Así, en el caso de la oxigenación de biorreactores, típicamente será necesario satisfacer la demanda de oxígeno de los microorganismos presentes, OUR (*Oxygen Uptake Rate*, de sus siglas en inglés), por lo que el ratio de transferencia de oxígeno (*Oxygen Transfer Rate*-OTR) puede ser el paso limitante en todo el proceso [6]. El parámetro que controla el OTR es, dado un gradiente de concentración, el coeficiente de transferencia de masa,  $k_L a$ , el cual se encuentra directamente afectado por la frecuencia y el diámetro de las burbujas. En efecto, el área específica de interfase, i.e. el área por unidad de volumen de las burbujas, depende de forma inversa del diámetro de las burbujas ( $a = 6\phi/d_b$ , con  $\phi$  la fracción de gas en el medio). Por lo tanto, a menor diámetro de las burbujas mayor es el coeficiente de transferencia de masa, lo que se traduce en última instancia en una reducción del caudal de aire requerido para satisfacer el OUR del cultivo, con el consiguiente ahorro que esta implica. Es por ello que el empleo de difusores de burbuja fina [12, 10], con diámetros 1-3 mm, o incluso de microburbujas [13, 7, 11], con diámetros 10-500  $\mu\text{m}$ , resulta esencial cuando se trata de aumentar la eficiencia del proceso de aireación; no obstante, también se ha reportado que la presencia de surfactantes y antiespumantes en el medio puede reducir críticamente el valor de dicho coeficiente en los casos en los que se favorece la coalescencia (véase [5]), mientras que la presencia de una determinada concentración de sal (equivalente al lodo presente en las aguas no tratadas) puede inhibir precisamente esta coalescencia [12].

Como puede observarse, las exigencias de las industrias actuales, que requieren cada vez mayores frecuencias de producción y menores diámetros de las burbujas, conlleva que se hayan desarrollado diferentes tecnologías para poder conseguir una población monodispersa donde se pueda controlar tanto  $d_b$  y  $f_b$ . Todas estas tecnologías emergentes emplean dispositivos microfluídicos de tamaño milimétrico y submilimétrico que, aunque puedan parecer muy similares entre sí, se fundamentan en principios físicos diferentes que conviene comprender [9]. De este modo, el capítulo se estructura de la siguiente forma: en primer lugar, se realiza una descripción de las ecuaciones que gobiernan la dinámica de una burbuja que se produce en el seno de un líquido, después, se enumeran las diversas tecnologías que se han desarrollado y que se utilizan para generar una población monodispersa de microburbujas en los diferentes regímenes. En algunas de estas aplicaciones, el papel del gradiente de presión existente en el líquido exterior juega un papel fundamental que se describe con detalle en la Sección 1.3. Finalmente, considerando las pequeñas geometrías empleadas

en las tecnologías actuales y el rol determinante del gradiente de presión, se expondrán las ideas que han llevado al desarrollo del dispositivo que en este trabajo se estudia.

## 1.1 Fundamentos de la generación de burbujas

Lejos de lo que pudiera intuirse, la generación de burbujas es un proceso con importantes diferencias respecto al proceso de producción de gotas. En general, para generar gotas de radio  $r_d$  a una frecuencia  $f_d \sim U/r_d$ , basta con inyectar el líquido a través de un tubo de radio  $r_t \sim r_d$  a una velocidad  $U \gtrsim U_c$ , con  $U_c = [\sigma/(\rho g)]^{1/2}$  la velocidad capilar<sup>1</sup> [9].

Sin embargo, en el caso de la formación de burbujas para estas condiciones, el comportamiento es diferente. Por un lado, en el caso de generación cuasiestática en el que  $U \ll U_c$ , el radio de la burbuja viene dado por el conocido *radio de Fritz*, que resulta del balance de esfuerzos de tensión superficial con la fuerza de flotación,  $r_F/r_t \sim [3/(2Bo)]^{1/3}$ , con  $Bo = \rho g r_t^2 / \sigma$  el número de Bond, que mide la importancia relativa de los esfuerzos de tensión superficial frente a los esfuerzos de volumen (gravedad/flotación). Sin embargo, si se desea reducir el diámetro de las burbujas o incrementar la frecuencia de producción aumentando la velocidad de inyección del gas a valores por encima de  $U_c$ , lejos de obtener un chorro de radio comparable al del inyector, se obtienen (por encima de cierta velocidad) burbujas de volumen  $V_b \propto (Q_g/g^{1/2})^{6/5} > 4/3\pi r_F^3$  [9], y lo que es más, si se sigue aumentando la velocidad, las burbujas cercanas entresí pueden coalescer, con lo que el diámetro final obtenido es mucho mayor [?].

Para explicar estas diferencias entre ambos procesos, si se desprecian los efectos dinámicos del gas (ya que  $\rho_g/\rho \gg 1$  y  $\mu_g/\mu \gg 1$ ), y se considera que la burbuja es prácticamente esférica, con una presión uniforme en su interior, la dinámica de la burbuja puede describirse a través de la ecuación de Rayleigh-Plesset.

$$\rho \left( R_b \ddot{R}_b + \frac{3}{2} \dot{R}_b^2 \right) = \Delta p_{exit} - \frac{2\sigma}{R_b} - 4\mu \frac{\dot{R}_b}{R_b} \quad (1.1)$$

Tal y como se puede observar en [?], para que el crecimiento de la burbuja y su posterior colapso tengan lugar, requiere que el término  $\Delta p - 2\sigma/R_b$  cambie de positivo, valor que adquiere en los primeros instantes mientras la burbuja se infla, a negativo, momento en el que las velocidades negativas cerca del inyector la harán colapsar. La Ecuación (1.1) junto con la ecuación de continuidad

$$Q_g = \frac{dV_b}{dt} \simeq 4\pi R_b^2 \dot{R}_b \quad (1.2)$$

y el balance de cantidad de movimiento en la línea de gas<sup>2</sup>

$$p_0 - p_{exit} = \rho_g K (Re_g) [Q_g / (\pi r_t^2)]^2 \quad (1.3)$$

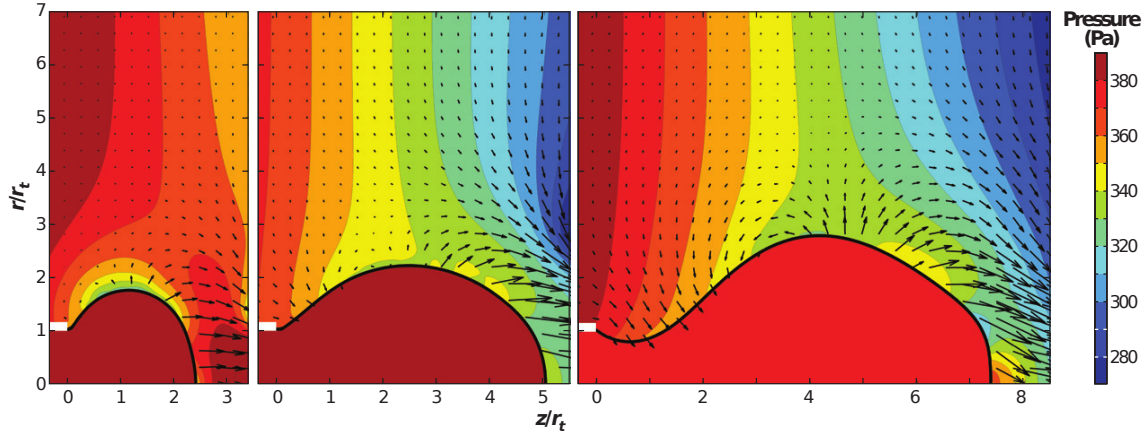
proporcionan el conjunto de ecuaciones necesario para describir sucintamente las tecnologías de la Sección 1.2 y, con ellas, el diámetro y frecuencia de producción de las burbujas finalmente obtenidas.

Sintetizando una vez más las ideas expuestas en [9], el proceso de formación de una burbuja en una piscina en reposo puede esquematizarse en las siguientes etapas:

- En primer lugar, para satisfacer Ecuación (1.3), el volumen de la burbuja debe aumentar, lo que provoca velocidades radiales en el líquido hacia fuera de la burbuja.
- La presión del gas en el interior de la burbuja es prácticamente uniforme, y debe adaptarse a la del líquido exterior en algún punto entre  $z = 0$  (véase la Figura 1.1) y  $z = 2R_b$ , el cenit de la misma, supóngase en  $z \sim R_b$ .
- A medida que el radio de la burbuja aumenta, la punta de la burbuja se encuentra con una sobrepresión respecto al líquido exterior del orden de  $\sim \rho g R_b$ , lo que contribuye a que el gas acelere al líquido exterior, mientras que, en  $z = 0$ , es el líquido el que ejerce una sobrepresión sobre la base de la burbuja del orden de  $\sim -\rho g R_b$ , lo que conlleva que el líquido induzca velocidades hacia el interior de la burbuja.

<sup>1</sup> Se remite al lector interesado en la rotura e inestabilidades de chorros líquidos a la excelente revisión [1]

<sup>2</sup> Nótese que no puede presuponerse, *a priori*, la constancia del caudal, debido a las dos etapas bien diferenciadas que existen en el proceso de generación de burbujas.



**Figura 1.1** Contornos de presión en las fases iniciales del proceso de formación de una burbuja para un número de Bond,  $Bo = 0.245$ . Cortesía de [9].

Por lo tanto, si nos ceñimos al caso no viscoso, la burbuja se desprenderá del inyector cuando la velocidad hacia adentro en  $z = 0$ , que surge del balance de Ecuación (1.1),  $\Delta p = p_{exit} - 2\sigma/R_b \sim \rho \dot{R}_b$  coincida con la velocidad hacia afuera impuesta por continuidad,  $\sim Q_g / (4\pi R_b^2)$ .

$$\frac{Q_g}{R_b^2} \sim \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \sim \sqrt{g R_b} \Rightarrow d_b \sim \left( \frac{Q_g}{g^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (1.4)$$

siendo, finalmente, la frecuencia de producción

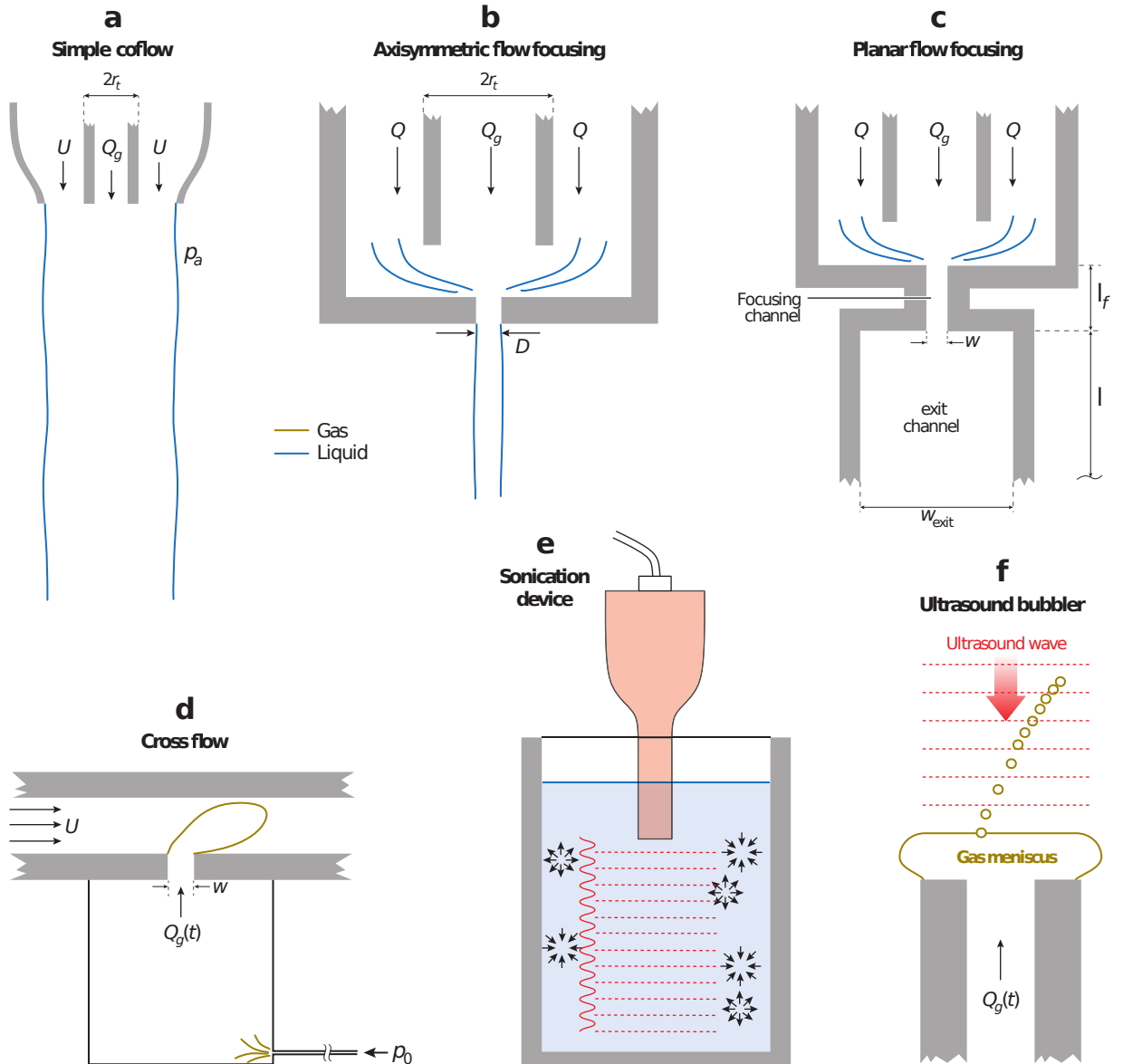
$$f_b \sim \frac{Q_g}{d_b^3} \sim \left( \frac{g^3}{Q_g} \right)^{1/5} \quad (1.5)$$

Así, aunque puede emplearse este sencillo método para producir burbujas simplemente inyectando gas en el seno de un líquido en reposo, la burbujas obtenidas poseen un diámetro significativamente mayor que el radio del inyector y con frecuencias que decrecen con el caudal, por lo que no resulta un método adecuado para satisfacer las demandas que las aplicaciones actuales requieren en lo que a diámetros y frecuencias se refiere [9]. Ello ha propiciado el desarrollo de tecnologías más sofisticadas basadas en dispositivos microfluídicos los cuales, en esencia, buscan aumentar el gradiente de presión (esto es, la gravedad efectiva) al que se ve sometida la gota en su proceso de generación.

## 1.2 Dispositivos para la generación de microburbujas

Una vez que se han descrito las ecuaciones necesarias para la comprensión de los fundamentos de la generación de burbujas en el seno de un líquido, se está en disposición de enumerar y describir de forma sucinta las tecnologías más relevantes que, actualmente, se emplean para producir masivamente las mencionadas burbujas. Conviene recordar que las soluciones tecnológicas que aquí se presentan no son las únicas que permiten la producción de burbujas con tamaños submilimétricos; en efecto, en aplicaciones industriales como los reactores químicos, los esfuerzos de cortadura fruto de la turbulencia son los responsables de que la formación de burbujas que, aunque micrométricas y a grandes frecuencias, son generadas con un alto PDI [9].

De nuevo, al igual que se realizó en Sección 1.1, se respetará la estructura de [9] para presentar las tecnologías que a continuación se describen, no extendiéndose en exceso y pudiendo encontrar el lector una descripción más detallada tanto en el *review* como en las referencias citadas en él. Así pues, en la Figura 1.2, se describen de forma esquemática los dispositivos más relevantes para la producción de burbujas actualmente. En la figura se pueden distinguir dos tipos principales de tecnologías: aquellas emplean una corriente de líquido para provocar el colapso de la corriente gaseosa para la formación de burbujas (Figura 1.2a-d) y aquellas que en las que se emplean ultrasonidos (Figura 1.2e-f). A su vez, de entre las primeras, se puede distinguir en aquellas en las que el líquido es inyectado en la misma dirección que la corriente gaseosa (Figura 1.2a-c) y aquellas en las que el líquido y el gas se encuentran de forma perpendicular (Figura 1.2d).



**Figura 1.2** Representación esquemática de los diferentes dispositivos que identifican la tecnología utilizada en la producción de burbujas monodispersas. Figura adaptada de [9].

Finalmente, la diferencia principal entre los dispositivos de *flow-focussing* (Figura 1.2b-c), y los de *coflow* es que en el primero se hace pasar ambos fluidos a través de un estrechamiento, lo que acelera el colapso y permite generar burbujas más pequeñas [9]. En esta sección, nos centraremos sólo en los 4 primeros, debido a la analogía que los mismos presentan con la solución tecnológica de la que trata este estudio.

### 1.2.1 Dispositivos de Coflow

Un dispositivo de tipo coflow es aquél como el mostrado en la Figura 1.2a, donde la corriente gaseosa y la de líquido son inyectadas en la misma dirección y de forma libre. Las condiciones en las que usualmente se opera este tipo de dispositivos son aquellas en las que el número de Reynolds y Weber son tales que  $Re = \rho U r_t / \mu \gg 1$  y  $We = \rho U^2 r_t / \sigma$ . Bajo estas condiciones, las frecuencias de producción,  $f_b$ , y los diámetros equivalentes de las burbujas obtenidas,  $d_b = [(6Q_g) / (\pi f_b)]^{(1/3)}$ , dependen sólo del ratio de velocidades gas-líquido,  $U_g/U$ , y del ratio  $r_t/U$ . Además, en los casos bajo consideración donde  $We \gg 1$ , el líquido exterior impone la velocidad a la que la interfase es transportada, con lo que se previene la coalescencia ya que las burbujas son transportadas a la velocidad del líquido [?]. Precisamente, en una operación normal con este tipo de dispositivos, la velocidad del gas suele ser mayor que la del líquido, con lo que las burbujas son

generadas cerca de la punta del inyector. Siguiendo las mismas ideas que el proceso basado en las fases de expansión y posterior colapso descrito en Sección 1.1, en [?] se desarrolla un modelo simple para la fase de colapso en el que puede comprobarse que, en el límite en el que  $U_g/U \gg 1$ , la frecuencia escala como  $f_b \simeq 0.15U/r_t$ .

Por otro lado, el caso contrario en el que  $Re \ll 1$  no ha sido muy reportado en la literatura [9]. En este caso, en lugar del número de Weber, el parámetro adimensional que gobierna el problema es el número capilar,  $Ca = \mu U/\sigma$ , además del ratio  $U_g/U$  como en el caso anterior y del ya descrito número de Bond,  $Bo$ . En este caso, tras el exhaustivo estudio numérico de [?], se tiene que el diámetro de las burbujas decrece cuando el ratio  $U_g/U$  también lo hace.

### 1.2.2 Dispositivos de Cross-Flow

Los dispositivos de tipo Cross-Flow son aquellos como los mostrados en la Figura 1.2d, donde puede apreciarse que el gas es inyectado de forma perpendicular al líquido a través de una junta en T. Para tener buen control y repetibilidad en los tamaños de las burbujas, estos dispositivos operan a números de Reynolds muy bajos, por lo que su mayor campo de aplicación se encuentra dentro de la microfluídica. Dado que operan a  $Re \ll 1$ , se observan diferentes regímenes en función del número capilar,  $Ca$ , como son el *squeezing*, *dripping* o *jetting*. De entre ellos, el que parece más apropiado para el control del diámetro de las burbujas es el *squeezing*, lo que ocurre cuando  $Ca \lesssim 10^{-2}$ . Por otro lado, una de las principales desventajas del empleo de este tipo de dispositivo es la baja frecuencia de producción derivada de la operación a bajos números capilares. En efecto, si se pretende aumentar la velocidad del líquido para aumentar dicha frecuencia, también se producirá un aumento del número capilar, lo que limita en general la frecuencia de producción de estos dispositivos a  $f_b \sim 10^3$  Hz.

Tanto los dispositivos con configuraciones de tipo Cross.Flow como los de Coflow permiten tener control de forma separada del diámetro de las burbujas y de su frecuencia, variando  $Q_g$  y  $Q$ . Sin embargo, a pesar de ser dispositivos microfluídicos de tamaños del orden de las centenas de milímetros (o mayores), su geometría limita el tamaño mínimo de las burbujas que se pueden obtener. Esta dificultad puede ser superada a través de otro método conocido como *Flow-Focussing* que utiliza una geometría un tanto diferente como se verá en la próxima subsección.

### 1.2.3 Dispositivos de Flow-Focussing

La sencillez de los dispositivos descritos anteriormente posee un notable inconveniente, pues si se elimina la inyección de gas las líneas de líquido son casi paralelas, con lo que los gradientes de presión existentes son prácticamente despreciables [9]. La demanda de diámetros cada vez menores de las burbujas hace que sea tecnológicamente inviable reducir tanto como se desee el diámetro del inyector, por lo que otras soluciones han emergido para paliar las limitaciones de las configuraciones de coflow y crossflow; una de ellas, es el empleo de dispositivos de *Flow-Focussing*. En geometrías de flow-focussing como las mostradas en la Figura 1.2b-c, la presencia del estrechamiento provoca (además de un coflujo de líquido y gas que previene la aparición de coalescencia) un gradiente longitudinal de presión, cuyo efecto principal es el de reducir el diámetro final de las burbujas obtenidas. Los primeros en reportar este fenómeno fueron [4], obteniendo burbujas de tamaños  $d_b \propto (10\mu m) < D$ , controlando simplemente el ratio  $Q_g/Q$  y el caudal de líquido exterior  $Q = \pi D^2 U/4$ , con  $D$  el diámetro del estrechamiento. En efecto, el papel del gradiente axial de presión es análogo al jugado por la gravedad en el caso de la Ecuación (1.4), esto es, tomando  $\Delta p_{exit} = \nabla p R_b$ , y teniendo en cuenta que el gradiente de presión puede ser obtenido de forma estimada de las ecuaciones de Navier-Stokes como

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p \Rightarrow \nabla p \sim \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \sim \rho U^2/D \quad (1.6)$$

se tiene, sustituyendo  $\Delta p$  en (1.4),

$$\frac{d_b}{D} \sim \left( \frac{Q_g}{Q} \right)^{2/5} \quad (1.7)$$

siendo pues la frecuencia de burbujeo

$$f_b = \frac{6Q_g}{\pi d_b^3} \propto \frac{U}{D} \left( \frac{Q_g}{Q} \right)^{-1/5} \quad (1.8)$$

por lo que este dispositivo también permite controlar de forma separada tamaño y frecuencia de producción simplemente a través de la variación de los reatios  $Q_g/Q$  y de la velocidad del líquido  $U$ . Uno de los principales escollos en el uso de este tipo de dispositivos se encuentra en la dificultad que supone conseguir un buen alineamiento entre los diferentes canales, lo que introdujo la configuración de la Figura 1.2c, que permite simplificar esta labor.

#### 1.2.4 Otros dispositivos y breve reflexión

Existe, además de los descritos en los apartados anteriores, otros dispositivos para generar burbujas de tamaño micrométrico de forma monodispersa, como son aquellos basados en la aplicación de ondas acústicas, tal y como se muestra en la Figura 1.2e-f, y lo que es más, nada impediría (en principio) combinar estos dispositivos con los anteriores, si se pretende reducir aún más el diámetro de las burbujas [9]. A través de los ejemplos más significativos de dispositivos que aquí se han presentado, el lector puede estimar que el tamaño característico de estos dispositivos se encontrará en un rango comprendido entre  $\sim \mathcal{O}(10\mu m)$  hasta  $\sim \mathcal{O}(10mm)$ , lo que a priori puede suponer una dificultad tanto de fabricación como de operación; además, a la dificultad de manejo de los instrumentos microfluídicos habría que sumar la limitación existente en la frecuencia máxima de producción, que estaría limitada por el tamaño de los dispositivos y cuya solución se encontraría en la fabricación de un número mayor de estos. Cabe entonces preguntarse si los mecanismos físicos ya descritos y que subyacen bajo los diferentes procesos de producción de microburbujas aquí presentados van aparajados necesariamente del empleo de dispositivos microfluídicos. En efecto, si bien a lo largo del capítulo se ha podido comprobar que existe una clara dependencia con el diámetro del inyector del gas (lo que apoya la necesidad del empleo de la microfluídica), también es cierto que las condiciones de contorno que el líquido exterior impone sobre la corriente gaseosa, bien únicamente mediante el transporte a la velocidad del líquido de la interfase (coflow y cross-flow) o bien sumando el gradiente longitudinal de presión provocado por un estrechamiento (flow-focussing), no tendrían (en principio) por qué ir ligadas taxativamente al empleo de geometrías micrométricas.

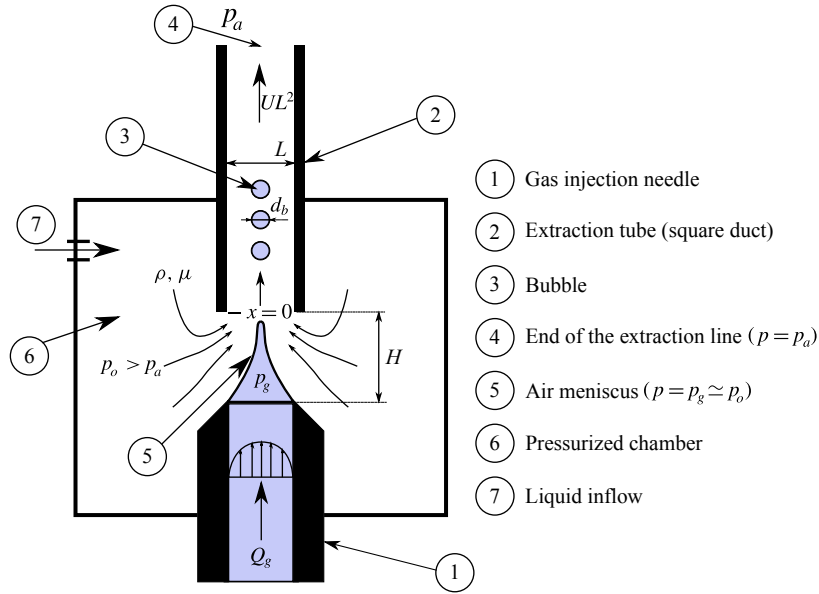
Así pues, en la siguiente sección de este capítulo se discute con más detalle el papel que el gradiente de presión juega en la formación de burbujas, prestando especial atención para ello en una técnica conocida como *Confined-Selective-Withdrawal* que presenta características comunes tanto a las configuraciones de coflow y flow-focussing. Se pretende así reforzar la idea de la importancia que juega el gradiente de presión en la formación de burbujas para, finalmente, plantear si cabría la posibilidad de plantearse un dispositivo capaz de generar microburbujas monodispersas de forma masiva con dimensiones características mucho mayores que las de los dispositivos empleados actualmente.

### 1.3 Influencia del gradiente de presión

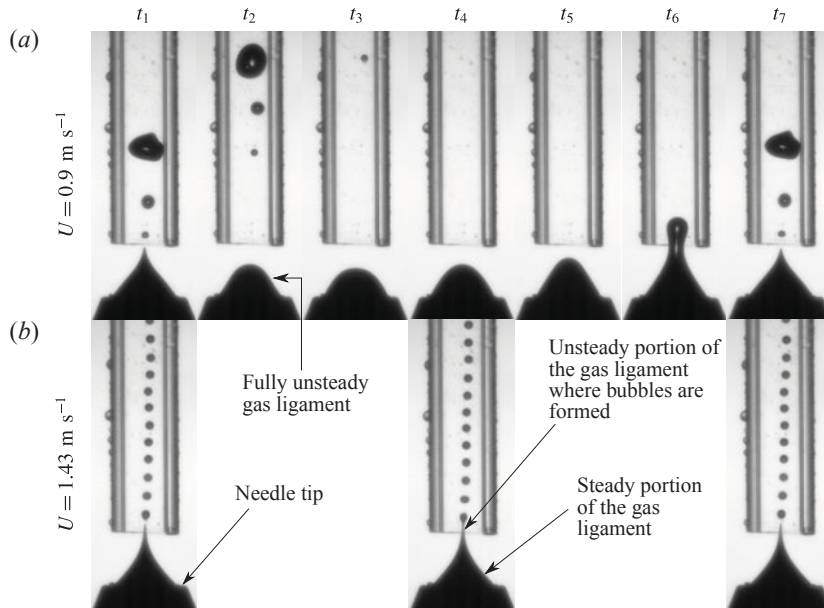
A lo largo de la Sección ??, se ha podido comprobar como el papel del líquido exterior en la generación de microburbujas puede ir desde simplemente imponer la velocidad de la entrefase previniendo la coalescencia hasta ejerecer un efecto análogo al de la gravedad a través del gradiente axial de presión. Las conclusiones extraídas en la Subsección 1.2.4 motivan indagar un poco más en el papel que dicho gradiente longitudinal de presión puede jugar en el proceso de formación de burbujas, por lo que se van a presentar de forma sucinta los resultados obtenidos [2] donde se obtuvieron burbujas de tamaño micrométrico empleando la técnica conocida como *Confined Selective Withdrawal*.

En la Figura 1.3 se describe esquemáticamente el funcionamiento de este dispositivo. El dispositivo consiste en cámara presurizada a  $p_0$  con un líquido, de densidad  $\rho$  y de viscosidad  $\mu$ , que se suministra desde el exterior y que descarga a  $p_a < p_0$  a través de una salida a través de un capilar (en este caso de sección cuadrada) de dimensiones características  $L = 1\text{ mm}$ . El capilar se encuentra perfectamente alineado con una aguja donde se inyecta el gas con caudal  $Q_g$  y que se encuentra a una distancia  $H$  del capilar. Como puede observarse en la Figura 1.4, para velocidades del líquido en el capilar inferiores a una  $U < U^*$ , el menisco emite burbujas de forma pulsante y de diferentes diámetros [2]. Sin embargo, por encima de esta velocidad, se puede observar que el menisco de aire se mantiene estable para una región  $x \leq x_s$ , lo que propicia la aparición de un régimen de producción de burbujas monodispersas; la condición de equilibrio de la que resulta  $x_s$  será discutida más adelante. Finalmente, en la Figura 1.5 se muestra como, para valores de  $U > U^*$ , aguas abajo de la zona estacionaria ( $x \leq x_s$ ), se produce un cilindro de gas de diámetro  $d_g$  y longitud  $\ell$  que, finalmente, culmina con la producción de una nueva burbuja; una vez la burbuja es emitida y transportada a la velocidad del líquido, se inicia nuevamente el proceso de formación de otra burbuja a través del mecanismo descrito.





**Figura 1.3** Esquema del dispositivo empleado en [2] para la producción de microburbujas con la técnica de Confined Selective Withdrawal. Imagen adaptada de [2].



**Figura 1.4** Diferentes regímenes de burbujeo en función de la velocidad  $U$  a la que el líquido circula a través del capilar. En (a) se visualiza el caso en que  $U < U^*$ , por lo que no se tiene un régimen de burbujeo constante, mientras que en (b),  $U > U^*$ , se consigue alcanzar un régimen de producción de burbujas monodispersas. Imágenes adaptadas de [2].

Aunque en [2] se analiza tanto el caso viscoso como el no viscoso, en esta sección nos centraremos únicamente en los casos  $Re \gg 1$ , ya que será el caso de interés para el dispositivo que aquí se describe. Antes de comenzar el análisis, conviene notar que la presión del gas,  $p_g$ , que además se considera constante a lo largo del mismo según la hipótesis ya comentada en la Sección 1.1, debe de encontrarse en equilibrio con la del líquido a la salida de la aguja, donde la velocidad del líquido es casi nula, por lo que puede suponerse que  $p_g \simeq p_0$ . Así, para obtener un menisco de aire estable en la región  $x \leq x_s$ , la diferencia de presiones  $p_0 - p(x)$  debe estar en equilibrio con la presión capilar. En efecto, considerando que el hilo gaseoso tenga un diámetro  $d_g$ , llamando  $U_0$  a la velocidad en el centro del tubo capilar, y teniendo en cuenta el cumplimiento de la

ecuación de continuidad

$$Q_g = \frac{\pi d_g^2}{4} U_0 \Rightarrow d_g \sim \left( \frac{Q_g}{U_0} \right)^{1/2}, \quad (1.9)$$

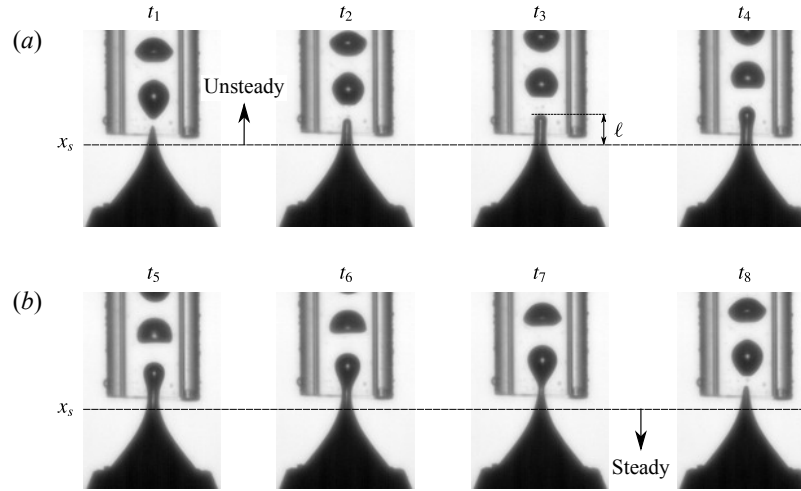
se tiene que

$$p_0 - p(x_s) = \frac{2\sigma}{d_g} \simeq \frac{2\sigma}{(Q_g/U_0)^{1/2}} \quad (1.10)$$

lo que proporciona la condición de equilibrio para que exista un menisco de aire estacionario en  $x \leq x_s$ . Tanto en (??) como en (??), la expresión de  $U_0$  vendrá determinada por el tipo de flujo que exista en el capilar, lo que para el caso en el que  $Re \gg 1$  y teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones<sup>3</sup> realizadas en [2] constituye un perfil uniforme de velocidad; efectivamente, este hecho queda representado por el valor del coeficiente de presión adimensional  $\xi = (p_0 - p(x)) / (1/2\rho U^2) \simeq 1$  en  $x = 0$ . Así, dado que  $p_0 - p(x_s) \sim 1/2\rho U^2$  para  $Re \gg 1$  y teniendo en cuenta que la formación de burbujas tendrá lugar si  $p_0 - p(x) > \frac{2\sigma}{d_g}$ , la formación de burbujas monodispersas será posible si

$$\beta = \frac{\rho U^2 L}{4\sigma} q^{1/2} \gtrsim 1 \quad \text{con } q = \frac{Q_g}{UL^2} \quad (1.11)$$

donde  $\beta$  en la Ecuación (1.11) constituye un parámetro similar al número de Webber,  $We = \rho U^2 L^2 / \sigma$ ; la validez de (1.11) queda mostrada en [2].



**Figura 1.5** Secuencia de producción de burbujas a partir de un menisco de aire estable para la región  $x \leq x_s$ . Como se aprecia en la figura, aguas abajo de  $x_s$ , se emite un cilindro de gas de diámetro  $\sim d_g$  que se extiende una longitud  $\ell$ . Imagen tomada de [2].

Una vez se han descrito las condiciones necesarias para la producción monodispersa de burbujas y se conocen las condiciones de equilibrio estacionario del menisco de aire, se está en condición de describir el resto del proceso de formación, así como las expresiones de los diámetros y frecuencias de producción de las burbujas obtenidas. Una vez que las burbujas se desprenden del ligamento de gas en  $Lx \approx Lx_s + \ell$ , la diferencia de presión  $\Delta p = p_0 - p(x) - 2\sigma/d_g > 0$ , induce velocidades radiales sobre el ligamento de gas que provoca el inicio del proceso de formación de una nueva burbuja. Dado que durante los instantes

<sup>3</sup> En [2] se realiza una simulación del dominio considerando este como axilsimétrico y sin simular la fase gaseosa, lo que suele realizarse generalmente cuando se desea estudiar la estabilidad de chorros, descomponiendo el campo de presiones como suma de la solución básica más una perturbación (véase como ejemplo [?]). En [2], sin embargo, se realiza la hipótesis, verificada *a posteriori*, de que la presencia de las burbujas no perturba el campo de presiones del líquido.

posteriores a la eyección de una nueva burbuja el diámetro del cilindro apenas varía, es posible escribir

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_0 - p(x) - 2\sigma/d_g = p_0 - p(x_s) - 2\sigma/d_g + p(x_s) - p(x) \approx \\ &\approx -\frac{dp}{dx}(x_s)(x - x_s) \approx \frac{d(p_0 - p)}{dx}(x_s) \frac{\ell}{L}\end{aligned}\quad (1.12)$$

donde se ha tenido en cuenta la Ecuación (1.10) y se ha realizado un desarrollo en serie de Taylor de primer orden de la presión en torno al punto  $x = x_s$ . De este modo, y tal y como se detalla en [2], la Ecuación (1.12) muestra como el proceso de formación de burbujas está gobernado por el gradiente de presión local en el punto  $x = x_s$ , por lo que, como ya se ha comentado previamente, el gradiente de presión local posee un papel absolutamente análogo al que tiene la gravedad en la formación de una burbuja en una piscina en reposo. Por lo tanto, siguiendo el procedimiento que se siguió en la Sección 1.1, si se sustituye la Ecuación (1.12), particularizada para el caso  $Re \gg 1$ , en la ecuación de Rayleigh-Plesset (Ecuación (1.1)), se tendrá que

$$\rho R_b \ddot{R}_b \propto \frac{d(p_0 - p)}{dx}(x_s) \frac{\ell}{L} \propto \frac{\ell}{2L} \rho U^2 P_s \quad (1.13)$$

siendo  $P_s = \xi(x_s)$ . La ecuación anterior junto con la ecuación de continuidad para la línea de gas

$$Q_g = \frac{\pi}{6} d_b^3 f_b \quad (1.14)$$

permiten obtener las frecuencias de producción,

$$\rho \frac{P_s U^2}{2} \ell \propto \rho R_b \ddot{R}_b \sim \rho d_b^2 f_b^2 \Rightarrow f_b \propto \frac{U \sqrt{P_s/2}}{\sqrt{L d_b}} \sqrt{\frac{\ell}{d_b}} \quad (1.15)$$

y, finalmente, tomando  $\ell \propto d_b$  empleando la analogía al caso de formación de burbujas en una piscina en reposo [2], la expresión final de la frecuencia y los diámetros de las burbujas.

$$f_b \propto \frac{U \sqrt{P_s/2}}{\sqrt{L d_b}} \quad \text{y} \quad \frac{d_b}{L} \propto \left( \frac{Q_g}{U \sqrt{P_s/2} L^2} \right)^{2/5} \quad (1.16)$$

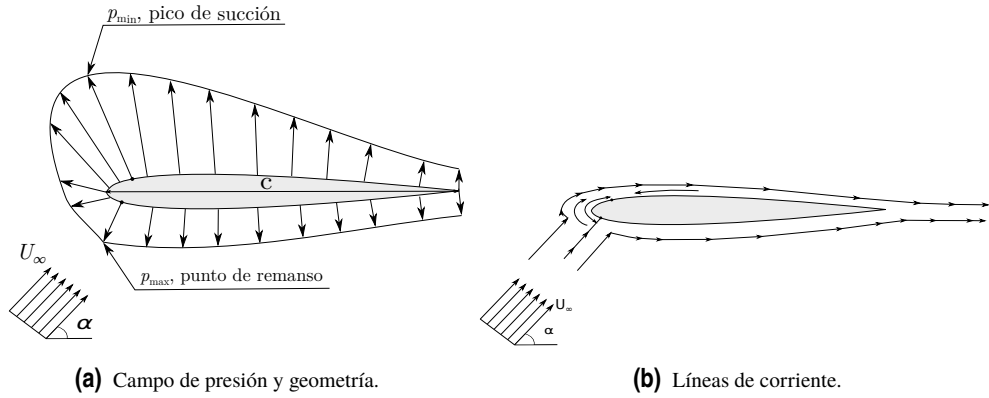
El proceso seguido para la obtención de las ecuaciones (1.15) y (??) es completamente análogo al descrito en la Sección 1.1 con el gradiente de presión local ejerciendo el papel de la gravedad y con la diferencia que  $\rho U^2/L \gg \rho g$ , lo que atendiendo a las ecuaciones de arriba, se traduce en un aumento de la frecuencia y una disminución de los diámetros obtenidos. Este hecho invita a pensar que, si el proceso de formación descrito está controlado por el gradiente de presión local en  $x_s$ , nada impide imaginar dispositivos generadores de burbujas donde los gradientes favorables de presión puedan obtenerse con geometrías tan diversas como diferentes a la descrita en [2].

## 1.4 Analogía Aerodinámica

Al final de La Sección 1.3, basándose en las ideas de [2], se dejó entrever la posibilidad de obtener gradientes favorables de presión similares a los encontrados en dispositivos de Confined Selective Withdrawal o Flow-Focussing pero con otras geometrías completamente diferentes. La motivación en la exploración de otras geometrías es doble: dispositivos con tamaños alejados de la escala de la microfluídica permitirían no sólo una fabricación y operación más sencilla sino también aumentar notablemente las frecuencias de producción de las burbujas. Así, un ejemplo cotidiano de geometrías donde se producen fuertes gradientes favorables de presión lo constituyen los perfiles aerodinámicos empleados como sección transversal en las alas de los aviones. Dado que la única premisa que, *a priori*, debe cumplir una geometría alternativa a las empleadas actualmente sería conseguir gradientes de presión comparables a los creados en los dispositivos microfluídicos, ¿qué impide pensar que se pueda emplear un ala para producir masivamente microburbujas monodispersas?

Conviene antes de seguir, no obstante, esbozar algunas ideas básicas en aerodinámica que permitirán comprender mejor la posibilidad de emplear un ala como dispositivo generador de burbujas. La Aerodinámica es la parte de la Mecánica de Fluidos que se encarga del estudio del movimiento de gases (generalmente aire) alrededor de un cuerpo. Teniendo en cuenta las propiedades del aire (densidad  $\rho_g \sim \mathcal{O}(1 \text{ kg/m}^3)$  y viscosidad  $\mu \sim \mathcal{O}(10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s})$  a  $T = 20^\circ$ ) y las velocidades características de un cuerpo que se mueve en él (tómese

como ejemplo un coche circulando a  $V = 30\text{ m/s}$  o el ala de un avión a  $V = 100\text{ m/s}$  se tiene que los números de Reynolds característicos del flujo de aire alrededor de un objeto con dimensiones características  $L = 1\text{ m}$  serán  $Re = \rho VL/\mu \sim \mathcal{O}(10^6)$ . Bajo estas condiciones los efectos viscosos pueden ser despreciados en la mayor parte del dominio del problema salvo en una delgada región adyacente a la superficie del cuerpo (capa límite), donde la viscosidad impone la condición de contorno de velocidad relativa nula para el fluido con respecto al sólido y donde, por lo tanto, los efectos de inercia y los viscosos son del mismo orden ( $Re \approx 1$ ); el espesor de esta capa puede ser estimado como  $\delta_L \sim LRe^{-1/2}$ , por lo que para el caso del ala de un avión ( $L \sim 1\text{ m}$ ) esta capa tiene un espesor de aproximadamente  $1\text{ mm}$ . Sin embargo, la importancia de esta delgada capa en la estabilidad del flujo alrededor del cuerpo es capital, ya que si sus efectos no estuvieran confinados a la mencionada región la hipótesis de viscosidad despreciable en el resto del dominio no sería asumible. En efecto, si la corriente experimenta un gradiente adverso de presión (como el que experimenta un fluido cuando circula a través de un canal que se ensancha o el que pueda existir en una esfera aguas abajo del punto más alto de la misma), las velocidades cerca de la pared del sólido son tan cercanas a cero que puede producirse una recirculación del fluido, lo que provocaría el desprendimiento de la capa límite. Para que esto no se produzca, se puede reducir el gradiente desfavorable de presión extendiendo la longitud del cuerpo aguas abajo del punto de mínima presión, lo que para el caso de un sólido en el seno del aire significaría emplear cuerpos fuselados (cuerpos con longitud transversal característica mucho menor que la longitudinal) en lugar de cuerpos romos (como sería por ejemplo una esfera). Además, para que la corriente no se desprenda, el ángulo con el que incide la corriente con respecto a línea media longitudinal del sólido, no debe ser muy elevado, ya que de lo contrario el desprendimiento también tendrá lugar.



**Figura 1.6** Representación esquemática de un perfil aerodinámico que enfrenta una corriente a la velocidad  $U_\infty$  que forma un ángulo de ataque  $\alpha$  con la cuerda,  $c$ , del perfil. En la Figura 1.6a se representan el campo de presión cambiado de signo ( $-(p(\mathbf{x}) - p_\infty)$ ), con  $\mathbf{x} \in \Sigma_s$ , indicando tanto el pico de succión (punto de mínima presión) como el punto de remanso (punto de máxima presión). En la Figura 1.6b se muestra una representación cualitativa de las líneas de corriente alrededor de un perfil aerodinámico. Adicionalmente se representan las zonas de fuertes gradientes favorables de presión, esto es la zona que, conteniendo el borde de ataque, se extiende desde el punto de remanso hasta el pico de succión, y la zona de gradiente desfavorable de presión, que se extiende aguas abajo del pico de succión y que se ha representado con una flecha indicando el sentido de la recirculación que podría producirse en la capa límite..

En la Figura 1.6a se representa de forma esquemática un perfil aerodinámico que enfrenta una corriente a la velocidad  $U_\infty$  que forma con la *cuerda del perfil*,  $c$ , un *ángulo de ataque*,  $\alpha$ . Considerando que el flujo incidente es uniforme y carente de vorticidad (esto es  $\omega = \nabla \times \mathbf{v} = 0$ ) y despreciando los efectos viscosos en todo el dominio excepto en la capa límite, la velocidad deriva de un potencial,  $\mathbf{v} = \nabla\phi$ , por lo que, imponiendo la ecuación de continuidad se llega al siguiente problema de contorno

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1.17)$$

$$\nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{x} \in \Sigma_s \quad (1.18)$$

$$|\nabla \phi| \rightarrow U_\infty, \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (1.19)$$

Con las hipótesis realizadas, la resolución de este problema arroja resultados cualitativos y cuantitativos que ayudarán a comprender mejor el campo de velocidades y en especial de presiones del fluido alrededor del perfil. El problema de la laplaciana, que puede ser resuelto con un método de elementos de contorno, normalmente se descompone como  $\phi = \phi_\infty + \phi'$ , siendo  $\phi_\infty$  el potencial correspondiente a una corriente uniforme de valor  $U_\infty$  con ángulo de ataque  $\alpha$  y  $\phi'$  el potencial de perturbación causado por la presencia del perfil. En la Figura 1.7 se muestran los resultados de una simulación realizada con el método de los elementos de contorno para problemas bidimensionales aplicada a un perfil simétrico NACA 0012 que se mueve en el seno de un fluido a un ángulo de ataque  $\alpha = 4^\circ$ . Como se puede observar en la Figura 1.7a y más detalladamente en la Figura 1.7b, la velocidad longitudinal de perturbación posee un mínimo que se corresponde con el punto de remanso (punto de máxima presión) en la Figura 1.7c; nótese que, por conveniencia, se ha definido el *Coeficiente de presión* como  $C_p = (p_\infty - p) / (1/2 \rho U_\infty^2)$ , es decir, de forma análoga a la definición de  $\xi$  en la Sección 1.3. Del mismo modo, el máximo de  $u'$  se corresponde con el punto de mínima presión (pico de succión) como se muestra en la Figura 1.7c y más detalladamente en la Figura 1.7d. Los resultados de la Figura ?? muestran como se pueden clasificar hasta 3 zonas diferentes atendiendo al gradiente de presión:

- Zona del intradós aguas abajo del punto de remanso: en esta zona la presión disminuye aguas abajo, por lo que el gradiente de presión es favorable. No obstante, esta disminución es muy lenta, por lo que el valor del gradiente de presión no es muy elevado.
- Zona del extradós aguas abajo del pico de succión: en esta zona la presión aumenta desde el punto de mínima presión y el borde de salida del perfil, por lo que el gradiente de presión es adverso. Esto hace que cerca de la pared del perfil puedan existir zonas de recirculación o flujo inverso, esto es, zonas de la capa límite donde la velocidad circula en sentido opuesto a la corriente no afectada por los efectos viscosos.
- Zona que contiene al borde de ataque entre el punto de remanso y el pico de succión: en esta zona el fluido evoluciona entre el punto de máxima y el de mínima presión, por lo que la aceleración es máxima y el gradiente favorable de presión también.

De estas tres zonas la que más despierta nuestro interés es la tercera, pues es donde se alcanzan mayores gradientes favorables de presión. Ahora bien, la pregunta que en este momento es pertinente es si estos gradientes de presión son comparables a los encontrados, por ejemplo, en [2]. Para encontrar respuesta a esta pregunta se muestra en la Figura 1.8 el valor del coeficiente de presión en la zona de interés del ala (Figura 1.8a) y el valor del coeficiente de presión en [2] para el caso  $Re \gg 1$  (Figura 1.8b). Dado que normalmente el coeficiente de presión para el caso del ala se adimensionaliza empleando la cuerda del perfil y en [2] se emplea el ancho de la sección capilar  $L$ , se deben reescalar los valores de este último para poder compararlos adecuadamente. De este modo, tomando los valores de la Figura 1.8

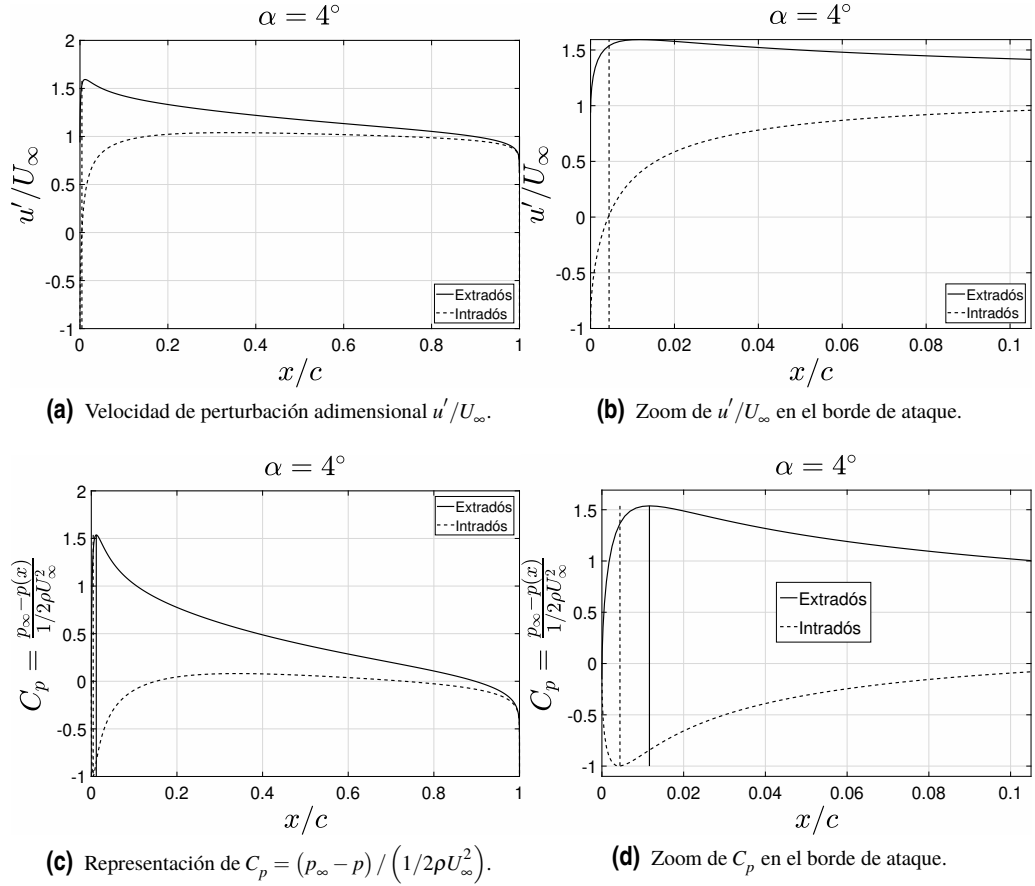
$$\frac{d\xi}{dx} \frac{c}{L} \sim \mathcal{O}(600) \quad (1.20)$$

$$\frac{dc_p}{d\bar{s}} \sim \mathcal{O}(430) \quad (1.21)$$

donde se ha calculado la pendiente de la curva de  $c_p$  correspondiente a  $\alpha = 12^\circ$ . A tenor de los valores mostrados en la Ecuación (1.21), queda patente como el gradiente de presión local alcanzado en el entorno del borde de ataque es comparable al que se tiene en [2], por lo que tiene sentido plantearse un dispositivo generador de burbujas monodispersas en forma de ala donde el gas sea inyectado en la zona de fuertes gradientes favorables de presión.

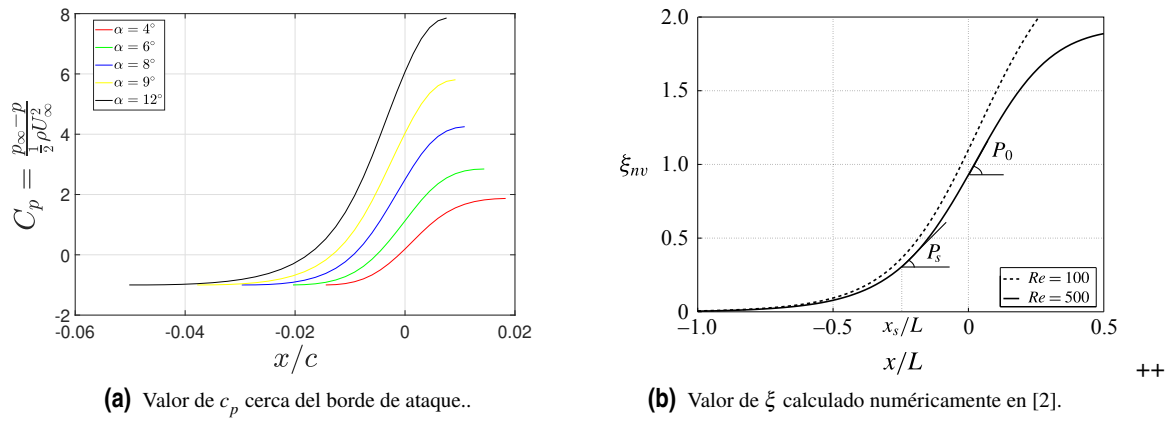
+

En este capítulo se ha mostrado una breve revisión del estado del arte en lo que a la producción de microburbujas para la industria y la medicina se refiere. Se han mostrado, basándose especialmente en [9], los fundamentos que gobiernan el problema de formación de burbujas, donde se ha mostrado como el gradiente de presión local juega un papel primordial en situaciones que van desde la generación de burbujas en una piscina en reposo hasta la producción en dispositivos de coflow y flow-focussing. Así, en [2], se muestra de forma tajante como el gradiente de presión local controla el proceso de formación de burbujas en un dispositivo de Confined Selective Withdrawal, hecho que permite pensar en geometrías completamente diferentes a las de los dispositivos microfluídicos actuales pero con la capacidad de generar gradientes favorables de



**Figura 1.7** Resultados de una simulación por el método de elementos de contorno de un perfil simétrico NACA 0012 cuando sobre él incide una corriente con ángulo de ataque  $\alpha = 4^\circ$ . En la Figura 1.7a se representa el campo de velocidad longitudinal de perturbación y en la Figura 1.7c su correspondiente campo de presión. La Figura 1.7b y la Figura 1.7d se muestra ampliada la zona cercana al borde de ataque, donde existen, como puede apreciarse, fuertes gradientes favorables de presión..

presión comparables a los de aquellos. Estos resultados, finalmente, permiten proponer el empleo de un perfil aerodinámico como dispositivo generador masivo de burbujas monodispersas, considerando pues los fuertes gradientes favorables de presión que se generan en el entorno del borde de ataque.



**Figura 1.8** Valor del coeficiente de presión en el borde de ataque de un perfil aerodinámico NACA 0012 (Figura 1.8a) para varios ángulos de ataque  $\alpha$  y en el experimento realizado en [2] (Figura 1.8b). En la Figura 1.8a  $c_p$  está representado en función del arco adimensional,  $\bar{s} = s/c$ , con origen en el borde de ataque del perfil y tomando una cuerda  $c = 0.3$  m para este caso. En la Figura 1.8b se representa el gradiente de presión en el punto  $x_s$  descrito en la Ecuación (1.10), mientras que en la Figura 1.8a se representa el gradiente de presión en un punto representativo del borde de ataque,  $\bar{s} = 0$ . Nótese que el valor del gradiente de presión adimensional depende de la coordenada adimensional elegida..





## 2 Ala acuática bidimensional

---

Al final del capítulo anterior se expuso la posibilidad de emplear los gradientes favorables de presión se producen en el borde de ataque de un perfil aerodinámico (cuando sobre él incide una corriente con un ángulo de ataque  $\alpha$  determinado) como mecanismo para la formación de microburbujas monodispersas, basándose por analogía en los resultados de [2]. El objetivo de este capítulo es pues materializar esta idea diseñando, fabricando y realizando experimentos con un dispositivo generador masivo de microburbujas consistente en un perfil aerodinámico<sup>1</sup>. De este modo, se pretende no sólo demostrar que la producción de burbujas de tamaños milimétricos y submilimétricos no lleva necesariamente aparejado el empleo de dispositivos microfluídicos. Además, se contrastarán las hipótesis realizadas en el capítulo anterior y se explorarán las diferentes dificultades que puedan presentarse en el proceso de escalado.

La estructura que tomará el capítulo será la siguiente:

1. En la Sección 2.1, se describe todo lo concerniente al diseño y fabricación del modelo completo, que comprende el dispositivo generador de microburbujas y el montaje experimental del mismo.
2. En la Sección ??, se especifican los métodos de experimentación y análisis que serán empleados en la obtención de resultados. De este modo, se describirá la configuración final del *set-up*, el protocolo de experimentación, los datos en bruto obtenidos y el posterior tratamiento para el análisis de los mismos.
3. Finalmente, en la Sección ??, se muestran y comentan los resultados obtenidos, realizando las conclusiones pertinentes al final del capítulo

### 2.1 Diseño y fabricación

El objetivo de esta sección es describir de forma detallada los parámetros que configuran el diseño del modelo, tanto aquellos que se refieren al dispositivo en sí como al montaje experimental. Para ello, se describen sucintamente en primer lugar los equipos de los que se dispone y las distintas limitaciones de cada uno de ellos, con el fin de poder acotar el diseño final.

#### 2.1.1 Equipos disponibles y limitaciones

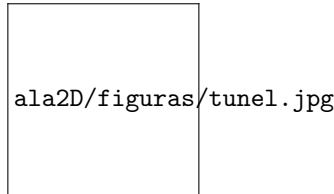
La implementación de esta prueba de concepto consistente en un perfil bidimensional implica que la forma más sencilla de crear una corriente relativa entre el fluido y el perfil sea fijando este último y haciendo incidir sobre él un líquido a la velocidad uniforme  $U_\infty$ ; esta implementación puede realizarse perfectamente en un túnel hidrodinámico. Por otro lado, se precisará de un sistema de inyección de aire que permita la formación de las burbujas, por lo que se requiere una línea de presión acompañada de manorreductores que permitan abordar esta tarea. Finalmente, para poder obtener y posteriormente analizar los datos extraídos

---

<sup>1</sup> El diseño de un ala para que pueda realizarse la hipótesis de perfil bidimensional no es trivial, por lo que esta cuestión se abordará con el debido detalle en la Subsección ??.

**Tabla 2.1** Dimensiones relevantes del túnel hidrodinámico.

Dimensión	Valor [cm]
Ancho de la sección	slka
Altura de la sección	sajfios
distancia entre soportes	fljisd

**Figura 2.1** Perspectiva del túnel hidrodinámico donde los experimentos han sido realizados..

del experimento, será necesario poder documentarlo, para lo cual se hará uso de una cámara de vídeo. Esta cámara no puede ser cualquiera, ya que el fenómeno que se pretende grabar ocurre en unas pocas fracciones de segundo. En efecto, si se pretenden obtener con este dispositivo burbujas de tamaños comparables a las encontradas en [2], esto es  $d_b \sim \mathcal{O}(200 \mu\text{m})$ , y se estima que las burbujas son convectadas aguas abajo del perfil a una velocidad<sup>2</sup>  $v \sim U_\infty$ , se tendrá que una burbuja recorre una distancia del orden de su diámetro en un tiempo  $t_b \sim d_b/U_\infty \sim \mathcal{O}(200 \mu\text{s})$ , por lo que serán necesarios del orden de 5000 fotogramas por segundo (en adelante fps): se necesita, por lo tanto, una cámara de alta velocidad.

### Túnel hidrodinámico

En el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Superior de Ingeniería de Sevilla se dispone de un túnel hidrodinámico como el mostrado en la Figura 2.1. Como puede observarse en la figura, el túnel consiste en un conducto de sección rectangular a través del cual se hace circular un líquido (en este caso agua) utilizando para ello una bomba. Una vez que la bomba ha hecho ascender al líquido hasta la altura adecuada, se le hace pasar a través de una cámara de contracción cuyo fin es uniformizar el flujo incidente en la cámara de ensayos (zona transparente del túnel). Pese a no apreciarse en la imagen, el túnel se encuentra abierto y en contacto con la atmósfera en su parte superior, mientras que la parte inferior del mismo también está formada por cristales de igual transparencia que las paredes laterales. Las dimensiones del túnel pueden consultarse en la Tabla 2.1

Para el control del caudal que circula a través del túnel hidrodinámico se disponen de dos grados de libertad: la altura total del agua (esto es, la fracción de la sección del túnel que queda mojada) y la velocidad media del agua en la sección. Dado que el túnel se encuentra abierto en su parte superior, se ha comprobado experimentalmente que la velocidad del túnel no puede excederse por encima de  $U_\infty \sim 0.75 \text{ m/s}$  si se quiere evitar la formación de ondas superficiales. Por lo tanto, se tomará como restricción al diseño que la velocidad de la corriente incidente no puede superar este valor, es decir,

$$U_\infty \leq 0.75 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

Finalmente, cabe destacar que el control de la velocidad del túnel se realiza a través de un regulador de potencia, por lo que la medida de la velocidad para cada potencia debe determinarse experimentalmente.

### Reguladores de presión

La formación de burbujas requerirá que se inyecte aire en ciertos puntos de la superficie del ala, el cual debe proceder desde dentro de la misma. Para poder suministrar aire se dispone de una red de presión capaz de suministrar más de 6 bares de presión, lo cual es más que suficiente para el propósito que nos ocupa. Para regular de forma adecuada la presión se dispone de manorreductores cuya precisión es de 1 mbar.

### Cámara de alta velocidad

Se dispone de una cámara Phantom v710 como la que se muestra en la Figura ??, capaz de grabar a más de 1 millón de fps. Dado que, según se comentó al inicio de esta sección, serán necesarios en torno a 5000 fps, esta cámara es capaz de acometer dicha tarea sin problema alguno. Adicionalmente, se disponen de dos

<sup>2</sup> En [?], las burbujas son convectadas a la velocidad de la corriente, siendo en este caso  $U$  la velocidad media en el capilar para  $Re \gg 1$ .

objetivos Canon® diferentes con zoom 1-4 y 2.5-10, respectivamente. Finalmente, cabe destacar que la distancia focal de la cámara es de aproximadamente 11 cm.

### 2.1.2 Diseño del ala

Una vez que se consideran los equipos disponibles y las restricciones que pueda imponer cada uno, es momento de pasar a especificar el diseño final del ala. Dado que la sección transversal del ala consiste en un perfil aerodinámico, se ha decidido que el proceso de fabricación sea mediante control numérico, empleando un polímero de ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno, de sus siglas en inglés) como materia prima. La fabricación por control numérico aúna las ventajas de la impresión 3D y la fabricación tradicional, ya que las paredes de la pieza obtenidas son siempre macizas<sup>3</sup> lo que aportará la robustez necesaria para soportar la experimentación del ala en el agua del túnel hidrodinámico.

Para la sección transversal del ala se disponen de dos opciones principales en lo que a perfiles aerodinámicos se refiere: o bien se opta por diseñar un perfil personalizado, o bien se emplea alguno de los perfiles normalizados ya existentes, por ejemplo los de la serie NACA. Se ha elegido para este primer prototipo el conocido perfil simétrico NACA 0012, que posee un espesor máximo relativo a la cuerda  $t/c = 0.12$ . El motivo de empleo de un perfil de estas características se basa principalmente en que el NACA 0012 es uno de los perfiles aerodinámicos más estudiados, lo que unido a la sencillez en su diseño lo hacen idóneo para una primera prueba de concepto. No obstante, el empleo de un perfil con curvatura no supondría una pérdida de generalidad en los resultados obtenidos adelante.

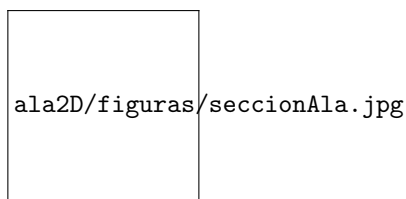
Decidido el perfil aerodinámico que se empleará como sección transversal del ala, tan sólo es necesario definir la cuerda,  $c$ , y la envergadura,  $b$ , para tener completamente definida la geometría exterior del ala. Para la cuerda es necesario tener en cuenta los puntos de sujeción que tendrá el ala dentro del túnel hidrodinámico. En principio, podría optarse por disponer de 2 únicos puntos de sujeción (uno a cada lado del ala) que fueran acoplados en torno a una distancia  $c/2$  del borde de ataque. Sin embargo, dado que en los experimentos se pretende variar el ángulo de ataque de la corriente incidente, el diseño de un sistema capaz de variar la inclinación del ala con sólo 2 puntos de sujeción es bastante complejo. Por ello, resulta más sencillo disponer de 4 puntos de sujeción, de forma que se sitúen 2 de ellos cerca del borde de ataque y otros dos cerca del borde de salida, permaneciendo los primeros fijos durante la operación experimental, lo que permite variar la inclinación del ala y con ello el ángulo de ataque  $\alpha$  con el que incide la corriente. El valor que toma la cuerda, de este modo, debe ser tal que permita que el ala se sitúe entre 2 puntos de soporte consecutivos del túnel (véase la Tabla 2.1), por lo que se ha decidido darle un valor  $c = .3$  m. En este momento, elegida la magnitud de la cuerda, se está en condiciones de poder calcular el número de Reynolds global en el ala,

$$Re_c = \frac{\rho U_\infty c}{\mu} \sim \mathcal{O}(10^5) \gg 1. \quad (2.2)$$

donde se ha tomado un valor orientativo  $U_\infty \sim 0.5$  m/s. Por lo tanto, la magnitud de la cuerda escogida permite sin mayor complicación disponer de las condiciones de  $Re_c \gg 1$  tal y como se pretendía. El cálculo del valor adecuado que se debe dar a la envergadura, por otro lado, sigue un razonamiento diferente. Modelar experimentalmente un problema bidimensional no es una tarea fácil en la mayoría de los campos de la física, ya que se deben asegurar el cumplimiento de las hipótesis que con el fin de simplificar el problema base se hayan realizado. Como se comentó en la Sección 1.4, para el caso de el movimiento de un sólido fuselado en el seno de un fluido incompresible a altos números de Reynolds tal que el flujo inicialmente es irrotacional, se obtiene el problema descrito por las ecuaciones (1.19). La linealidad del problema de contorno especificado, admite que pueda ser resuelto mediante superposición de soluciones elementales de la laplaciana, como son los términos fuente (y/o sumideros), los torbellinos y los dobletes. Por otro lado, cuando existen contornos rígidos como una pared, la teoría de campos permite emplear el *método de las imágenes*, que consiste en aplicar una simetría en la distribución de soluciones elementales respecto al contorno en cuestión de forma que se cumplan las condiciones de contorno en la pared (en este caso,  $\nabla\phi \cdot \mathbf{n} = 0$ ), lo que permite modelar el efecto que la pared ejerce sobre el campo potencial solución del problema respecto al campo original. De este modo, este mismo razonamiento puede ser empleado de forma inversa: para modelar un perfil aerodinámico bidimensional, se tendría que disponer de un ala *infinitamente* larga, de modo que los torbellinos de la punta no indujeran velocidades transversales a la corriente incidente<sup>4</sup> y por tanto perpendiculares al plano del problema 2D, rompiendo así la hipótesis de bidimensionalidad. Gracias al método de las imágenes, es posible

<sup>3</sup> Mediante impresión 3D también es posible emplear un 100% de entramado, con lo que se obtendrían resultados parecidos con el mismo material; si bien, el empleo de la técnica de impresión 3D con entramados tan elevados suele llevar aparejado un alto coste.

<sup>4</sup> Este aspecto pertenece a la teoría de alas de envergadura finita, cuya descripción detallada puede encontrarse en el Capítulo ?? y en el



**Figura 2.2** Perspectiva de la sección longitudinal del dispositivo generador de microburbujas. En la figura puede apreciarse el interior hueco del ala que se hallará presurizado para poder suministrar el caudal de gas requerido. .

**Tabla 2.2** Posición de la abcisa, adimensionalizada con la cuerda del perfil, de los orificios de inyección de aire..

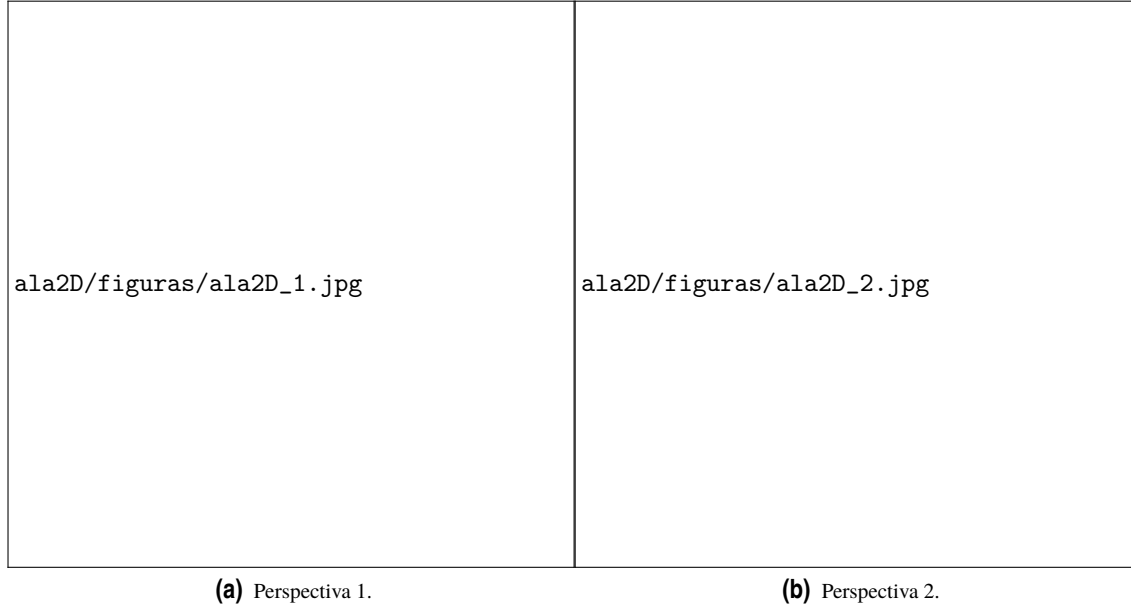
Puntos	1	2	3	4	5	6	7
$x/c$	1	2	3	4	5	6	7

modelar este comportamiento si se empostra el ala en las paredes del túnel, para lo cual la envergadura del ala tendría que coincidir con el ancho de la sección. Sucede sin embargo que las paredes del túnel son de cristal, lo que imposibilita la opción de atornillar o taladrar en ellas la sujeción del ala, de modo que se empleará una envergadura ligeramente inferior que permita un sistema alternativo de sujeción, descrito en la Subsección 2.1.3; nótese que, al no poder aplicar estrictamente el método de las imágenes, se está realizando pues la hipótesis de comportamiento bidimensional, que tendrá que ser corroborada *a posteriori*. El valor empleado de la envergadura es pues  $b = loquesea$ .

Hasta este punto se tiene completamente definida la geometría exterior del ala, pero aún no posee las condiciones para poder generar burbujas. Como ya se comentó previamente, el aire debe inyectarse a través de determinados orificios de la superficie del ala, por lo que el gas debe provenir directamente desde dentro de la misma. Para ello, se disponen de dos posibilidades. Una sería llevar el aire desde un depósito situado en el exterior del túnel a través de conductos (como son los tubos de *tygon* o tubos de *peek*) hasta cada orificio, lo que sería directo pero complicaría el diseño, al tiempo que requeriría un sellado muy meticuloso de la zona de intersección de los tubos con el ala. La otra, sería convertir el propio ala en un depósito, para lo cual simplemente habría que diseñar el dispositivo de forma que fuera hueco por dentro. Esta última opción es la que se ha elegido, pudiéndose observar en la Figura 2.2 un corte longitudinal en perspectiva donde se aprecia la oscuridad interior. Así, a través de un orificio roscado con, un racor adaptará el interior del ala a la red de presión disponible.

Para concluir el diseño del sistema de inyección de aire, es necesario indicar los puntos donde se situarán los orificios a través de los cuales el aire será introducido en el líquido. Recordando las conclusiones extraídas en el capítulo anterior, resulta evidente que los orificios deben situarse en las zonas donde el gradiente favorable de presión sea mayor, esto es, la región que, conteniendo al borde de ataque, se encuentra entre el punto de remanso y el pico de succión del perfil. No obstante, la posición de sendos puntos no es fija, sino que depende (para un perfil simétrico) depende del ángulo de ataque de la corriente incidente, por lo que parece conveniente distribuir los puntos de inyección en un entorno del borde de ataque y sobre una misma superficie del perfil (extradós o intradós), que será donde se grabe el proceso de formación de burbujas. De este modo, en cada punto y para cada  $\alpha$ , se tendrán distintos valores del gradiente de presión adimensional,  $dc_p/dx$ . Cabe apreciar además, que puede darse la circunstancia de que, para determinados valores de  $\alpha$ , los puntos pasen de encontrarse en una zona de gradiente favorable de presión a una zona de gradiente desfavorable de presión, o lo que es lo mismo, aguas abajo del pico de succión. En la Tabla 2.2 se muestran las posiciones adimensionalizadas con la cuerda de la abcisa de los puntos de inyección tomando  $x$  según el eje longitudinal de simetría del perfil con origen en el borde de ataque (Figura 1.6a)

Finalmente, en lo que se refiere al diámetro y longitud de los orificios, se debe tener en cuenta que resulta primordial asegurar la constancia del caudal durante el experimento, lo que no será trivial si se tienen en cuenta las perturbaciones que puedan existir tanto en la presión dentro del ala como en la presión en el otro extremo del orificio (al agua bordeando el perfil). Para minimizar las variaciones de caudal causadas por las perturbaciones de presión y con idea de poder efectuar variaciones graduales de caudal mediante una variación mínima de presión de 1 mbar (precisión de los manorreductores), la solución que se propone es el empleo de tubos capilares que generen una gran pérdida de carga. En efecto, si se asume que el flujo en el



**Figura 2.3** Diferentes perspectivas del dispositivo generador de microburbujas bidimensional empleado en los experimentos..

interior del tubo capilar es tal que  $Re_D D/L_t \ll 1$ ,<sup>5</sup> con  $Re_D = 4Q_g/(\pi Dv)$  el número de Reynolds basado en el diámetro del tubo  $D$  y  $L_t$  la longitud del mismo, el flujo de gas por el interior del tubo es casi-unidireccional y sigue la ley de Hagen-Poiseuille,

$$Q_g = \frac{\pi D^4}{128\mu_g} \frac{\Delta p}{L_t} \quad (2.3)$$

donde  $\Delta p$  es el incremento de presión entre el interior y el exterior del ala. Si se llama ahora  $\delta p$  a la perturbación en el incremento de presión, se tiene que el incremento de presión total será  $\Delta p = \Delta p_0 + \delta p$ , que provocará un flujo de air total igual a

$$Q_g = Q_{g0} + \delta Q_g = \frac{\pi D^4}{128\mu_g L_t} (\Delta p_0 + \delta p) \Rightarrow \delta Q = \frac{\pi D^4}{128\mu_g L_t} \delta p = \frac{\pi D^3}{128\mu_g} \frac{D}{L_t} \delta p \quad (2.4)$$

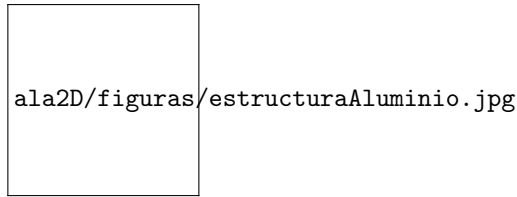
Por lo tanto, según la Ecuación (2.4), se tiene que las perturbaciones en los incrementos de presión provocarán incrementos de caudal más pequeños cuanto menor sea el diámetro  $D$  y el cociente  $D/L_t$ . De este modo, para que la inyección de aire a caudal constante sea lo más estable posible, se hace necesario reducir todo lo posible el diámetro del orificio de salida. Así pues, considerando las limitaciones tecnológicas existentes para perforar un orificio del tamaño de, por ejemplo  $200 \mu\text{m}$ , la mejor alternativa resulta en utilizar tubos capilares con el diámetro interior que se requiera y un diámetro exterior más manejable que permita su inclusión dentro de los orificios del ala. Para el prototipo que se está describiendo, se han empleado tubos capilares de acero con diámetro exterior  $D_{ext} = 400 \mu\text{m}$  y diámetro interior  $D = 160 \mu\text{m}$ .

Para concluir esta sección, se muestran en la Figura 2.3 diferentes perspectivas del aspecto final del dispositivo generador de microburbujas descrito hasta este punto. Nótese la presencia en los extremos laterales del ala de un orificio pasante cerca del borde de ataque así como otro ciego cerca del borde de salida: estos orificios, que forman parte del sistema de variación del ángulo de ataque, serán descritos en detalle y por conveniencia dentro de la Subsección 2.1.3.

### 2.1.3 Diseño del montaje experimental

Una vez ya se tiene completado el diseño y la fabricación del ala, tan sólo queda crear un montaje adecuado para poder realizar los experimentos. El primer objetivo de este montaje será un sistema capaz de no sólo

<sup>5</sup> Esta hipótesis podrá ser comprobada una vez se analicen los resultados en la Sección 2.3



**Figura 2.4** Estructura de aluminio emplead como sistema posicionador del ala dentro del túnel hidrodinámico. En su parte posterior, los largerillos incluyen dos cilindros que permiten el paso de las varillas que permiten regular la inclinación del ala..

posicionar el ala dentro del túnel hidrodinámico sino también de poder variar el ángulo de ataque,  $\alpha$ . En la Figura 2.4 puede observarse que la estructura consta de los siguientes componentes:

- Dos largeros longitudinales, los cuales sirven para anclar la estructura a los tornillos que sobresalen en la parte superior del túnel, de forma que la unión con este sea lo más robusta posible.
- Dos largeros anteriores verticales, que ejercen la función de puntos de sujeción del ala cerca del borde de ataque. Estos largeros, que deben estar completamente en contacto con las paredes laterales del túnel, poseen orificios que permiten el paso del eje que recorre transversalmente al ala y que forma parte del sistema de variación del ángulo de ataque.
- Dos largeros transversales, de los cuales el situado en la parte delantera (cerca del borde de ataque del ala) sirve para dar robustez a la estructura, mientras que el trasero (además de proveer estabilidad), incluye el sistema de variación del ángulo de ataque.

El sistema de variación del ángulo de ataque, por lo tanto, funciona del siguiente modo: un eje metálico pasa a través del orificio pasante del ala cerca del borde de ataque (véase la Figura 2.3), desembocando en las ranuras practicadas en los largeros verticales, con lo que el único grado de libertad no impedido del ala es el giro alrededor de dicho eje; por otro lado, en su parte posterior, dos varillas atornilladas cerca del borde de salida sujetan el ala al largero transversal trasero, pasando cada varilla a través de un espárrago que fija la posición de las mismas con un tornillo de teflón (este tipo de tornillo permite fijar la posición de las varillas sin perforarlas o dañarlas).

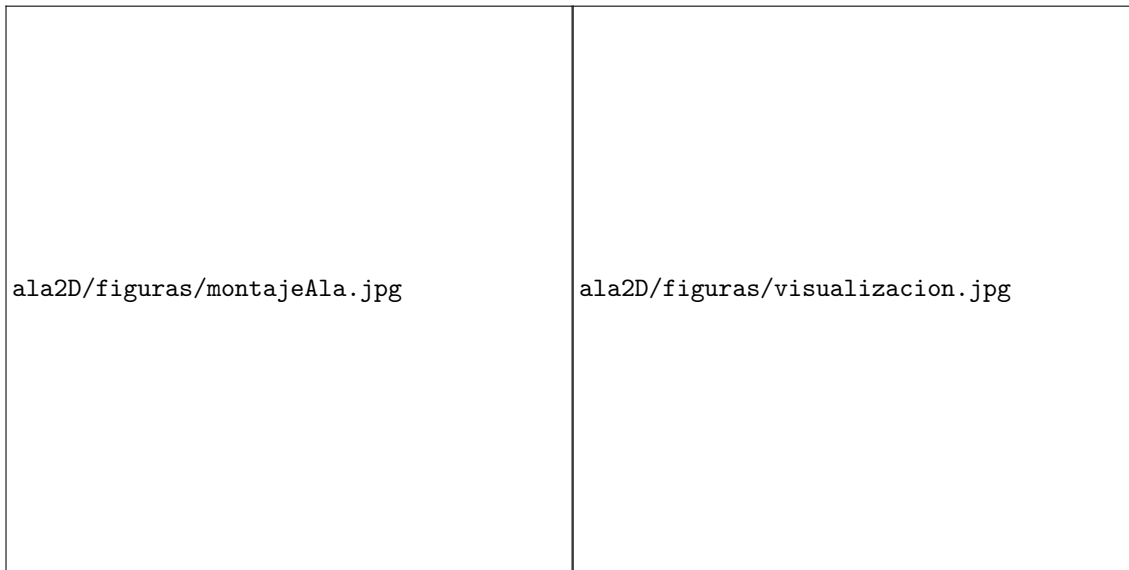
Una vez el ala es fijada dentro del túnel, para completar el montaje se debe instalar el equipo de visualización. En la Figura 2.5, donde puede apreciarse todo el montaje experimental completo, se muestra en qué consiste el equipo de visualización: la cámara de alta velocidad descrita en la Subsección 2.1.1 es instalada de forma vertical a un sistema de posicionadores que permite cambiar la posición de la cámara de forma muy precisa; además, se dispone de una lámpara de luz fría que mediante un tubo de fibra óptica permite iluminar adecuadamente la zona que se desea documentar. La presencia de la superficie libre en la zona superior del túnel hace que la visualización desde dicha zona sea imposible, por lo que debe grabarse en vertical desde abajo.

## 2.2 Experimentos

Tras el recorrido realizado a través del proceso de diseño y fabricación de este dispositivo generador de burbujas, es el momento de testarlo con una exhaustiva campaña experimental. En esta sección se muestran todos los detalles concernientes al experimento, tales como los parámetros que se han empleado y el rango en el que estos han variado, así como el protocolo seguido durante una serie experimental. Finalmente, para concluir la sección, se especifican cuáles son los datos brutos del proceso experimental y en cuáles son los métodos empleados para el procesamiento de dichos datos, cuyos resultados serán mostrados en la siguiente sección.

### 2.2.1 Campaña experimental

Atendiendo a los resultados hallados en [?] y resumidos en la Sección 1.3, el diámetro y frecuencias de las burbujas producidas dependerá, dada una geometría fija, del caudal de gas inyectado, la velocidad del líquido exterior y del gradiente de presión local adimensionalizado en el punto de formación de la burbuja. Son estos, por lo tanto, las tres variables que configuran el espacio paramétrico que debe ser testeado en los experimentos. En la Tabla ?? se muestran los valores empleados de estos tres grados de libertad para los

**(a)** Montaje del ala en el túnel.**(b)** Equipo de visualización.**(c)** Montaje experimental completo.

**Figura 2.5** Montaje experimental completo. En la Figura 2.5a puede apreciarse el sistema de posicionamiento del ala y variación del ángulo de ataque mientras que en la Figura 2.5b se muestra el equipo de visualización. La Figura 2.5c muestra una perspectiva del montaje experimental..

**Tabla 2.3** Rango paramétrico empleado durante la realización de los experimentos..

Parámetros	$U_{\infty}$ [m/s]	$P_{int}$ [mbar]	$\alpha$ [°]
Valores	0.3, 0.5, 0.6, 0.72	120, 289, 400, 520, 650, 789	4.66, 6.11, 8.5, 10, 12

diferentes experimentos; nótese que, dado el montaje realizado, no se puede controlar directamente el valor del caudal, ya que este depende de la diferencia de presión entre el interior y el exterior del ala, siendo esta última variable con la velocidad y el ángulo de ataque. Por lo tanto, se toma como variable libre el valor de la presión interior del ala, debiendo calcularse el caudal de gas inyectado *a posteriori*. Conviene destacar los siguientes aspectos de los valores de la tabla:

- Los valores de la velocidad incidente son determinados, como ya se especificó, de forma indirecta, ya que el regulador de potencia del túnel no permite controlar directamente la velocidad. Los detalles del sistema de medición de velocidad se especifican más adelante en la Subsección 2.2.2.
- Los valores de la presión interior del depósito fueron fijados durante una de las primeras pruebas experimentales, comprobando cuándo se producían variaciones significativas en los diámetros de las burbujas al variar la presión interior del ala manteniendo la velocidad y el ángulo de ataque constantes.
- Los valores del ángulo de ataque que figuran en la Tabla ??, han sido calculados *a posteriori* según los métodos especificados más adelante. Los valores orientativos del ángulo de ataque que se pretendían conseguir varían entre  $4 - 12^\circ$  cada  $2^\circ$ . Cabe decir que no se consideraron valores  $\alpha > 12^\circ$  con el fin de estar suficientemente lejos de los valores que propiciarían el desprendimiento de la capa límite.

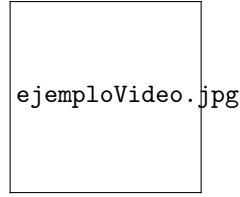
Por otro lado, para la grabación de imágenes a alta velocidad, cabe destacar que se ha empleado una resolución grabando a una velocidad de fps. Así pues, habiendo especificado tanto los valores entre los que variarán los parámetros del experimento como las condiciones de grabación, se puede describir cuál es el protocolo que permite la obtención de datos de una serie experimental (esto es, una combinación de la terna  $[P_{int}, U_{\infty}, \alpha]$ ), de modo que sirva de ejemplo del proceso completo de obtención de los datos que serán procesados en la siguiente sección.

El protocolo de experimentación seguido busca efectuar los realizar los ensayos de la forma más rigurosa y eficiente posible, optimizando los tiempos requeridos para cada tarea. Una vez se tiene el ala fijada en el túnel hidrodinámico, el circuito de presión conectado al ala con una presión arbitraria (pero lo suficiente para evitar que entre agua a través de los orificios) y el sistema de visualización correctamente configurado y enfocado, se procede del siguiente modo:

1. Se fija el ángulo de ataque,  $\alpha$ , deseado para dicho experimento. Para ello se deben mover las varillas hasta encontrar (ayudándose de un transportador) aproximadamente el ángulo buscado y posteriormente fijarlas.
2. Una vez encontrado el ángulo de ataque, se toma una fotografía de la forma más ortogonal posible de la sección transversal del ala. Dicha imagen será utilizada para calcular el ángulo de ataque real con el que incide la corriente.
3. En este punto, si fuera necesario, se vuelve al paso 1 hasta encontrar un valor aproximado al esperado para  $\alpha$ .
4. Fijado el valor de  $\alpha$ , se selecciona la velocidad a la que se realizará el ensayo.
5. Finalmente, se selecciona una presión interior de las encontradas en la Tabla ?? y se deja transcurrir un tiempo suficiente hasta alcanzar un régimen estacionario<sup>6</sup>.
6. Se configura la cámara para que inicie la grabación y se toman 3 vídeos de 3 instantes diferentes con la intención de poder realizar una media de los valores obtenidos.
7. Mientras se produce la grabación de los vídeos, se regula la presión para poder continuar con el siguiente valor.

<sup>6</sup> Durante la operación experimental este tiempo podía consistir en 20-30s, que es el tiempo que se tardaba en configurar y preparar el video para la grabación. En la Sección 2.3 se comprobará como este tiempo es mucho mayor que el tiempo de difusión viscosa  $D^2/\nu_g$  o el tiempo característico que emplea el gas en recorrer el tubo capilar.





**Figura 2.6** Ejemplo de imagen extraída de uno de los videos realizados a fps. La imagen muestra un experimento con  $\alpha = 8^\circ$ ,  $U_\infty =$  y  $P_{int} =$ .

8. Finalizadas todas las pruebas variando la presión interior del ala y manteniendo la velocidad y el ángulo de ataque constantes, se procede a cambiar el valor de la velocidad y repetir los pasos 5-7, y así hasta completar todas las velocidades.
9. Finalmente, si se desea, se modifica el valor del ángulo de ataque y se repiten los pasos anteriores.

### 2.2.2 Datos obtenidos y métodos de postproceso

Llegados a este punto y concluidos todos los experimentos, se dispone de un material en bruto que requiere un meticuloso postproceso para su posterior análisis. Es objeto de esta sección detallar los métodos que se han utilizado para llegar a los resultados mostrados en la Sección 2.3.

#### Videos

Fruto de los ensayos realizados se dispondrá de 3 vídeos para cada terna de parámetros  $(\alpha, U_\infty, P_{int})$ . Un ejemplo ilustrativo del tipo de imagen que se obtiene de la grabación con la cámara de alta velocidad puede encontrarse en la Figura 2.6 donde se muestra la producción de burbujas en un orificio situado en el borde de ataque. Debido a que se dispone de distancias calibradas en la imagen, es inmediato realizar la medición de los diámetros de las burbujas empleando un software específico como el gratuito ImageJ<sup>®</sup> o el programa comercial de la propia cámara Phantom<sup>®</sup>. Dado que las burbujas producidas son monodispersas, en cada video se realiza la obtiene el diámetro de una burbuja característica como media de dos diámetros perpendiculares entre sí, ya que la burbuja, por efecto de la superficie del ala, puede no ser perfectamente esférica a la salida del orificio. El diámetro finalmente asignado a la terna de parámetros considerada, será la media aritmética de los 3 vídeos disponibles. Cabe destacar que, dado que el proceso de medición es realizado de forma manual, se ha considerado un error de 2 píxeles en la medida del diámetro. Por otro lado, para la medida de la frecuencia de burbujeo, se presta atención a una determinada posición de la imagen y se anota el número de frames que son necesarios para que pasen por dicha posición un total de 20 burbujas. La frecuencia obtenida es por lo tanto

$$f_b = 20 \times \frac{\text{frame rate}}{\text{n}^\circ \text{ de frames}} \quad (2.5)$$

#### Velocidad incidente

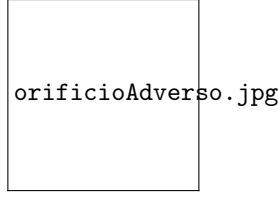
Como se comentó en secciones anteriores, la velocidad no puede ser impuesta con un valor prefijado, sino que debe determinarse su valor mediante análisis de imagen. Para ello, se emplean pequeñas partículas aproximadamente esféricas con una densidad similar a la del agua, y se graban recorrer una distancia predeterminada en el túnel hidrodinámico cuando este está libre de cualquier sólido. Este proceso se repite varias veces para cada nivel de potencia del túnel seleccionad, de forma que la medida de la velocidad sea lo más robusta posible.

#### Variables de interés

Finalmente, una vez que se han medido los diámetros y las frecuencias de cada terna de parámetros y se dispone del valor de la velocidad empleado en cada una de ellas, se pueden calcular otras variables de interés del problema, como es el caudal total de gas inyectado, obtenido con la Ecuación (1.14)

$$Q_g = \frac{\pi d_b^3}{6} f_b$$

Finalmente, para poder contrastar la hipótesis de la analogía de los gradientes favorables de presión creados en entorno del borde de ataque de un perfil aerodinámico con los resultados mostrados en [?] se debe



**Figura 2.7** Efecto de la posición del orificio en el proceso de generación de burbujas. En la figura se muestran dos orificios situados en  $x/c = a$  a la izquierda y  $x/c = a$  a la derecha para un ángulo de ataque,  $\alpha \simeq 12^\circ$ , una presión interior,  $P_{int} = y$  3 velocidades diferentes, . Puede apreciarse que, mientras que en el orificio de la derecha la formación de burbujas permanece constante y monodispersa con independencia del valor de la velocidad, en el orificio de la izquierda se forma un ligamento gaseoso cuya extensión y tamaño aumenta a medida que lo hace la velocidad. .

disponer del coeficiente de presión y de su gradiente para los distintos casos que lo requieran. En concreto, teniendo en cuenta la expresión para el coeficiente de presión que aquí se considera

$$c_p(\mathbf{x}) = \frac{p_\infty - p(\mathbf{x})}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}, \quad \text{con } \mathbf{x} \in \Sigma_s \quad (2.6)$$

resulta evidente que dicho coeficiente sólo dependerá, en cada punto y para el caso de un perfil simétrico de geometría fija, del ángulo de ataque geométrico previamente fijado; nótese que el valor del gradiente adimensional del coeficiente de presión, por su parte, dependerá (además de  $\alpha$ ) del valor empleado en la adimensionalización de la distancia, en este caso la cuerda,  $c$ . Al igual que en [?], en este caso se ha optado por el cálculo numérico mediante simulación de  $c_p$ , empleando para ello el conocido Método de Green de Elementos de Contorno descrito en el Apéndice . Una vez obtenido el coeficiente de presión en los puntos de integración de cada panel del perfil, resulta inmediato el cálculo del gradiente adimensional de presión local en cada punto que se requiera mediante derivación numérica de los valores interpolados del coeficiente de presión.

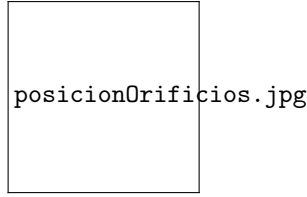
## 2.3 Resultados y discusión

Realizados todos los ensayos y procesados todos los datos obtenidos durante la extensa y exhaustiva campaña experimental, toca desgranar y analizar el rico abanico de fenómenos que se han observado. El objetivo de esta sección será estudiar y comprender las características del proceso de formación de burbujas en función de los parámetros ya mencionados (Presión interior del ala -es decir, caudal de aire-, ángulo de ataque del ala y velocidad incidente) y de la posición del orificio en la superficie del ala. Dado que, como se comentó al final del introducción, existe la posibilidad de que ciertos orificios se encuentren en zonas de gradiente favorable de presión para ciertos  $\alpha$  y en zonas de gradiente adverso para otras, se va a analizar primero el efecto de la posición del orificio de inyección en el proceso de formación de burbujas. De este modo el análisis puede centrarse en estudiar el efecto que la variación de los tres parámetros tienen sobre los diámetros y frecuencias de las burbujas producidas, centrándonos exclusivamente en un único orificio.

### 2.3.1 Efecto de la posición del orificio de inyección

La posición del orificio de inyección en la superficie de la envergadura juega un papel determinante en el proceso de generación de burbujas. Para comprender esta importancia, se muestra en la Figura 2.7 una imagen extraída de un ensayo realizado a ángulo de ataque  $\alpha \simeq 12^\circ$  para tres velocidades diferentes ( $U_\infty = [1,2,3]$ ) manteniendo la presión del interior del ala constante. Como se aprecia en la figura, el orificio de la derecha, cuya posición longitudinal adimensional es  $x/c = 0$ , se mantiene en un régimen de burbujeo monodisperso independientemente del valor de la velocidad aplicado, mientras que en el orificio de la izquierda, situado en  $x/c = 0.017$ , el comportamiento es bien distinto: para velocidades bajas, el proceso de formación de burbujas no termina de producirse cerca del orificio como sí ocurre con el orificio anterior, sino que puede apreciarse la formación de un chorro de aire eyectado desde el orificio. Este chorro crece en extensión y en diámetro aguas abajo del orificio a medida que se aumenta la velocidad.

Para comprender como la formación de burbujas en orificios situados relativamente cerca el uno del otro puede presentar semejantes diferencias, se muestra en la Figura 2.8 las posiciones de los puntos de remanso y picos de succión para diferentes ángulos de ataque junto con las posiciones de los orificios de inyección.



**Figura 2.8** Posición de los orificios de inyección y de los puntos de remanso y picos de succión en el entorno del borde de ataque para distintos ángulos de ataque. En la figura se aprecia como, para ángulos de ataque por encima de  $\alpha =$  ciertos orificios pasan de encontrarse en zonas de fuertes gradientes favorables de presión a zonas de gradiente adverso de presión. La posición de los puntos de remanso y los picos de succión ha sido calculada empleando el código de Elementos de Contorno descrito en el Apéndice buscando los valores  $\max_{\mathbf{x} \in \Sigma_{bda}} (c_p(\mathbf{x}))$  para el punto de remanso y  $\min_{\mathbf{x} \in \Sigma_{bda}} (c_p(\mathbf{x}))$  para el pico de succión, donde  $\Sigma_{bda}$  es la superficie correspondiente al entorno del borde de ataque..

Como puede apreciarse en el diagrama, donde se ha señalado específicamente las posiciones de los orificios mostrados en la Figura 2.7, para un ángulo de ataque de  $\alpha = 12^\circ$ , el orificio en la posición  $x/c = 0.017$  se encuentra muy cerca del pico de succión calculado numéricamente con el Método de Elementos de Contorno ya anteriormente mencionado y descrito en el Apéndice. Debido a que la resolución del problema de un perfil bidimensional por este método constituye una buena aproximación, pero al fin y al cabo, una aproximación de la solución real del campo de velocidades y presiones alrededor del ala, parece probable que este orificio se encuentre aguas abajo del pico de succión para  $\alpha = 12^\circ$  y por lo tanto en una región de gradiente desfavorable de presión, por lo que la deceleración que el líquido experimenta en esta zona provoca la acumulación del gas aguas abajo del punto de inyección, formando la característica forma mostrada en la Figura 2.7. Por lo tanto, queda demostrado que la posición que ocupen los puntos de inyección de gas en el ala resulta crítica si se quiere propiciar una generación de burbujas exitosa, ya que una pequeña desviación puede hacer que un orificio, para determinados ángulos de ataque, pase de un régimen de burbujeo monodisperso a un régimen en el que forme grandes masas de aire.

Cabe entonces preguntarse en este punto cómo varía el coeficiente de presión y más concretamente su gradiente para orificios a lo largo de la coordenada curvilínea con origen en el borde de ataque del perfil y definida en sentido positivo hacia el pico de succión<sup>7</sup>. En efecto, se muestra en la Figura ?? cómo es esta variación de  $c_p$  a lo largo de la coordenada  $\bar{s} = s/c$  (esto es, la coordenada curvilínea adimensionalizada con la cuerda) para un distintos ángulos de ataque, donde se puede apreciar que en un entorno cercano al borde de ataque,  $\bar{s} = 0$ , el gradiente de presión (que es la pendiente de las rectas tangentes en cada punto a la curva de la Figura ??) es prácticamente constante, decreciendo en los extremos al acercarnos al punto de remanso o al pico de succión. De este modo, teniendo en cuenta todo lo anterior, la opción que se presenta más interesante sería centrar el análisis en un orificio que se encuentre en una zona de elevados y constantes gradientes favorables de presión y que aporte la versatilidad suficiente para no entrar en regiones donde este gradiente decrezca o incluso cambie de signo para determinados ángulos de ataque: es por ello que en adelante se analizarán los resultados del orificio situado justo en el borde de ataque del perfil, es decir,  $\bar{s} = s/c = 0$ .

### 2.3.2 Resultado para un orificio situado en $\bar{s} = 0$

Como se concluyó al final de la sección anterior, el análisis pasa ahora a centrarse en el efecto que la variación de los parámetros considerados  $(P_{int}, U_\infty, \alpha)$  tienen sobre el diámetro y frecuencia de las burbujas formadas en el orificio situado en  $\bar{s} = 0$ . Para ello, se mostrará en primer lugar de forma cualitativa la fenomenología hayada cuando se varía alguno de estos parámetros manteniendo los demás constantes, para más tarde realizar un análisis cuantitativo de dichos fenómenos.

En la Figura 2.9 se muestran las diferencias en la formación de burbujas para dos presiones interiores diferentes, para un ángulo de ataque  $\alpha = 8^\circ$  y una velocidad  $U_\infty =$  Como podía intuirse, dado que un cambio en la presión interior del depósito manteniendo el resto de variables constante afecta exclusivamente al caudal de gas inyectado, el aumento de este provoca un incremento en el diámetro de las burbujas. Por otro lado, en la Figura 2.10, se muestra el efecto que la variación en la velocidad incidente sobre el perfil tiene sobre la producción de burbujas. En efecto, un aumento en la velocidad del líquido provocaría un aumento en la

<sup>7</sup> Se ha definido de este modo debido a que es el sentido en el que evoluciona la corriente. No obstante, este aspecto no supone una pérdida de generalidad, pudiendo tomarse en sentido opuesto si se desea.



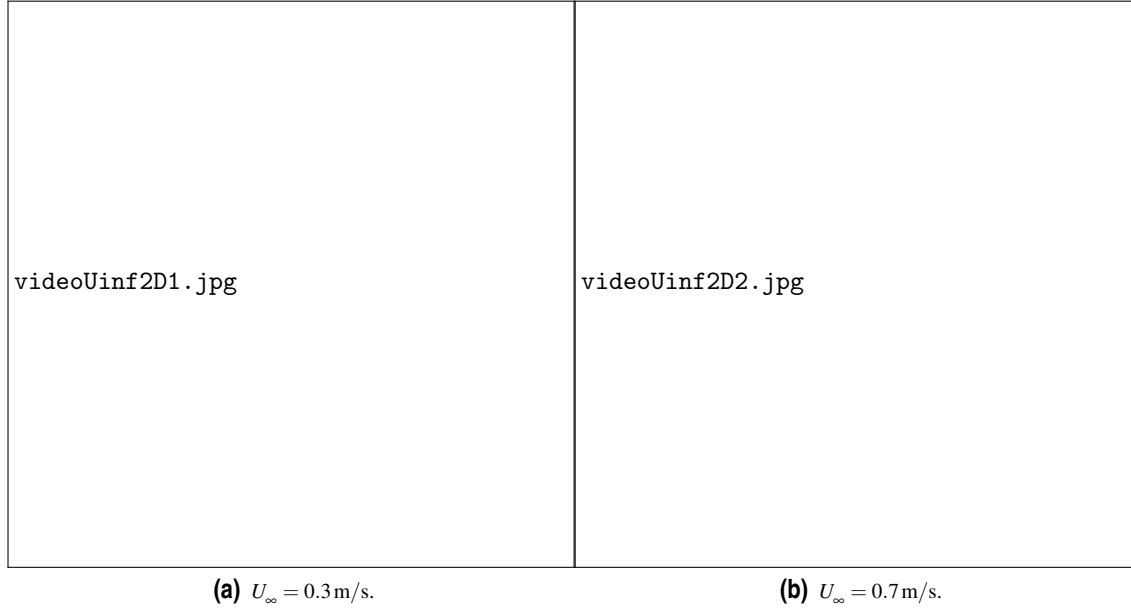
**Figura 2.9** Formación de burbujas en un orificio situado en  $\bar{s} = 0$  para dos presiones interiores en el ala diferentes. En ambos casos,  $\alpha = 8^\circ$  y  $U_\infty = ..$

velocidad a la que las burbujas son transportadas, aumentando la frecuencia de producción. En principio, este aumento de la frecuencia implicaría una disminución del diámetro para un caudal constante, sin embargo en el diseño experimental expuesto la constancia del caudal no es un hecho trivial, y aunque las variaciones de presión provocadas por el incremento de velocidad puedan ser demasiado pequeñas como para provocar cambios relevantes en el caudal (y más teniendo en cuenta la enorme pérdida de carga que se ha introducido mediante el uso de los tubos capilares), es algo que tendrá que demostrarse textita posteriori, por lo que se mantiene esta incógnita hasta llegar al análisis cuantitativo realizado más adelante. Finalmente, dado que un aumento del gradiente adimensional de presión causado por la variación del ángulo de ataque sí que tiene un efecto directo sobre las frecuencias y los diámetros de producción (aumentando las primeras y disminuyendo los últimos según [?]), es fácil identificar en qué imagen de la Figura 2.11 el ángulo de ataque del ala es mayor.

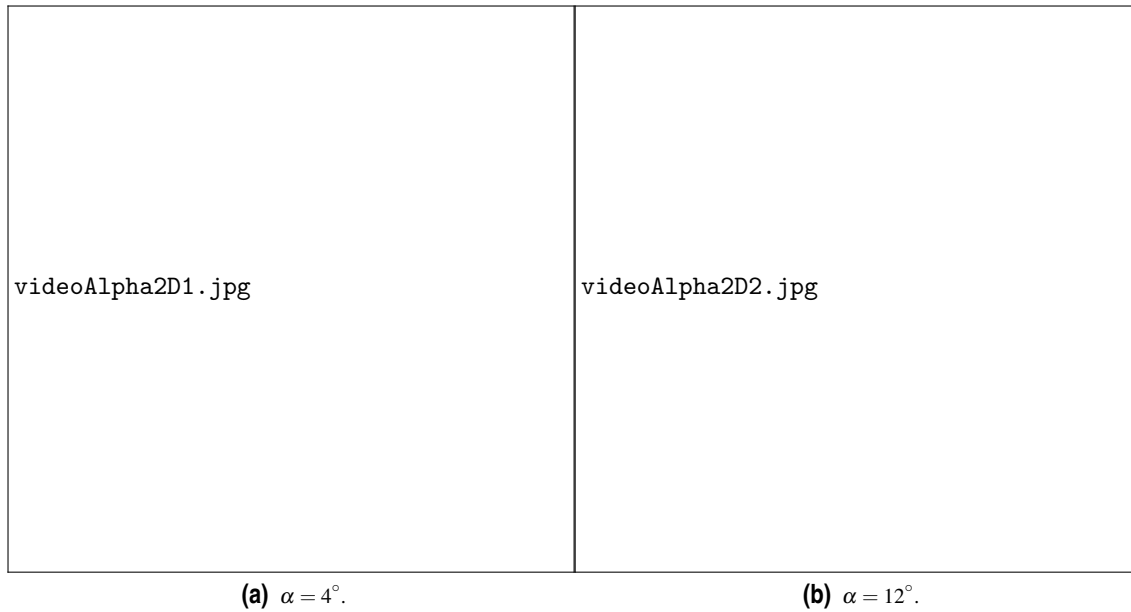
Una vez se ha mostrado de forma cualitativa la influencia que los cambios de los diferentes parámetros pueden tener sobre los diámetros y frecuencias de las burbujas, llega el momento de aportar datos que permitan cuantificar esta dependencia. En la Figura ?? se muestran diversos resultados que merece la pena detenerse a analizar. Por un lado, se muestra la evolución del diámetro de las burbujas con el caudal para dos velocidades diferentes, donde, como cabía esperar, se observa como el diámetro es una función creciente del caudal de aire inyectado. Nótese como, si bien el caudal de aire no es absolutamente constante al variar la velocidad para una presión fija en el interior del ala, las variaciones de caudal son, en la mayoría de los casos cuasi-despreciables. En efecto, considérese un incremento de velocidad desde un valor  $U_\infty \simeq 0.3 \text{ m/s}$  hasta un valor  $U_\infty \simeq 0.7 \text{ m/s}$ ; el incremento de presión provocado en el entorno del borde de ataque por este incremento de velocidad puede tomarse como  $\delta p \sim 1/2 \rho \Delta U_\infty^2 \sim \mathcal{O}(20 \text{ mbar})$ , donde se ha tomado  $c_p \mathcal{O}(1)$ , por lo que el incremento de caudal que propicie este  $\delta$  vendrá determinado por la Ecuación (2.4) como

$$\delta Q_g \sim \frac{\pi D^4}{128 \mu L_t} \delta p \sim \mathcal{O}(1 \text{ ml/h})$$

donde el valor de la constante de proporcionalidad entre el caudal y la presión perturbados es del orden de  $10^{-10} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Por lo tanto, el control de la presión interior en el ala, para el diseño aquí descrito, es prácticamente equivalente al control del caudal de aire inyectado. Así mismo, si bien la velocidad no afecta significativamente al caudal de gas inyectado sí que lo hace a los diámetros a través de la frecuencia. Como se puede observar en la Figura 2.12c y la Figura 2.12d, un aumento de la velocidad a casi el doble de su valor provoca que la frecuencia aumente a su vez más del doble para un caudal y ángulo de ataque fijos, por lo que, teniendo en cuenta la Ecuación (1.14) e insistiendo en la consideración del caudal como fijo para una presión



**Figura 2.10** Formación de burbujas en un orificio situado en  $\bar{s} = 0$  para velocidades del túnel diferentes. En ambos casos,  $\alpha = 4^\circ$  y  $P_{int} = ..$



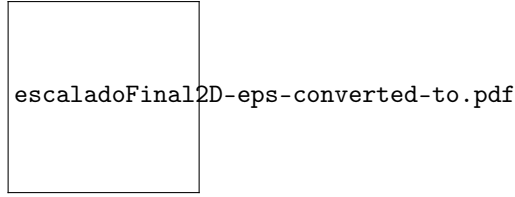
**Figura 2.11** Formación de burbujas en un orificio situado en  $\bar{s} = 0$  para dos ángulos de ataque diferentes. En ambos casos,  $U_{inf} = y P_{int} = ..$

constante del depósito independientemente del valor de la velocidad, se puede inferir que los diámetros de las burbujas decrecen con la velocidad por efecto del incremento de la frecuencia. Finalmente se puede concluir el análisis de la Figura 2.12 atendiendo al comportamiento de los diámetros y frecuencias para distintos ángulos de ataque. En efecto, tal y como se intuía a través de los resultados hallados por [?], el aumento que en el gradiente de presión conlleva un aumento del ángulo de ataque trae consigo disminuciones en el diámetro de las burbujas de hasta  $200 \mu\text{m}$  y aumentos en la frecuencia de más de un 50%, para los ángulos de ataque considerados.

Llegados a este punto, en el cuál se ha podido observar que el papel del gradiente de presión local en el entorno de un perfil aerodinámico es análogo al que juega en un dispositivo microflídico como el mostrado



**Figura 2.12** Evolución del diámetro y la frecuencia de las burbujas con el caudal de aire inyectado para todos los ángulos de ataque testeados. En la Figura 2.12a y en la Figura 2.12b se representa la evolución del diámetro para dos velocidades diferentes, mientras que en la Figura 2.12c y la Figura 2.12d se hace lo propio para las frecuencias de burbujeo. Como se aprecia en la comparación de las diferentes figuras, al aumentar la velocidad incidente sobre el perfil el diámetro de las burbujas disminuye para un caudal y ángulo de ataque determinados. El efecto contrario puede apreciarse en las frecuencias de burbujeo, donde un aumento en la velocidad incidente implica un aumento de la frecuencia. Así mismo, en cada una de las figuras se pueden distinguir los valores correspondientes a cada uno de los ángulos de ataque considerados, donde puede comprobarse también que a mayores ángulos de ataque (o lo que es lo mismo a mayores gradientes favorables de presión) el diámetro de las burbujas disminuye y las frecuencias de producción aumentan. .



**Figura 2.13** Diámetro adimensional de las burbujas producidas con el dispositivo generador de microburbujas propuesto frente al parámetro  $\frac{q}{\sqrt{P_s/2}} \sqrt{\frac{c}{L}}$ , donde se ha tomado el valor de  $L = 1400 \mu\text{m}$  extraído de [?]. Nótese como la constante de la recta de mejor ajuste mostrada en la figura es muy similar a la hallada en [?].

en [?], cabe preguntarse si el proceso de escalado de los diámetros seguido en dicho trabajo y resumido en la Sección 1.3, puede emplearse aquí para encontrar unas leyes de escala análogas. Para comprobarlo, lo más conveniente es rehacer la deducción de dichas leyes con los parámetros de nuestro dispositivo. En efecto, el término de incremento de presión en la Ecuación de Rayleigh-Plesset (Ecuación (1.1)) puede ser escrito de la misma forma que en [?], esto es,

$$\Delta p \sim \frac{d(p_\infty - p)}{\bar{s}} (\bar{s}_s) \frac{\ell}{c} \Rightarrow \Delta \sim \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \frac{dc_p}{d\bar{s}} (\bar{s}_s) \frac{\ell}{c} \quad (2.7)$$

siendo  $\bar{s}_s$  el punto análogo a  $x_s$  y con la sutil diferencia de que en este caso el gradiente adimensional del coeficiente de presión es adimensionalizado con la cuerda  $c$ . Al igual que en la Sección 1.3, considerando la Ecuación (1.14), de la ecuación de Rayleigh-Plesset se obtiene

$$\rho R_b \ddot{R}_b \sim \rho d_b^2 f_b^2 \propto \Delta p \Rightarrow \frac{d_b}{L} \propto \left( \frac{Q_g}{U_\infty L^2 \sqrt{P_s/2}} \sqrt{\frac{c}{L}} \right)^{2/5} \quad (2.8)$$

donde se ha tomado también en este caso  $\ell \sim d_b$  por analogía y se ha empleado  $L$ , es decir, el ancho del capilar exterior empleado en [?], para adimensionalizar los resultados con el fin de poder comparar correctamente si existe una correlación clara entre ambos fenómenos. Conviene recordar que  $\ell$  se definía en [?] como la distancia entre el punto donde el menisco es estable,  $x_s$  y el punto de formación de las burbujas, que por analogía con el caso de formación de una gota en una piscina en reposo se toma como  $\ell \sim d_b$ . Sin embargo, en este caso, la burbuja sale ya formada directamente desde el orificio, lo que hace pensar que el proceso de formación tiene lugar en el interior del tubo capilar. Esta hipótesis, situaría en nuestro caso el punto donde debe tomarse el gradiente de presión justo a la salida del orificio, que para el caso que nos ocupa en el análisis realizado es  $\bar{s}_s = 0$ , siendo nuevamente  $\ell \sim d_b$ . Por lo tanto, el valor de  $P_s$  que aparece en la Ecuación (2.8) es  $P_s = \frac{dc_p}{d\bar{s}} (\bar{s} = 0)$ . Finalmente, para comprobar la validez de la ley de escala deducida en la Ecuación (2.8), se muestra en la Figura ?? los resultados obtenidos tras adimensionalizar los datos de los experimentos adecuadamente donde se ha calculado la recta de mejor ajuste para los datos obtenidos, que puede expresarse como

$$\frac{d_b}{L} = 0.96 \left( \frac{q}{\sqrt{P_s/2}} \sqrt{\frac{c}{L}} \right)^{2/5} \quad \text{con} \quad q = \frac{Q_g}{U_\infty L^2} \quad (2.9)$$

que, como puede comprobarse, posee una pendiente muy similar a la encontrada en [?]

$$\frac{d_b}{L} = 1.02 (P_s/2)^{1/5} q^{2/5} \sim 1.1 \left( \frac{q}{\sqrt{P_s/2}} \right)^{2/5}$$

estando  $P_s$  adimensionalizado con  $L$  para el caso de [?].





# Índice de Figuras

1.1	Contornos de presión en las fases iniciales del proceso de formación de una burbuja para un número de Bond, $Bo = 0.245$ . Cortesía de [9]	3
1.2	Representación esquemática de los diferentes dispositivos que identifican la tecnología utilizada en la producción de burbujas monodispersas. Figura adaptada de [9].	4
1.3	Esquema del dispositivo empleado en [2] para la producción de microburbujas con la técnica de Confined Selective Withdrawal. Imagen adaptada de [2]	7
1.4	Diferentes regímenes de burbujeo en función de la velocidad $U$ a la que el líquido circula a través del capilar. En (a) se visualiza el caso en que $U < U^*$ , por lo que no se tiene un régimen de burbujeo constante, mientras que en (b), $U > U^*$ , se consigue alcanzar un régimen de producción de burbujas monodispersas. Imágenes adaptadas de [2].	7
1.5	Secuencia de producción de burbujas a partir de un menisco de aire estable para la región $x \leq x_s$ . Como se aprecia en la figura, aguas abajo de $x_s$ , se emite un cilindro de gas de diámetro $\sim d_g$ que se extiende una longitud $\ell$ . Imagen tomada de [2].	8
1.6	Representación esquemática de un perfil aerodinámico que enfrenta una corriente a la velocidad $U_\infty$ que forma un ángulo de ataque $\alpha$ con la cuerda, $c$ , del perfil. En la Figura 1.6a se representan el campo de presión cambiado de signo ( $-(p(\mathbf{x}) - p_\infty)$ ), con $\mathbf{x} \in \Sigma_s$ , indicando tanto el pico de succión (punto de mínima presión) como el punto de remanso (punto de máxima presión). En la Figura 1.6b se muestra una representación cualitativa de las líneas de corriente alrededor de un perfil aerodinámico. Adicionalmente se representan las zonas de fuertes gradientes favorables de presión, esto es la zona que, conteniendo el borde de ataque, se extiende desde el punto de remanso hasta el pico de succión, y la zona de gradiente desfavorable de presión, que se extiende aguas abajo del pico de succión y que se ha representado con una flecha indicando el sentido de la recirculación que podría producirse en la capa límite.	10
1.7	Resultados de una simulación por el método de elementos de contorno de un perfil simétrico NACA 0012 cuando sobre él incide una corriente con ángulo de ataque $\alpha = 4^\circ$ . En la Figura 1.7a se representa el campo de velocidad longitudinal de perturbación y en la Figura 1.7c su correspondiente campo de presión. La Figura 1.7b y la Figura 1.7d se muestra ampliada la zona cercana al borde de ataque, donde existen, como puede apreciarse, fuertes gradientes favorables de presión.	12
1.8	Valor del coeficiente de presión en el borde de ataque de un perfil aerodinámico NACA 0012 (Figura 1.8a) para varios ángulos de ataque $\alpha$ y en el experimento realizado en [2] (Figura 1.8b). En la Figura 1.8a $c_p$ está representado en función del arco adimensional, $\bar{s} = s/c$ , con origen en el borde de ataque del perfil y tomando una cuerda $c = 0.3$ m para este caso. En la Figura 1.8b se representa el gradiente de presión en el punto $x_s$ descrito en la Ecuación (1.10), mientras que en la Figura 1.8c se representa el gradiente de presión en un punto representativo del borde de ataque, $\bar{s} = 0$ . Nótese que el valor del gradiente de presión adimensional depende de la coordenada adimensional elegida.	13
2.1	Perspectiva del túnel hidrodinámico donde los experimentos han sido realizados.	16
2.2	Perspectiva de la sección longitudinal del dispositivo generador de microburbujas. En la figura puede apreciarse el interior hueco del ala que se hallará presurizado para poder suministrar el caudal de gas requerido.	18

2.3	Diferentes perspectivas del dispositivo generador de microburbujas bidimensional empleado en los experimentos.	19
2.4	Estructura de aluminio empleada como sistema posicionador del ala dentro del túnel hidrodinámico. En su parte posterior, los largueros incluyen dos cilindros que permiten el paso de las varillas que permiten regular la inclinación del ala.	20
2.5	Montaje experimental completo. En la Figura 2.5a puede apreciarse el sistema de posicionamiento del ala y variación del ángulo de ataque mientras que en la Figura 2.5b se muestra el equipo de visualización. La Figura 2.5c muestra una perspectiva del montaje experimental.	21
2.6	Ejemplo de imagen extraída de uno de los videos realizados a fps. La imagen muestra un experimento con $\alpha = 8^\circ$ , $U_\infty =$ y $P_{int} =$ .	23
2.7	Efecto de la posición del orificio en el proceso de generación de burbujas. En la figura se muestran dos orificios situados en $x/c = a$ a la izquierda y $x/c = a$ a la derecha para un ángulo de ataque, $\alpha \simeq 12^\circ$ , una presión interior, $P_{int} =$ y 3 velocidades diferentes. . Puede apreciarse que, mientras que en el orificio de la derecha la formación de burbujas permanece constante y monodispersa con independencia del valor de la velocidad, en el orificio de la izquierda se forma un ligamento gaseoso cuya extensión y tamaño aumenta a medida que lo hace la velocidad.	24
2.8	Posición de los orificios de inyección y de los puntos de remanso y picos de succión en el entorno del borde de ataque para distintos ángulos de ataque. En la figura se aprecia como, para ángulos de ataque por encima de $\alpha =$ ciertos orificios pasan de encontrarse en zonas de fuertes gradientes favorables de presión a zonas de gradiente adverso de presión. La posición de los puntos de remanso y los picos de succión ha sido calculada empleando el código de Elementos de Contorno descrito en el Apéndice buscando los valores $\max_{\mathbf{x} \in \Sigma_{bda}} (c_p(\mathbf{x}))$ para el punto de remanso y $\min_{\mathbf{x} \in \Sigma_{bda}} (c_p(\mathbf{x}))$ para el pico de succión, donde $\Sigma_{bda}$ es la superficie correspondiente al entorno del borde de ataque.	25
2.9	Formación de burbujas en un orificio situado en $\bar{s} = 0$ para dos presiones interiores en el ala diferentes. En ambos casos, $\alpha = 8^\circ$ y $U_\infty =$ .	26
2.10	Formación de burbujas en un orificio situado en $\bar{s} = 0$ para velocidades del túnel diferentes. En ambos casos, $\alpha = 4^\circ$ y $P_{int} =$ .	27
2.11	Formación de burbujas en un orificio situado en $\bar{s} = 0$ para dos ángulos de ataque diferentes. En ambos casos, $U_{inf} =$ y $P_{int} =$ .	27
2.12	Evolución del diámetro y la frecuencia de las burbujas con el caudal de aire inyectado para todos los ángulos de ataque testados. En la Figura 2.12a y en la Figura 2.12b se representa la evolución del diámetro para dos velocidades diferentes, mientras que en la Figura 2.12c y la Figura 2.12c se hace lo propio para las frecuencias de burbujeo. Como se aprecia en la comparación de las diferentes figuras, al aumentar la velocidad incidente sobre el perfil el diámetro de las burbujas disminuye para un caudal y ángulo de ataque determinados. El efecto contrario puede apreciarse en las frecuencias de burbujeo, donde un aumento en la velocidad incidente implica un aumento de la frecuencia. Así mismo, en cada una de las figuras se pueden distinguir los valores correspondientes a cada uno de los ángulos de ataque considerados, donde puede comprobarse también que a mayores ángulos de ataque (o lo que es lo mismo a mayores gradientes favorables de presión) el diámetro de las burbujas disminuye y las frecuencias de producción aumentan.	28

# Índice de Tablas

---

2.1	Dimensiones relevantes del túnel hidrodinámico	16
2.2	Posición de la abcisa, adimensionalizada con la cuerda del perfil, de los orificios de inyección de aire.	18
2.3	Rango paramétrico empleado durante la realización de los experimentos.	22



## Índice de Códigos

---



## Bibliografía

---

- [1] Jens Eggers and Emmanuel Villermaux, *Physics of liquid jets*, Reports on Progress in Physics **71** (2008), no. 3, 036601.
- [2] a. Evangelio, F. Campo-Cortés, and J. M. Gordillo, *Pressure gradient induced generation of microbubbles*, Journal of Fluid Mechanics **778** (2015), 653–668.
- [3] Katherine Ferrara, Rachel Pollard, and Mark Borden, *Ultrasound Microbubble Contrast Agents: Fundamentals and Application to Gene and Drug Delivery*, Annual Review of Biomedical Engineering **9** (2007), 415–447.
- [4] a M Gañán-Calvo and J M Gordillo, *Perfectly monodisperse microbubbling by capillary flow focusing.*, Physical review letters **87** (2001), no. c, 274501.
- [5] Felix Garcia-Ochoa and Emilio Gomez, *Prediction of gas-liquid mass transfer coefficient in sparged stirred tank bioreactors*, Biotechnology and Bioengineering **92** (2005), no. 6, 761–772.
- [6] ———, *Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: an overview.*, Biotechnology advances **27** (2009), no. 2, 153–76.
- [7] Akimaro Kawahara, Michio Sadatomi, Fuminori Matsuyama, and Hidetoshi Matsuura, *Prediction of micro-bubble dissolution characteristics in water and seawater*, Experimental Thermal and Fluid Science **33** (2009), no. 5, 883–894.
- [8] Michiel Postema and A Imaging Applications, *Ultrasound-Induced Gas Release from Contrast Agent Microbubbles*, **52** (2005), no. 6, 1035–1041.
- [9] Javier Rodríguez-Rodríguez, Alejandro Sevilla, Carlos Martínez-Bazán, and José Manuel Gordillo, *Generation of Microbubbles with Applications to Industry and Medicine*, Annual Review of Fluid Mechanics **47** (2015), no. September, 405–429.
- [10] Diego Rosso, Lory E. Larson, and Michael K. Stenstrom, *Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: State of the art*, Water Science and Technology **57** (2008), no. 7, 973–978.
- [11] M Sadatomi, *Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube*, **29** (2005), 615–623.
- [12] S. Sander, J. Behnisch, and M. Wagner, *Design of fine-bubble aeration systems for municipal WWTPs with high sea salt concentrations*, Water Science and Technology **75** (2017), no. 7, 1555–1563.
- [13] Koichi Terasaka, Ai Hirabayashi, Takanori Nishino, Satoko Fujioka, and Daisuke Kobayashi, *Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge*, Chemical Engineering Science **66** (2011), no. 14, 3172–3179.





