

Trabajo Fin de Máster

Máster de Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

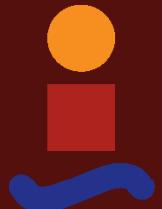
Producción masiva de microburbujas mono-dispersas para aplicaciones reales evitando la microfluídica

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

Producción 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: Producción 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 L^AT_EX 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 L^AT_EX 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

En nuestra Escuela se producen un número considerable de documentos, tanto 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
1 Introducción	1
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
2 Ala acuática bidimensional	15
2.1 Diseño y fabricación	15
2.2 Experimentos	22
2.3 Resultados y discusión	24
3 Ala acuática rotativa	31
3.1 Diseño y fabricación	31
3.2 Experimentos	35
3.3 Resultados y discusión	39
<i>Índice de Figuras</i>	41
<i>Índice de Tablas</i>	45
<i>Índice de Códigos</i>	47
<i>Bibliografía</i>	49
<i>Índice alfabético</i>	51
<i>Glosario</i>	51

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
1 Introducción	1
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
2 Ala acuática bidimensional	15
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	20
2.2 Experimentos	22
2.2.1 Campaña experimental	22
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 RInfluencia de \mathbf{Q}_g , \mathbf{U}_∞ , y α en $\bar{s} = 0$	26
3 Ala acuática rotativa	31
3.1 Diseño y fabricación	31
3.1.1 Esquema general del montaje	32
3.1.2 Banco de ensayos	32
3.1.3 Diseño de las alas	33
3.1.4 Equipo rotativo y suministro de presión	34
3.1.5 Ensamblaje final	35
3.2 Experimentos	35
3.2.1 Campaña experimental	37
3.2.2 Datos obtenidos y postproceso	38
3.3 Resultados y discusión	39
3.3.1 Fenomenología	39
3.3.2 Resultados cuantitativos	39

3.3.3 Escalado y conclusiones finales	39
<i>Índice de Figuras</i>	41
<i>Índice de Tablas</i>	45
<i>Índice de Códigos</i>	47
<i>Bibliografía</i>	49
<i>Índice alfabético</i>	51
<i>Glosario</i>	51

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 2π
e^{-jx}	Exponencial compleja negativa
$e^{-j2\pi x}$	Exponencial compleja negativa con 2π
IRe	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arc tg	Función arco tangente
$\sin^y x$	Función seno de x elevado a y
$\cos^y x$	Función coseno de x elevado a y
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\frac{\partial y}{\partial x}$	Derivada parcial de y respecto a x
x°	Notación de grado, x grados.
$\Pr(A)$	Probabilidad del suceso A
$E[X]$	Valor esperado de la variable aleatoria X
σ_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 σ_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}
$d\mathbf{x}$	Diferencial de \mathbf{x}
\leqslant	Menor o igual
\geqslant	Mayor o igual
\backslash	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si
$x = a + 3 \stackrel{a=1}{=} 4$	Igual con explicación
$\frac{a}{b}$	Fracción con estilo pequeño, a/b
Δ	Incremento
$b \cdot 10^a$	Formato científico
\xrightarrow{x}	Tiende, con x
O	Orden
TM	Trade Mark
$\mathbb{E}[x]$	Esperanza matemática de x
$\mathbf{C}_{\mathbf{x}}$	Matriz de covarianza de \mathbf{x}
$\mathbf{R}_{\mathbf{x}}$	Matriz de correlación de \mathbf{x}
σ_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 [11]). 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 [4, ?, 10]. Por otro lado, las elevadas necesidades de aireación y el gran porcentaje que esta ocupa en el coste de operación de los biorreactores [7, 12] 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 monodispera estas tienen que tener un PDI por debajo del 5% [11]. 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 [7]. 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 ϕ la fracción de gas en el medio). Por lo tanto, a menor diámetro de las burbujas mayor es el coeficiente de transferencia 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 [14, 12], con diámetros 1-3 mm, o incluso de microburbujas [15, 9, 13], con diámetros 10-500 μm , 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 [6]), mientras que la presencia de una determinada concentración de sal (equivalente al lodo presente en las aguas no tratadas) puede inhibir precisamente esta coalescencia [14].

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 [11]. 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 injectar 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 capilar¹ [11].

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 $Bo = \rho gr_t^2/\sigma$ el número de Bond, que mide la importancia relativa de los esfuerzos de tensión superficial frente a los esfuerzos de volumen (gravedad/floatación). 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 injector, se obtienen (por encima de cierta velocidad) burbujas de volumen $V_b \propto (Q_g/g^{1/2})^{6/5} > 4/3\pi r_F^3$ [11], 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 gas²

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

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 [11], 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.

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

² 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.

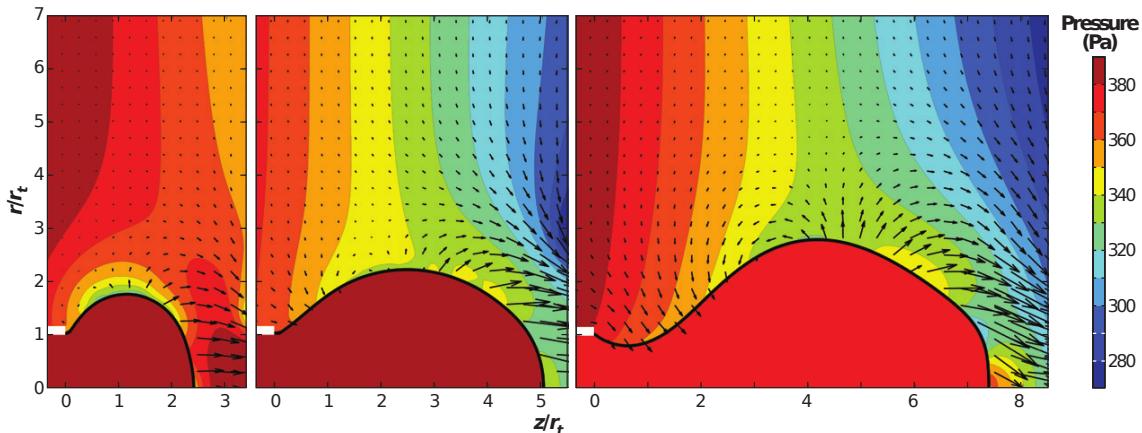


Figura 1.1 Contornos de presión en las fases iniciales del proceso de formación de una burbuja para un número de Bond, $Bo = 0.245$. Cortesía de [11].

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), $\Delta p = p_{exit} - 2\sigma/R_b \sim \rho \dot{R}_b$ coincide 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[11]. 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 compresión 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 [11].

De nuevo, al igual que se realizó en Sección 1.1, se respetará la estructura de [11] para presentar las tecnologías que a continuación se describen, no extendiénsose 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).

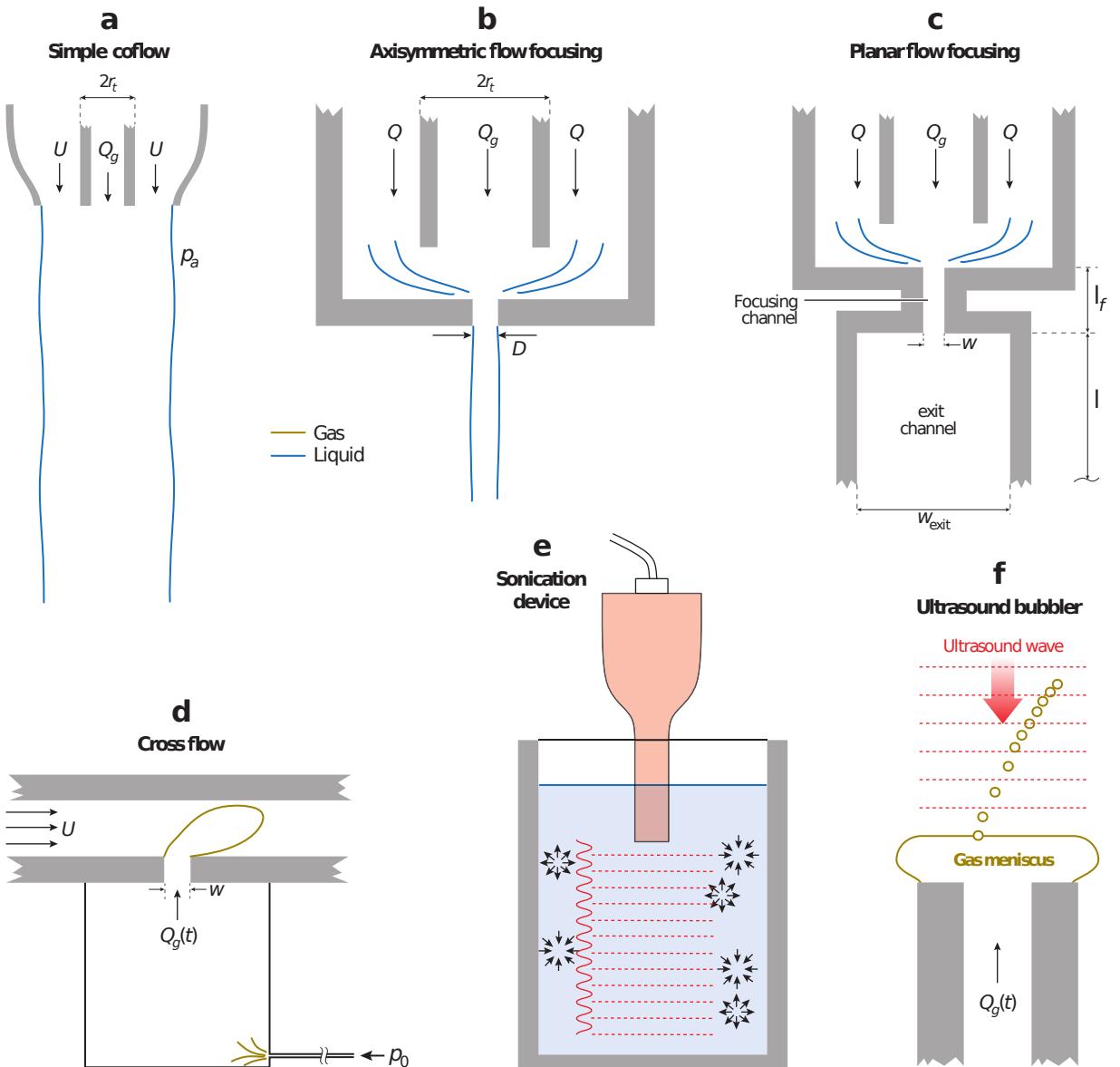


Figura 1.2 Representación esquemática de los diferentes dispositivos que identifican la tecnología utilizada en la producción de burbujas monodispersas. Figura adaptada de [11]..

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 colapso y permite generar burbujas más pequeñas [11]. 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 Webber 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 [11]. En este caso, en lugar del número de Webber, 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 $Ca \lesssim \mathcal{O}(10^{-2})$. 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 numero capilar, lo que limita en general la frecuencia de producción de estos dispositivos a $f_b \sim 10^3 \text{ Hz}$.

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 e 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 elmina la inyección de gas las líneas de líquido son casi paralelas, con lo que los gradientes de presión existentes son prácticamente despreciables [11]. 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 [5], obteniendo burbujas de tamaños $d_b \mathcal{O}(10\mu\text{m}) < D$, 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 Δp 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 introduce 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 [11]. 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) porqué 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 interfase previniendo la coalescencia hasta ejercer 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 ρ y de viscosidad μ , que se suministra desde el exterior y que descarga a $p_d < p_0$ a través de una salida a través de un capilar (en este caso de sección cuadrada) de dimensiones características $L = 1 mm$. 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 ℓ 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.

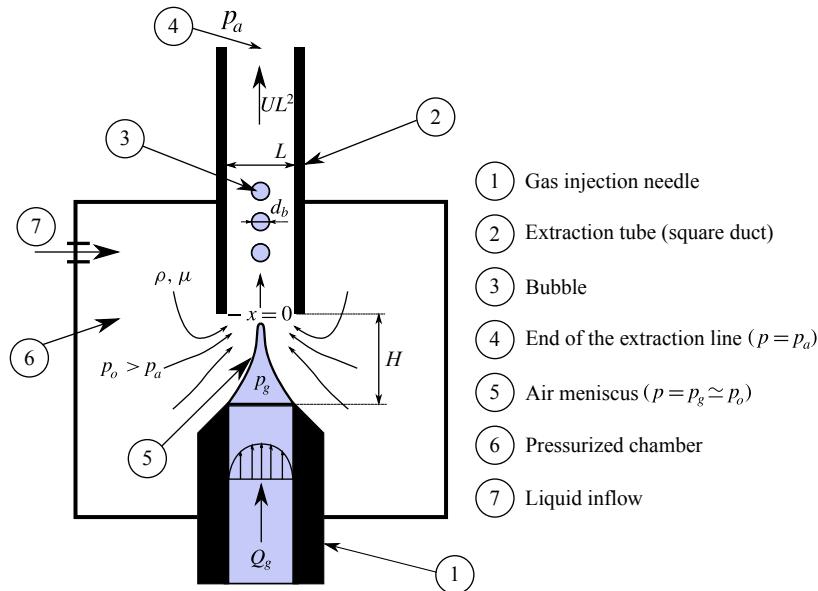


Figura 1.3 Esquema del dispositivo empleado en [2] para la producción de microburbujas con la técnica de Confined Selective Withdrawal. Imagen adaptada de [2].

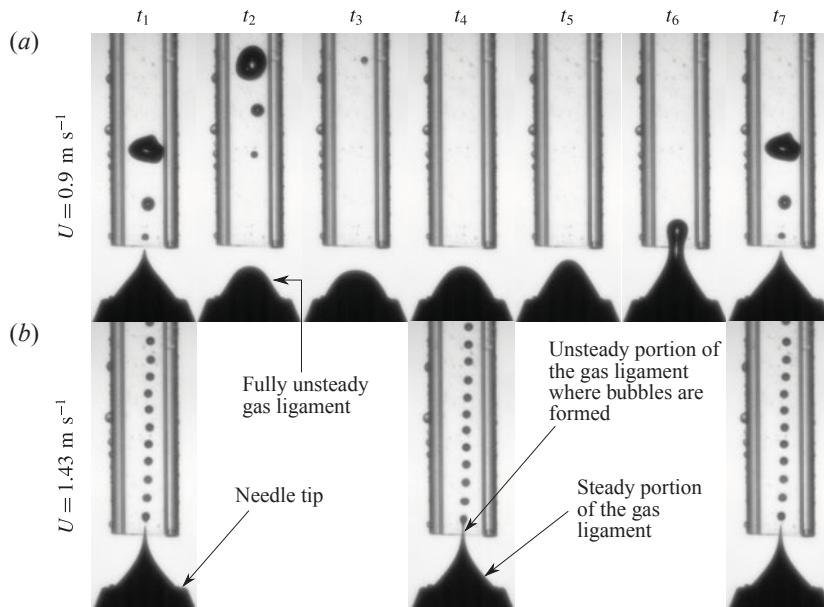


Figura 1.4 Diferentes regímenes de burbujeo en función de la velocidad U a la que el líquido circula a través del capilar. En (a) se visualiza el caso en que $U < U^*$, por lo que no se tiene un régimen de burbujeo constante, mientras que en (b), $U > U^*$, se consigue alcanzar un régimen de producción 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 $p_g \approx p_0$. 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 existe en el capilar, lo que para el caso en el que $Re \gg 1$ y teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones³ 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 β 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].

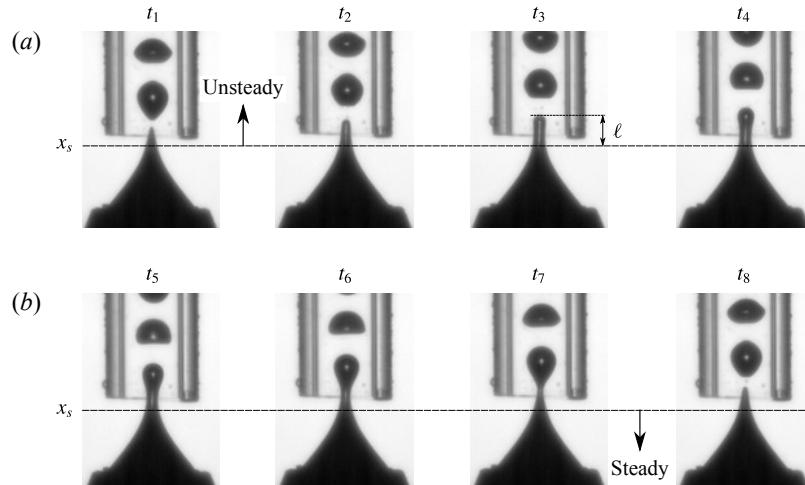


Figura 1.5 Secuencia de producción de burbujas a partir de un menisco de aire estable para la región $x \leq x_s$. Como se aprecia en la figura, aguas abajo de x_s , se emite un cilindro de gas de diámetro $\sim d_g$ que se extiende una longitud ℓ . Imagen tomada de [2].

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

³ En [2] se realiza una simulación del dominio considerando este como axisimétrico 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 [8]. 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 $P_s = \dot{\xi}(x_s)$. 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,

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

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 (1.16) 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 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.

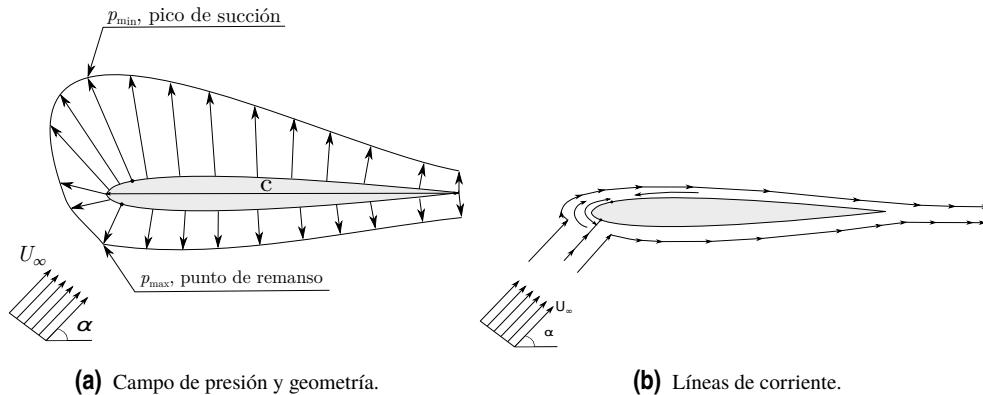


Figura 1.6 Representación esquemática de un perfil aerodinámico que enfrenta una corriente a la velocidad U_∞ que forma un ángulo de ataque α con la cuerda, c , del perfil. En la Figura 1.6a se representan el campo de presión cambiado de signo $-(p(\mathbf{x}) - p_\infty)$, con $\mathbf{x} \in \Sigma_s$, 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_∞ que forma con la *cuerda del perfil*, c , un *ángulo de ataque*, α . 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 círculo, normalmente se descompone como $\phi = \phi_\infty + \phi'$, siendo ϕ_∞ el potencial correspondiente a una corriente uniforme de valor U_∞ con ángulo de ataque α y ϕ' 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 ξ 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 desperta 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

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

$$\frac{dc_p}{ds} \sim \mathcal{O}(430) \quad (1.21)$$

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 [11], 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

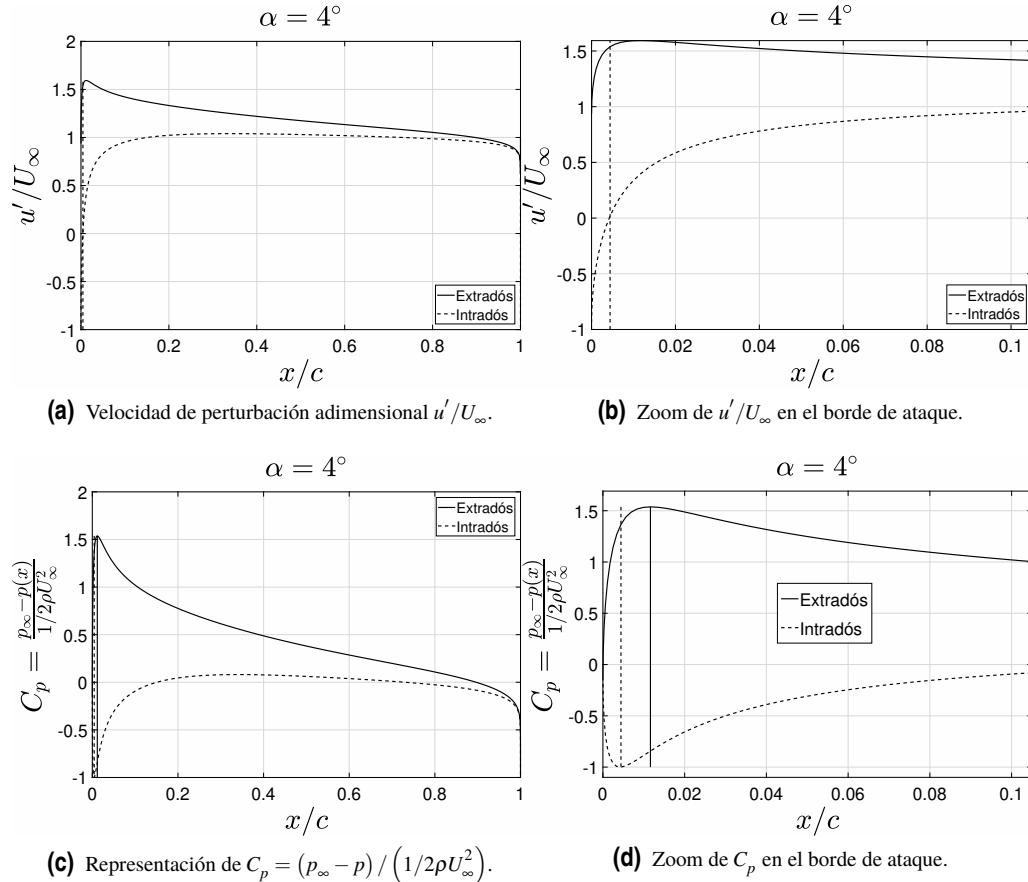


Figura 1.7 Resultados de una simulación por el método de elementos de contorno de un perfil simétrico NACA 0012 cuando sobre él incide una corriente con ángulo de ataque $\alpha = 4^\circ$. En la Figura 1.7a se representa el campo de velocidad longitudinal de perturbación y en la Figura 1.7c su correspondiente 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.

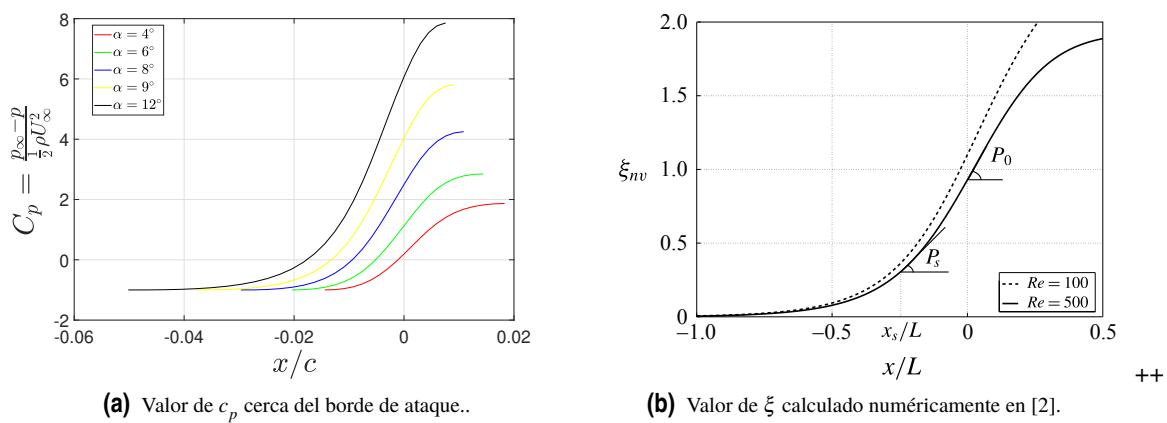


Figura 1.8 Valor del coeficiente de presión en el borde de ataque de un perfil aerodinámico NACA 0012 (Figura 1.8a) para varios ángulos de ataque α y en el experimento realizado en [2] (Figura 1.8b). En la Figura 1.8a c_p está representado en función del arco adimensional, $\bar{s} = s/c$, con origen 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 este incide una corriente con un ángulo de ataque α 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 aerodinámico¹. De este modo, se pretende demostrar que la producción de burbujas de tamaños milimétricos y submilimétricos no tiene porqué ir necesariamente de la mano del 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 para la obtención de resultados. Así, se describirá la configuración final del *set-up*, el protocolo de experimentación, los datos sin tratar obtenidos de los ensayos y el posterior tratamiento y 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_∞ ; 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

¹ 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..

que permitan abordar esta tarea. Finalmente, para poder obtener y posteriormente analizar los datos 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 un corto espacio de tiempo. En efecto, si se pretenden obtener con este dispositivo burbujas de tamaños comparables a las encontradas en [2], esto es $d_b \sim \mathcal{O}(200\text{ }\mu\text{m})$, y se estima que las burbujas son convectadas aguas abajo del perfil a una velocidad² $v \sim U_\infty$, se tendrá que una burbuja recorre una distancia del orden de su diámetro en un tiempo $t_b \sim d_b/U_\infty \sim \mathcal{O}(200\text{ }\mu\text{s})$, por lo que serán necesarios del orden de 5000 fotogramas por segundo (en adelante fps): resulta evidente que es necesaria una cámara de alta velocidad.

Tunel 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

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

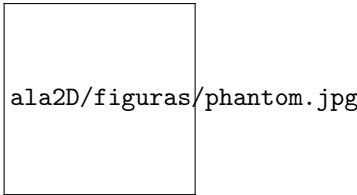


Figura 2.2 Cámara de alta velocidad Phantom® v710.

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 si la velocidad del túnel excede el valor de $U_\infty \sim 0.75 \text{ m/s}$ se produce 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 el aire se dispone en el laboratorio de una red 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

Para la grabación de las imágenes se dispone de una cámara Phantom v710 como la que se muestra en la Figura 2.2, 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 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 macizas³ 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 más 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

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

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 α 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 $c = 30\text{cm}$. 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 $U_\infty \sim 0.5\text{ m/s}$. Por lo tanto, la magnitud de la cuerda escogida permite sin mayor complicación reproducir 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 del 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 que el problema se reduce al 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; un ejemplo ilustrativo donde se emplea la superposición de soluciones elementales de tipo torbellino lo constituye el Método de Green de Elementos de contorno descrito en el Apéndice ?? . Por otro lado, cuando existen contornos rígidos como una pared, la teoría de campos nos brinda el conocido *método de las imágenes*, consistente 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, $\nabla\phi \cdot \mathbf{n} = 0$). Este método 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 incidente⁴ y por tanto perpendiculares al plano del problema 2D, rompiendo así la hipótesis de bidimensionalidad. Gracias al método de las imágenes, es posible modelar este comportamiento si se empotra el ala en las paredes del túnel, para lo cual la envergadura del ala tendría que coincidir con el ancho de la sección. Sigue, 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; nótense 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 finalmente $b = \text{lo que sea}$.

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 la superficie exterior del 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 2.3 un corte longitudinal en perspectiva donde se aprecia la oquedad interior. Así, a través de un orificio roscado, 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

⁴ Este aspecto pertenece a la teoría de alas de envergadura finita, cuya descripción detallada puede encontrarse en el Apéndice ??

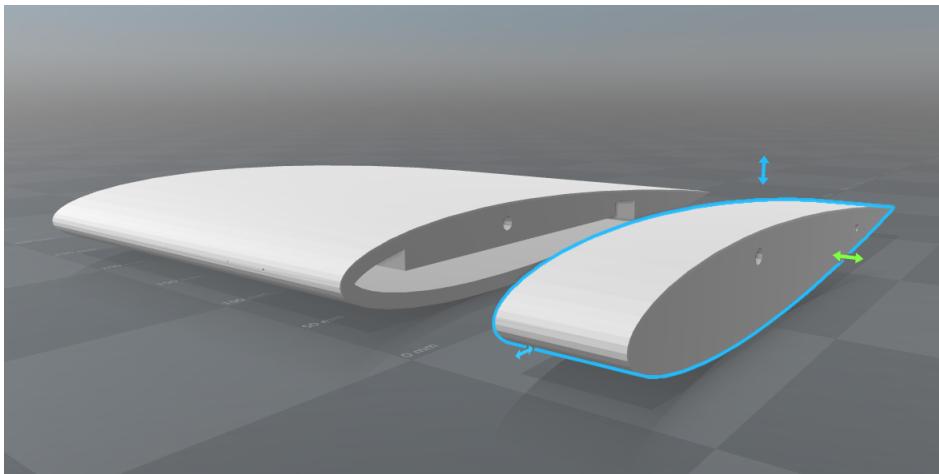


Figura 2.3 Perspectiva de la sección longitudinal del dispositivo generador de microburbujas. En la figura puede apreciarse el interior hueco del ala que se hallará presurizado para poder suministrar el caudal de gas requerido..

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

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 α , 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 α , 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).

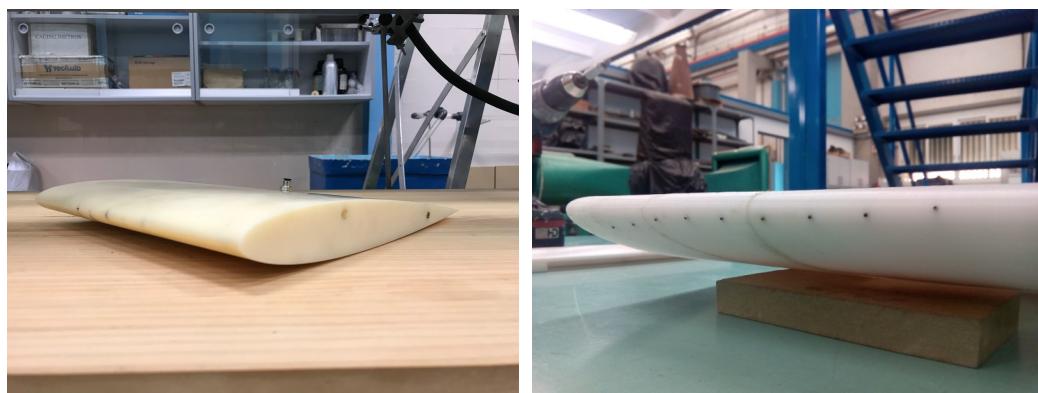
Finalmente, en lo que se refiere al diámetro y longtiud del los orificios, se debe tener en cuenta que resulta primordial asegurar la constancia del caudal durante el experimento, lo que no será trivial si se tienen en cuenta las perturbaciones que puedan existir tanto en la presión dentro del ala como 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 manóreductores), 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 interior del tubo capilar es tal que $Re_D D/L_t \ll 1$,⁵ 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 Δp es el incremento de presión entre el interior y el exterior del ala. Si se llama ahora δp 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

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

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



(a) Perspectiva 1.

(b) Perspectiva 2.

Figura 2.4 Diferentes perspectivas del dispositivo generador de microburbujas bidimensional empleado en los experimentos..

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 más pequeño posible compatible con un diámetro exterior más manejable, permitiendo 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 2.4 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.

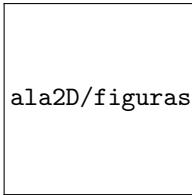
2.1.3 Diseño del montaje experimental

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 posicionar el ala dentro del túnel hidrodinámico sino también de poder variar el ángulo de ataque, α . En la Figura 2.5 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 largueros, que deben estar completamente en contacto con las paredes laterales del túnel, poseen orificios que permiten en paso del eje que recorre transversalmente al ala y que forma parte del sistema de variación del ángulo de ataque.
- Dos largueros 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 2.4), desembocando en las ranuras practicadas en los largueros 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 larguero 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 2.6, donde puede apreciarse todo el montaje experimental completo, se muestra en qué consiste

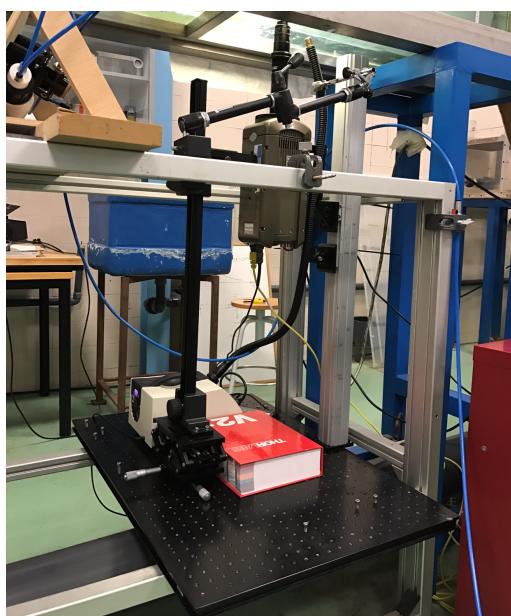


ala2D/figuras/estructuraAluminio.jpg

Figura 2.5 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..



(a) Montaje del ala en el túnel.



(b) Equipo de visualización.

Figura 2.6 Montaje experimental completo. En la Figura 2.6a puede apreciarse el sistema de posicionamiento del ala y variación del ángulo de ataque mientras que en la Figura 2.6b se muestra el equipo de visualización..

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.

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

Parámetros	U_∞ [m/s]	P_{int} [mbar]	α [°]
Valores	[0.3, 0.5, 0.6, 0.72]	[120, 207, 288, 400, 565, 789, 890]	[4.66, 6.11, 8, 10, 12]

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 testearlo con una exhaustiva campaña experimental. En esta sección se muestran todos los detalles referentes 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 arrojados de la campaña experimental y en cuáles son los métodos empleados para mostrar los resultados de la Sección 2.3.

2.2.1 Campaña experimental

Recordando los resultados hallados en [3] 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 2.3 se muestran los valores empleados de estos tres grados de libertad para los diferentes experimentos; nótese que, por las características del montaje anteriormente descrito, 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 y 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 cada 2° entre 4° – 12°. 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, α , 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.

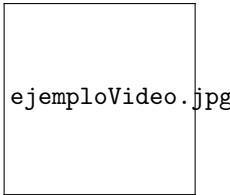


Figura 2.7 Ejemplo de imagen extraída de uno de los videos realizados a 5000 fps. La imagen muestra un experimento con $\alpha = 8^\circ$, $U_\infty = \dots$ y $P_{int} = \dots$

3. En este punto, si fuera necesario, se vuelve al paso 1 hasta encontrar un valor aproximado al esperado para α .
4. Fijado el valor de α , se selecciona la velocidad a la que se realizará el ensayo.
5. Finalmente, se selecciona una presión interior de las que figuran en la Tabla 2.3 y se deja transcurrir un tiempo suficiente hasta alcanzar un régimen estacionario⁶.
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.
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 2.7 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® o el programa comercial de la propia cámara Phantom®. Dado que las burbujas producidas son monodispersas, en cada vídeo 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 fija una determinada posición en 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

$$f_b = 20 \times \frac{\text{frame rate}}{\text{nº de frames}} \quad (2.5)$$

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

⁶ Durante la operación experimental este tiempo podía consistir en 20-30s, que es el tiempo que se tardaba en configurar y preparar la cámara para la grabación. Este tiempo es mucho mayor que el tiempo de difusión viscosa D^2/v_g y que el tiempo característico que emplea el gas en recorrer el tubo capilar ($\sim \mathcal{O}(L_t/U_\infty)$), comprobándose esto último en la Sección 2.3

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 seleccionados, de forma que la medida de la velocidad sea lo más robusta posible.

Variables de interés

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 [3] se debe disponer del coeficiente de presión y de su gradiente para los distintos casos que lo requieran. En concreto, para la definición aquí considerada del coeficiente de presión,

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

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 α) del valor empleado en la adimensionalización de la distancia, en este caso la cuerda, c . Al igual que en [3], 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 ???. Conocido el coeficiente de presión en los puntos de integración de cada panel del perfil, resulta inmediato el cálculo de su gradiente local en cada punto que se requiera mediante derivación numérica de los valores interpolados.

2.3 Resultados y discusión

Finalizados 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 Capítulo ??, existe la posibilidad de que ciertos orificios se encuentren en zonas de gradiente favorable de presión para ciertos α 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 2.8 una imagen extraída de un ensayo realizado a ángulo de ataque $\alpha \approx 12^\circ$ para tres velocidades diferentes ($U_\infty = [0.33, 0.46, 0.72] \text{ m/s}$) 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 $x/c = 0.0017$, 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 2.9 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. Como puede apreciarse en el diagrama, donde se ha señalado específicamente las posiciones de los orificios

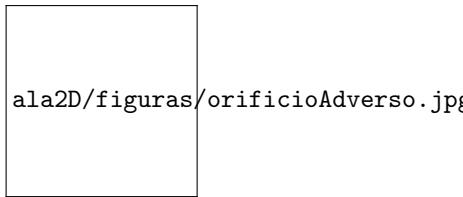


Figura 2.8 Efecto de la posición del orificio en el proceso de generación de burbujas. En la figura se muestran dos orificios situados en $x/c = 0.0017$ a la izquierda y $x/c = 0$ a la derecha para un ángulo de ataque, $\alpha \simeq 12^\circ$, una presión interior, $P_{int} = 200$ mbar y 3 velocidades 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. .

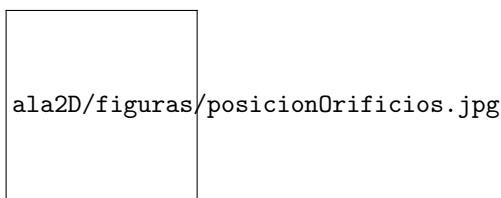


Figura 2.9 Posición de los orificios de inyección y de los puntos de remanso y picos de succión en el entorno del borde de ataque para distintos ángulos de ataque. En la figura se aprecia como, para ángulos de ataque por encima de $\alpha =$ ciertos orificios pasan de encontrarse en zonas de fuertes 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 Σ_{bda} es la superficie correspondiente al entorno del borde de ataque..

mostrados en la Figura 2.8, para un ángulo de ataque de $\alpha = 12^\circ$, el orificio en la posición $x/c = 0.0017$ se encuentra muy cerca del pico de succión calculado numéricamente con el Método de Elementos de Contorno. 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 realmente 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 2.8. Por lo tanto, queda demostrado que la posición que ocupen los puntos de inyección de gas en el ala resulta crítica si se quiere asegurar 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 succión⁷. En efecto, se muestra en la Figura ?? cómo es esta variación de C_p a lo largo de la coordenada $\tilde{s} = s/c$ (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, $\tilde{s} = 0$, 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, $\tilde{s} = s/c = 0$.

⁷ 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 2.10 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 $U_\infty = ..$

2.3.2 Influencia de Q_g , U_∞ , y α 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_∞ , α) 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 observada cuando se varía alguno de estos parámetros manteniendo los demás constantes, para más tarde realizar un análisis cuantitativo de dichos fenómenos.

En la Figura 2.10 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 podíamos intuirnos, dado que un cambio en la presión interior del depósito manteniendo el resto de variables constantes 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 2.11, 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 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 [3]), es fácil identificar en qué imagen de la Figura 2.12 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 quasi-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 δ vendrá determinado por la Ecuación (2.4) como

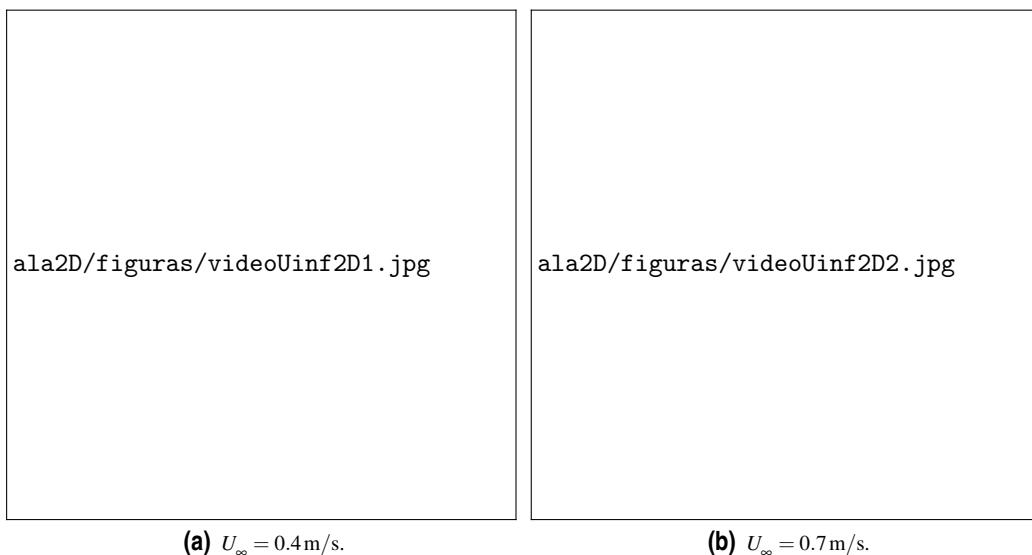


Figura 2.11 Formación de burbujas en un orificio situado en $\bar{s} = 0$ para velocidades del túnel diferentes. En ambos casos, $\alpha = 8^\circ$ y $P_{int} = 207 \text{ mbar.}$

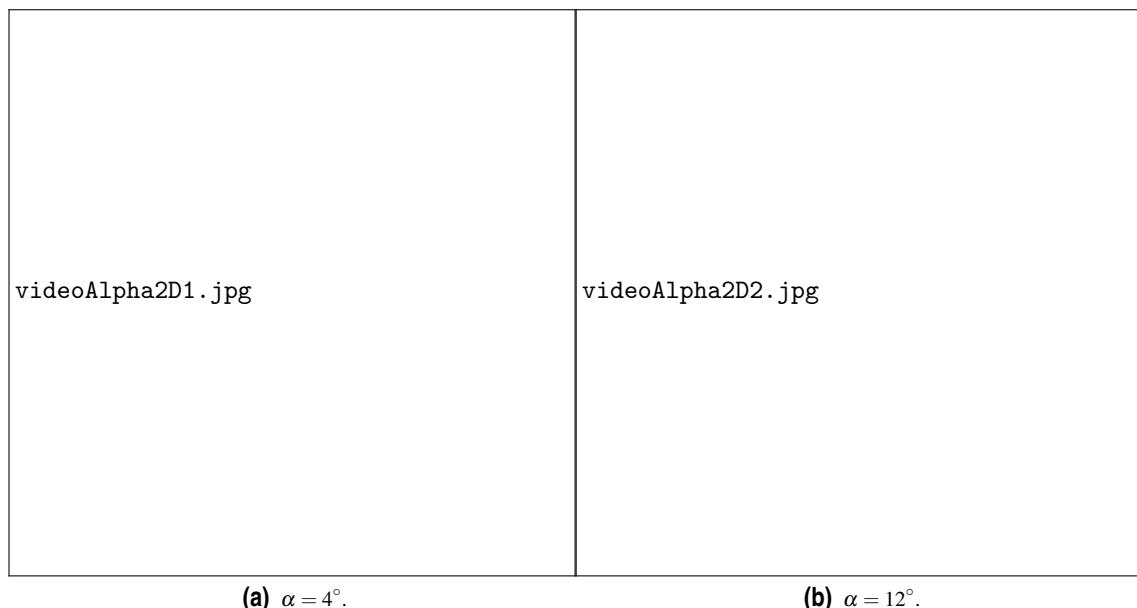


Figura 2.12 Formación de burbujas en un orificio situado en $\bar{s} = 0$ para dos ángulos de ataque diferentes. En ambos casos, $U_{inf} =$ y $P_{int} = ..$

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

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 2.13c y la Figura 2.13d, 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

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 2.13 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 [3], 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 en [3], 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 [3], esto es,

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

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

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

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 [3], para adimensionalizar los resultados con el fin de poder comparar correctamente si existe una correlación clara entre ambos fenómenos. Conviene recordar que ℓ se definía en [3] 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 $P_s = \frac{dC_p}{ds} (\bar{s} = 0) \frac{L}{c}$; cabe destacar que la definición de P_s es idéntica a la realizada en [3] al haber escalado dC_p/ds con L/c . Finalmente, para comprobar la validez de la ley de escala deducida en la Ecuación (2.8), se muestra en la Figura 2.14 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

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

que, como puede comprobarse, posee una expresión muy similar a la encontrada en [3]

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



Figura 2.13 Evolución del diámetro y la frecuencia de las burbujas con el caudal de aire injectado para todos los ángulos de ataque testeados. En la Figura 2.13a y en la Figura 2.13b se representa la evolución del diámetro para dos velocidades diferentes, mientras que en la Figura 2.13c y la Figura 2.13d 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. .

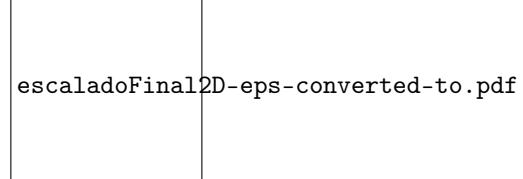


Figura 2.14 Diámetro adimensional de las burbujas producidas con el dispositivo generador de microburbujas propuesto frente al parámetro $\frac{q}{\sqrt{P_s/2}} \sqrt{\frac{c}{L}}$, donde se ha tomado el valor de $L = 1400 \mu\text{m}$ extraído de [3]. Nótese como la constante de la recta de mejor ajuste mostrada en la figura es muy similar a la hallada en [3]..

3 Ala acuática rotativa

En el capítulo anterior se demostró como es posible extraer los resultados obtenidos en [3] en un dispositivo microfluídico sin más que reproducir las condiciones en lo que al gradiente favorable de presión se refiere. De hecho, el prototipo de dispositivo generador masivo de microburbujas mostró tener un comportamiento completamente análogo en lo que a los diámetros y frecuencias de producción se refiere, deduciéndose leyes de escala prácticamente idénticas en ambos casos (véase la Sección 2.3). Sin embargo, pese a haber diseñado un dispositivo capaz de generar microburbujas de forma monodispersa de la misma forma que con la técnica de *confined selective withdrawal*, la implementación de un dispositivo bidimensional para aplicaciones tecnológicas reales que hoy en día se demandan resulta tan compleja como insuficiente. Por este motivo, en este último capítulo, nos hemos propuesto ir más allá, no sólo escalando los resultados de un perfil bidimensional al caso de un ala tridimensional de envergadura finita, sino incluyéndola dentro de un nuevo prototipo de dispositivo con un propósito tecnológico concreto. Como ya se mencionó en las primeras páginas del Capítulo ??, uno de los sectores de la industria que demanda la producción masiva de burbujas de tamaños cada vez más pequeños es el sector de la depuración de aguas, donde una reducción en el diámetro de las burbujas producidas para un caudal de aire determinado aumentaría la eficiencia en la transferencia de oxígeno, o lo que es lo mismo, dados unos requerimientos de suministro de oxígeno (*Oxygen Uptake Rate OUR*), el caudal total de aire necesario será menor cuanto menor sean los diámetros de las burbujas producidas. Teniendo en cuenta todo lo anterior, el objetivo de este capítulo será el de diseñar, fabricar y testear un prototipo de equipo de agitación y aireación, verificando cómo podrían aplicarse las leyes de escala obtenidas en el Capítulo 2.

La estructura del capítulo, por lo tanto, seguirá una línea similar a la del capítulo anterior: en primer lugar se describe detalladamente en qué consiste este nuevo diseño de dispositivo, partiendo de los equipos disponibles y diseñando desde cero este nuevo prototipo; acto seguido, se mostrará cómo ha sido la campaña experimental mostrando cuál ha sido el espacio paramétrico explorado en este caso, así como los métodos de postproceso que, aunque similares, amplian los empleados en el caso bidimensional; finalmente, se mostrarán los resultados obtenidos y se tratará de escalar nuevamente el proceso con el fin de poder establecer una clara comparación entre los experimentos microfluídicos en [3] y los dispositivos aquí presentados.

3.1 Diseño y fabricación

El objetivo de esta sección es describir cada uno de los componentes que configuran tanto el dispositivo generador de microburbujas como el montaje completo del experimento. Los equipos disponibles para este caso continúan siendo los mismos en lo que a la visualización y suministro de presión se refiere, sin embargo, la tridimensionalidad del problema hace imposible emplear el túnel hidrodinámico como banco de ensayos, por lo que ha sido necesario diseñar y construir un banco apto para esta aplicación.

Tabla 3.1 Medidas del tanque empleado en los experimentos del ala acuática rotativa.

Dimensión	Longitud [m]	Altura [m]	Espesor [mm]
Valor	1	0.6	30

3.1.1 Esquema general del montaje

El diseño que aquí se proponga debe satisfacer varias necesidades. En principio, se trata de un equipo rotativo sencillo, consistente en dos palas unidas a un eje que gira accionado por un motor eléctrico. Algunas de las premisas del diseño son las siguientes:

- Las palas deben encontrarse sumergidas en un tanque de líquido y a la suficiente profundidad como para que el efecto de la entrefase sobre las mismas sea despreciable.
- Además debe existir una distancia adecuada a las paredes del tanque con el fin de evitar impactos y velocidades inducidas por el mismo.
- Por otro lado, las palas deben estar formadas en su sección transversal por perfiles aerodinámicos donde existan fuertes gradientes favorables de presión entre el punto de remanso y el pico de succión de cada sección transversal para cada ángulo de ataque.
- Con el fin de explorar diferentes resultados en función del gradiente de presión, el ángulo de ataque debe poder ser regulable.
- Finalmente, se debe conseguir suministrar aire desde el interior de las alas hacia el líquido, lo que deberá hacerse a través del eje de rotación, convirtiéndolo igual que en el caso bidimensional cada pala en un depósito.

Para cumplir todas estas premisas, se va a describir el diseño de cada uno de los componentes por separado.

3.1.2 Banco de ensayos

El banco de ensayos para un dispositivo de las características mencionadas arriba debe consistir fundamentalmente en un tanque lleno de líquido, en este caso nuevamente agua tanto por su sencillez como por la futura aplicación del propio dispositivo¹. Por otro lado, el tanque debe realizarse en un material transparente que permita la visualización de las burbujas producidas con el fin de poder medir los diámetros y las frecuencias de producción como se realizó en el Capítulo 2; se ha optado en este caso por el metacrilato como material de fabricación, debido a su menor coste con respecto al cristal. Aunque un tanque de geometría cilíndrica sería una solución idónea teniendo en cuenta la axilismetría del problema, las dificultades y coste que implican la fabricación de un tanque de metacrilato con esta geometría nos llevan a que la mejor solución para esta nueva prueba de concepto es un tanque de metacrilato de sección cuadrada. En cuanto a la altura, se ha considerado suficiente disponer de una altura total del tanque de 60 cm, con lo que la altura total de agua estará en torno a los 0.5 m. Con estos requerimientos, y basándose en la experiencia del fabricante, el espesor de pared recomendado no debería ser inferior al mostrado en la Tabla 3.1, con el fin de aguantar los casi 500 kg del peso del agua.

Por otro lado, dado que el equipo de visualización empleado será el mismo y una vez más la interfase aire-agua imposibilitaría la visión desde arriba, la grabación de imágenes a alta velocidad ha de efectuarse desde la zona inferior del tanque, por lo que este debe estar elevado. Para poder realizar los experimentos se requiere por tanto idear una estructura que pueda ser utilizada como banco de ensayos, debiendo la misma dar soporte para la realización de las siguientes tareas:

- Soporte del tanque a una altura suficiente como para poder incluir el montaje completo del equipo de visualización bajo el mismo. Esta altura debe ser la mínima posible con el fin de evitar aumentar la longitud de los pilares verticales y con ello la inestabilidad por pandeo.
- Soporte para el equipo rotativo en la zona superior del tanque, el cual debe soportar el peso del motor y sistema de aireación junto con los esfuerzos radiales producidos por el giro del motor.
- Estabilidad ante esfuerzos en la dirección perpendicular del eje. En efecto, el movimiento creado por las palas aerodinámicas en el seno del líquido harán que el tanque experimente esfuerzos en su pared que serán, en última instancia, transmitidos a la estructura que constituye el banco de ensayos.

¹ Conviene mencionar que el empleo de agua corriente del grifo, a pesar de no ser agua pura, no tiene nada que ver con el tipo de aguas encontrado en la industria de tratamiento de aguas, debido a la abundancia de partículas y altos contenidos de ácidos como nitratos.



(a) Perspectiva 1.

(b) Perspectiva 2.

Figura 3.1 Diferentes perspectivas del banco de ensayos empleado en la campaña experimental. En las figuras se muestra la estructura fabricada a base de perfiles de aluminio junto con el tanque de metacrilato en su interior.

De este modo, teniendo en cuenta todo lo anterior, se ha diseñado y montado una estructura con perfiles de aluminio, que aporta la rigidez y robustez necesarias para satisfacer los requerimientos arriba descritos. En la Figura 3.1 pueden observarse distintas perspectivas de la estructura y el tanque aquí descritos, donde puede observarse que el tanque se sitúa aproximadamente a 1 m de distancia del suelo, dejando espacio suficiente para el montaje del equipo de visualización. Además los dos últimos estantes proveen soporte para el motor eléctrico y el depósito de suministro de presión (este último descrito más adelante), mientras que los perfiles en diagonal aportan la estabilidad suficiente para que, en operación, la estructura no se alabe.

3.1.3 Diseño de las alas

El diseño de las alas empleadas para este dispositivo será muy similar al empleado en el dispositivo bidimensional, por lo que muchos de los criterios de diseño seguidos en la Subsección 2.1.2 pueden ser extrapolados a este caso. Así, por ejemplo, el perfil aerodinámico empleado será el mismo que en el caso bidimensional, es decir el perfil simétrico NACA 0012. Sin embargo, si que existen una serie de diferencias que merece la pena pararse a detallar. La primera de ellas es que ahora no se dispone de restricciones especiales ni para la cuerda ni para la envergadura del ala, ya que cada una debe ir unida al eje a través de su brazo correspondiente, existiendo por lo tanto un único punto de sujeción situado cerca de la zona de mayor espesor de la sección transversal del ala. En este caso, dado el carácter tridimensional del problema y con la intención de poder aplicar la teoría aerodinámica general para alas esbeltas (descrita en detalle en el Apéndice), sería conveniente que su alargamiento, definido como $\Lambda = b^2/S$ con b la envergadura y S la superficie en planta, sea tal que $\Lambda > 1$. Para el caso de un ala rectangular sin estrechamiento, la expresión del alargamiento es simplemente el cociente entre la envergadura y la cuerda, $\Lambda = b/c$, por lo que para el diseño de las palas considerado, una de las restricciones será que $b > c$.

Por otro lado, la sección transversal del ala será muy similar a la del caso bidimensional del Capítulo 2, ya que el ala actuará como depósito respecto a los orificios de inyección. No obstante, en este caso la inyección de aire se realiza desde un lateral del ala en lugar de hacerla desde la zona del extradós, aprovechando el punto de conexión del ala al eje de rotación a través del brazo. En cuanto a los orificios de inyección, estos consistirán al igual que en el caso del ala bidimensional en idénticos tubos capilares de acero con ratios $D/L_t \ll 1$, con el fin de conseguir que la perdida de carga evite variaciones bruscas de caudal por el cambio en la velocidad o el ángulo de ataque incidentes. Una importante diferencia con respecto al caso del perfil bidimensional, es que en este caso no se explorarán diferentes zonas de inyección en torno al borde de ataque, sino que empleando los resultados mostrados en la Subsección 2.3.1, se ha decidido colocar los puntos de inyección justo en el borde de ataque de cada pala. Además, se ha colocado un número mayor de puntos de

Tabla 3.2 Dimensiones características relevantes del diseño del ala y los orificios de inyección. El valor de g en la última columna representa la distancia de separación entre los diferentes orificios a lo largo de la envergadura. .

Elemento	b [mm]	c [mm]	D [μm]	L_t [mm]	g [mm]
Valor	200	125	160	30	5

inyección con la intención de analizar el comportamiento en distintos puntos de la envergadura y de emular aún más el posible de diseño de un prototipo de dispositivo de aireación y agitación de una planta depuradora.

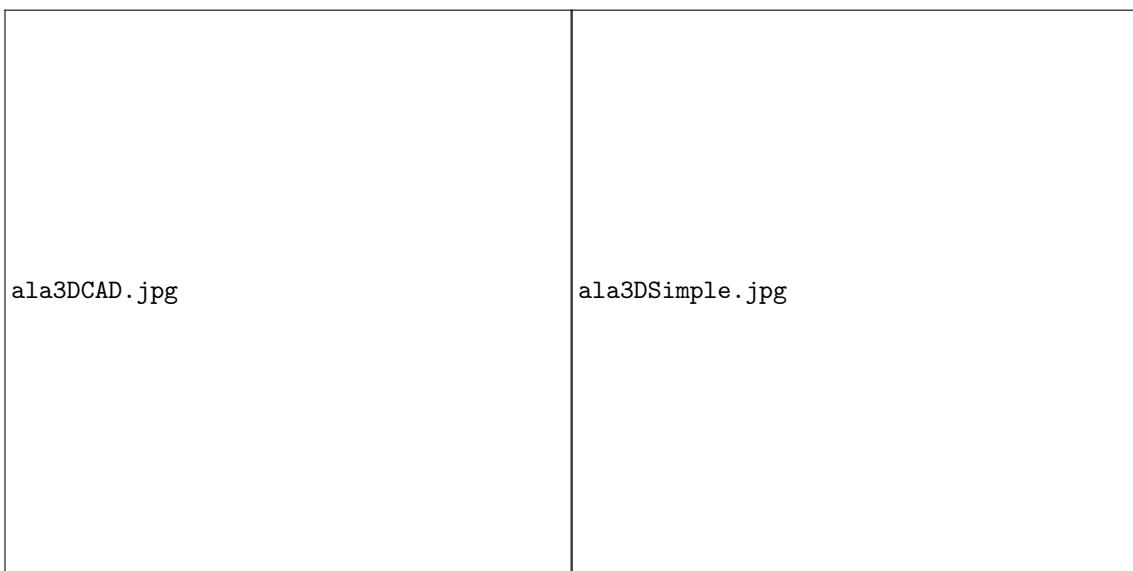
Finalmente, el diseño del ala queda completo especificando el sistema de variación de ángulo de ataque de las palas. Dado que existe un único punto de sujeción y por este pasarán no sólo los esfuerzos causados por la fuerza centrípeta sino también los ejercidos por la presión interior dentro de los tubos que confeccionan los brazos del dispositivo, parece conveniente que la unión entre las alas y los citados brazos metálicos no se haga directamente atornillando sobre la pala, puesto que el material de esta continúa siendo un polímero de ABS. En su lugar, se ha confeccionado una solución consistente en la fabricación de un perfil realizado en aluminio idéntico al del ala, pero con un espesor mucho menor que la envergadura de esta. De este modo, el perfil sirve de nexo de unión entre el ala y eje de rotación a través del brazo. Esta pieza de aluminio, tal y como se observa en la Figura ?? posee un total de 4 orificios avellanados, 3 de los cuales permiten una unión robusta del ala y el otro se atornilla mediante un tornillo hueco directamente al brazo, donde se ha realizado una rosca interna para tal fin. De este modo, simplemente girando el perfil de aluminio y apretando el mencionado tornillo, se dispone de un sistema capaz de implementar el ángulo de ataque de la pala deseado y de, a su vez, permitir el paso de aire a través de sí. Sin embargo, téngase en cuenta que el ángulo de ataque no puede ser prefijado, sino que debe medirse de forma adecuada mediante análisis posterior de imagen, similarmente al caso bidimensional.

3.1.4 Equipo rotativo y suministro de presión

Finalmente, se llega al último punto a completar en el diseño del prototipo dispositivo agitador y generador de microburbujas: el sistema de rotación y aireación. El sistema de rotación es una tarea sencilla de implementar, pues basta un motor eléctrico y un eje lo suficientemente largo (aunque no demasiado si se quieren evitar excentricidades de la carga); la única condición "especial" que debe satisfacer dicho eje es que consista en un tubo hueco por dentro, de forma que permita el paso de aire desde el circuito de presión hasta las alas. El motor, por su parte, posee un regulador de frecuencia que permite controlar la potencia suministrada pero e indirectamente la velocidad de rotación; la velocidad de rotación tendrá que medirse por lo tanto *a posteriori*. El diseño de un adecuado sistema de suministro de presión, por otro lado, es una tarea un poco más compleja. El sistema que se ha propuesto para permitir al ala rotar al tiempo que se transporta el aire desde la red de presión hasta el interior del ala consiste en lo siguiente:

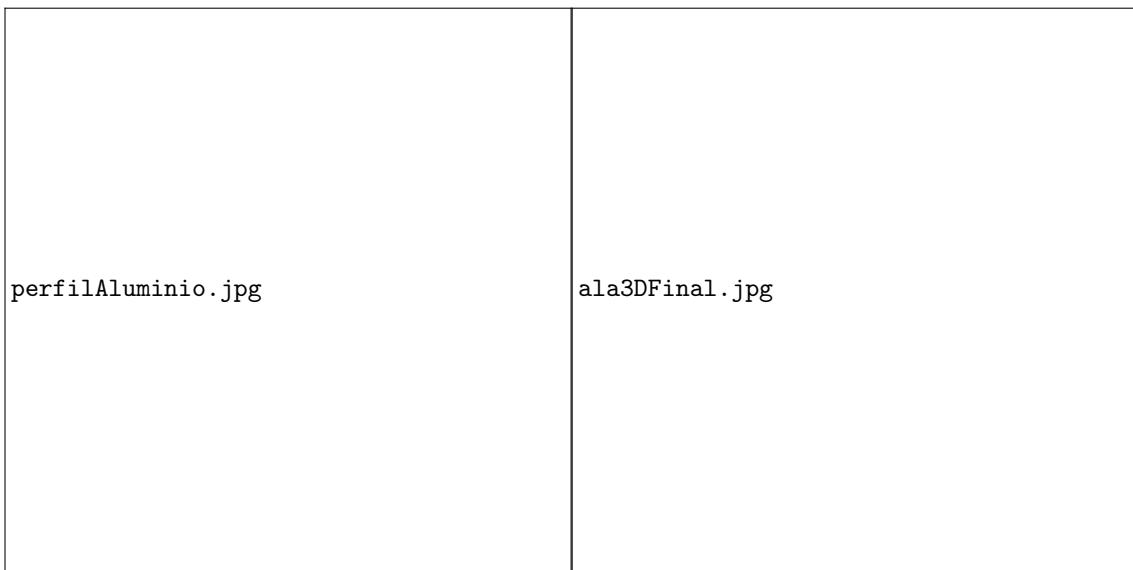
- Un recipiente de aluminio fabricado específicamente para el dispositivo servirá de depósito estanco, situado fuera del tanque.
- El depósito se encontrará alineado con el eje del motor, de forma que éste último pueda pasar a través de él.
- En la tapa superior e inferior del depósito se disponen 2 rodamientos (uno a cada lado) junto con retenes para permitir al eje rotar manteniendo el depósito estanco en todo momento.
- El eje posee en la zona que se encuentra en el interior del depósito unas ranuras que permiten la entrada de aire desde el depósito presurizado hacia su interior. Este aspecto implica además que el eje permanece siempre fijo respecto del depósito, esto es, tiene impedidos todos los desplazamientos incluido el paralelo a sí mismo.
- El depósito se conecta directamente a un manorreductor conectado a su vez a la red de presión, por lo que la presión interior del depósito y por lo tanto del ala es controlable desde este manorreductor de forma similar a como se hizo en el dispositivo del Capítulo 2.

En la Figura 3.3 pueden observarse algunos de los detalles del diseño del depósito y de su fabricación así como el aspecto de la configuración final con el motor eléctrico.



(a) Perspectiva en CAD del ala, con un corte longitudinal.

(b) Perspectiva ala fabricada.



(c) Perfil de aluminio.

(d) Perspectiva final.

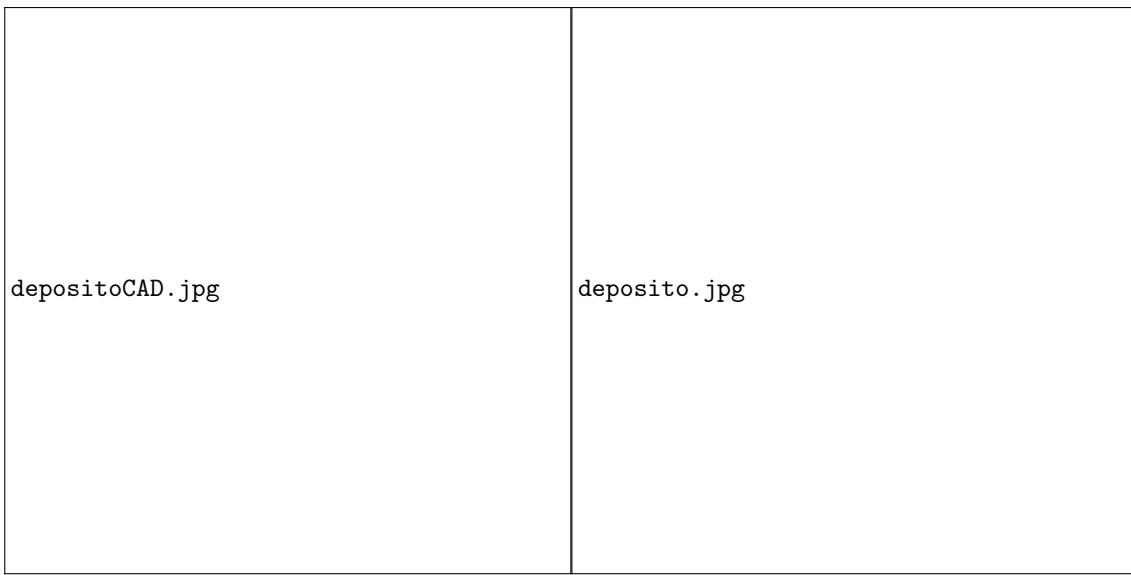
Figura 3.2 Diferentes perspectivas del diseño del ala para el prototipo de dispositivo rotatorio..

3.1.5 Ensamblaje final

Finalmente, descritos todos los componentes que conforman el banco de ensayos y el prototipo de agitación y aireación con microburbujas que se propone, se muestra en la Figura 3.4 el montaje experimental completo, donde se ha incluido además el equipo de visualización situado bajo el tanque, listo para comenzar la campaña experimental.

3.2 Experimentos

Una vez completado el diseño de todo el prototipo se está en disposición de comenzar una exhaustiva campaña experimental que proporcione los datos necesarios para evaluar la validez de las leyes de escala obtenidas en el capítulo anterior. De este modo, esta sección se estructura de forma análoga a su homóloga en el Capítulo 2, mostrando en primer lugar el espacio paramétrico que se pretende explorar durante la campaña experimental

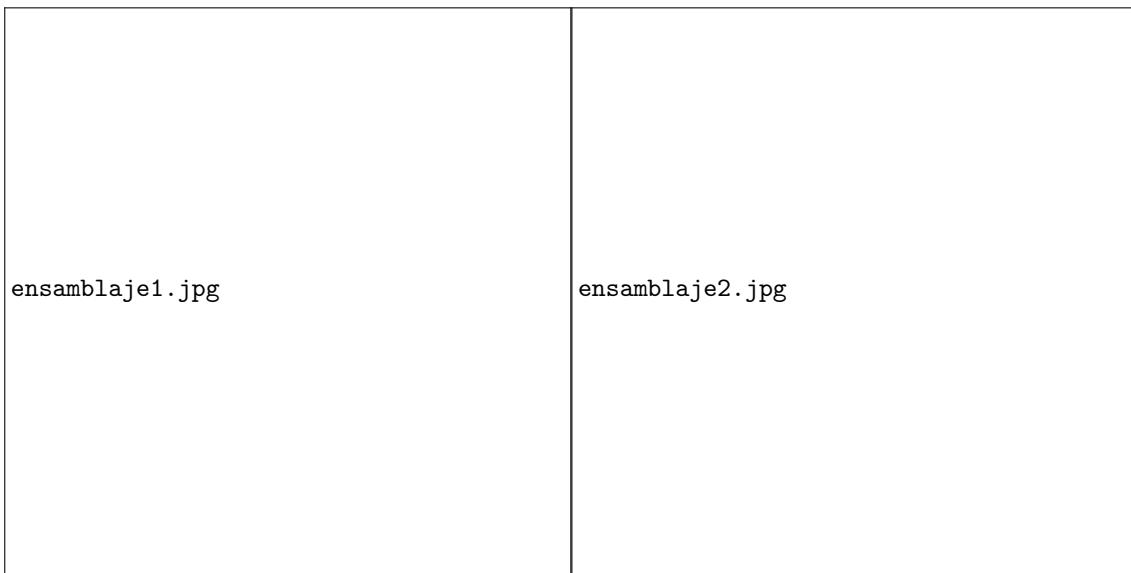


(a) Corte transversal del interior del depósito.

(b) Perspectiva final del depósito.

.composicion3D.jpg
(c) En-
sam-
bla-
je
con
mo-
tor.

Figura 3.3 Ilustración del diseño y fabricación del depósito de rotación estanca implementado en el dispositivo generador de microburbujas propuesto..



(a) Ensamblaje 1.

(b) Ensamblaje 2.

Figura 3.4 Perspectiva general del montaje experimental completo..

Tabla 3.3 Espacio paramétrico a explorar en la campaña experimental. La última columna representa las posiciones de los orificios que son analizados en cada vídeo, donde debe apreciarse que siempre son 3 los orificios grabados. .

Parámetros	Ω [rpm]	P_{int} [mbar]	α_g [°]	$y \in$ [mm]
Valores	1,2,3,4	1,2,3,4,5	8,12	[], [] , []

y posteriormente describiendo los métodos de análisis y postproceso utilizados. Cabe destacar que estos métodos supondrán una ligera modificación/ampliación de los ya expuestos en el capítulo anterior.

3.2.1 Campaña experimental

Las variables de las que dependen el diámetro y las frecuencias de producción de las burbujas para el problema tridimensional son las mismas que para el problema bidimensional, por lo que el tipo de parámetros y el rango explorado será muy similar al del problema 2D. Las variables libres que en este problema se pueden controlar son las siguientes:

- Velocidad de rotación de las palas. El valor que se controla es un parámetro arbitrario de frecuencia, por lo que la velocidad de rotación debe extraerse de las imágenes grabadas.
- Presión en el interior del depósito. Una vez más, no es posible el control directo del caudal de inyección de aire sino que sólo se puede actuar sobre la presión interior del depósito; no obstante, la pérdida de carga generada por los tubos capilares implicará, como en el caso bidimensional, que las variaciones de presión provocadas por el aumento de velocidad del líquido y/o por el cambio de ángulo de ataque originen variaciones pequeñas de caudal de aire eyectado.
- Ángulo de ataque geométrico, α_g . Este es el ángulo de ataque que poseen las palas con respecto a un plano de normal según la dirección del eje de rotación.

Aunque en este caso todos los orificios han sido situados en el borde de ataque de cada sección transversal del ala, los resultados obtenidos para el diámetro y las frecuencias variarán de un orificio a otro. En efecto, si bien la presión en el interior del ala puede considerarse uniforme y el ángulo de ataque geométrico es constante para todas las secciones de la pala, existen dos magnitudes que varían con la envergadura: la velocidad local de cada sección (producto de la velocidad angular de giro, Ω , y de la distancia de cada orificio al eje de rotación, r , y el ángulo de ataque efectivo, α_{eff} , definido en la teoría general de alas como $\alpha_{eff} = \alpha_g - \alpha_{ind}(y)$, siendo $\alpha_{ind}(y)$ el ángulo de ataque inducido por los torbellinos de punta de pala que varía a lo largo de la coordenada que recorre la envergadura, y , en el sistema de ejes viento tal y como se detalla en el Apéndice . Por lo tanto, parece necesario, para cada terna de parámetros (Ω, α, P_{int}) se analicen los diámetros y las frecuencias de distintos orificios a lo largo de la envergadura con el fin de poder capturar toda la fenomenología implicada en el problema. El espacio paramétrico explorado durante la campaña experimental queda resumido en la Tabla 3.3

El protocolo experimental seguido en este caso para obtener una serie experimental es el siguiente:

1. Selección del ángulo de ataque geométrico a ensayar. El ángulo de ataque geométrico de cada pala debe ser opuesto con respecto al plano de normal según el eje de rotación, ya que se pretende evitar momentos generados en el eje por efecto de la sustentación.
2. Verificación mediante análisis de imagen del ángulo de ataque geométrico.
3. Colocación de las palas e inmersión en el tanque de agua, conectando el sistema de presión para evitar la entrada de agua en el interior de las alas.
4. Posicionamiento de la cámara enfocando alguno de los 3 rangos de orificios especificados en la Tabla ??
5. Selección de la menor velocidad de rotación a testear-
6. Selección de la presión en el interior del depósito.
7. Accionamiento del mecanismo de rotación espera durante el tiempo requerido para que el sistema se considere estacionario².

² Debe apreciarse en este caso el carácter claramente no estacionario del problema, por lo que se asume que, transcurrido un tiempo en el que todos los parámetros mantienen un valor constante, se alcanza un régimen permanente.

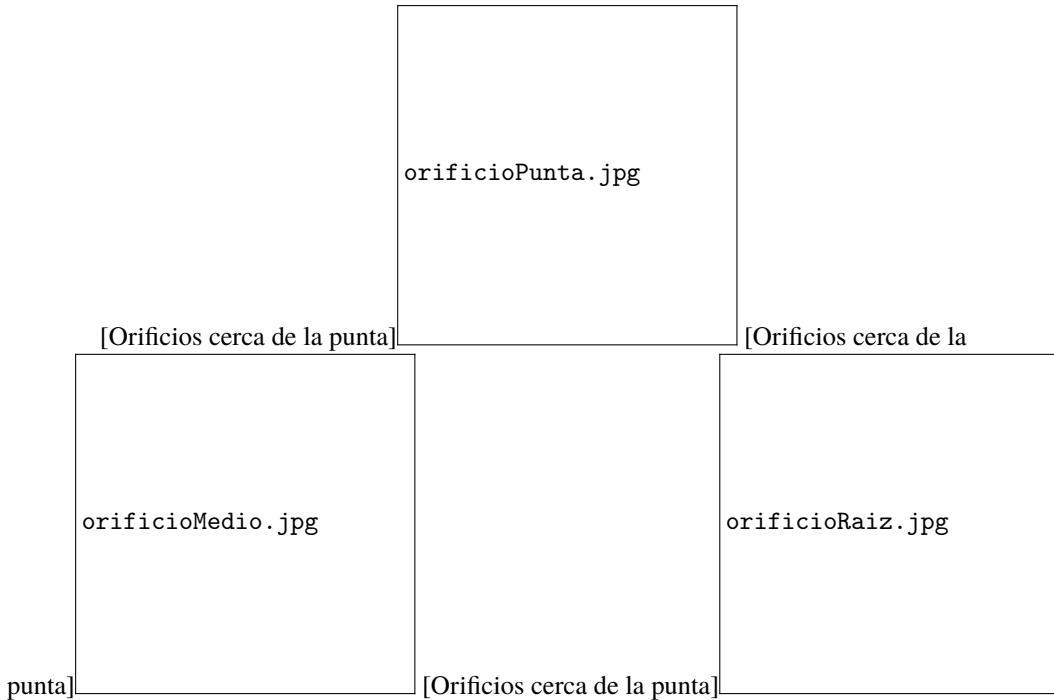


Figura 3.5 Muestra de imágenes extraídas de un vídeo realizado con $\alpha_g = 8^\circ$, $P_{int} = \text{loquesea}$ y $\Omega = \text{nosecuantasrpm}$.

8. Captura vídeo donde, al menos, haya transcurrido más de una vuelta completa del ala. Esto se debe a que el ala sobre la que se visualizan los resultados es aquella que posee un ángulo de ataque geométrico negativo con respecto al plano de normal según la dirección del eje de rotación y sentido hacia el motor, por lo que se requiere al menos una vuelta completa para poder efectuar la medida de la velocidad de rotación.
9. Una vez terminado, cambio en la presión interna del depósito con la misma velocidad.
10. Una vez recorrido todo el rango de presiones, cambio en la velocidad de rotación.
11. Finalizadas todas las velocidades, volver al paso 3 y repetir todos los pasos hasta completar todos los orificios de interés.
12. Finalmente, cambiar el ángulo de ataque geométrico y repetir el proceso.

3.2.2 Datos obtenidos y postproceso

Una vez se haya finalizado la campaña experimental se dispondrán de 3 vídeos para cada orificio y terna de parámetros ($\Omega, \alpha_g, P_{int}$). Un ejemplo ilustrativo del aspecto de estos vídeos puede observarse en la Figura 3.5 donde puede comprobarse que, al igual que en el caso bidimensional, se puede emplear software de tratamiento de imágenes para medir de forma manual el diámetro de las burbujas y las frecuencias de producción, exactamente de la misma forma que se realizó en la Subsección 2.2.2 y asignando un error de 2 px en la medida del diámetro. La medida de la velocidad angular de giro, por otro lado, puede obtenerse del número de frames transcurridos entre un paso de la pala y el siguiente. La medida del caudal en el problema tridimensional se efectúa de forma indirecta del mismo modo que en el caso bidimensional, esto es, aplicando la Ecuación (1.14) que relaciona diámetros de burbuja y frecuencia con el caudal.

Hasta este punto el postprocesado de resultados resulta completamente análogo al descrito para el caso bidimensional, con la salvedad de que el número de orificios donde hay que realizar las medidas es mayor. La única variable que resta por calcular ahora es el gradiente de presión local en el orificio, es decir $P_s(\bar{s} = 0)$. Sin embargo, no es posible emplear el código de elementos de contorno del Apéndice directamente utilizando el ángulo de ataque geométrico, ya que para el caso de un ala de envergadura finita el ángulo de ataque efectivo en cada sección del perfil se puede modelar como $\alpha_{eff}(y) = \alpha_g - \alpha_{ind}(y)$ para el caso de un ala sin torsión. El ángulo de ataque inducido, $\alpha_{ind}(y)$ es una medida del ángulo de ataque que se deflecta la corriente incidente causado por las velocidades verticales producidas por los torbellinos de borde marginal. En efecto,

justo en esta región y debido al carácter finito de la envergadura del ala, la presión en el extrados e intradós se iguala, provocando el movimiento del fluido desde el entorno del borde marginal del intradós hacia el extrados, generando de esta forma un torbellino en la punta. Este torbellino induce velocidades transversales a la corriente incidente dirigidas hacia la raíz sobre la superficie del ala, al tiempo que deflecta la corriente un ángulo $\alpha_{ind} = w_i/U_\infty$, siendo w_i la velocidad vertical que crea el torbellino de borde marginal y que puede escribirse de la forma

$$w_i(y) = \frac{1}{4\pi} \int_{y=-b/2}^{y=b/2} \frac{d\Gamma/dy_0}{y - y_0} dy_0 \quad (3.1)$$

siendo $\Gamma = \oint \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}$ el valor de la circulación sobre el ala. La deducción de la Ecuación (3.1) junto con las definiciones, hipótesis realizadas y otra serie de razonamientos de obligada comprensión sobre la aerodinámica de alas de envergadura finita puede encontrarse en el Apéndice . El ángulo de ataque inducido para cada posición y de la envergadura puede obtenerse como

$$\alpha_{ind}(y) = \frac{1}{4\pi U_\infty} \int_{y=-b/2}^{y=b/2} \frac{d\Gamma/dy_0}{y - y_0} dy_0 \quad (3.2)$$

En el Apéndice se incluyen los detalles de un método numérico conocido como *Vortex Lattice* que permite la resolución del problema sustentador de un ala de envergadura finita. La resolución de este problema permite conocer el valor de la circulación total Γ , de la distribución de circulación, $\Gamma(y)$ y del ángulo de ataque inducido, $\alpha_{ind}(y)$, además de otras variables que pudieran resultar de interés.

De este modo, para el caso de un ala aislada con ángulo de ataque geométrico α_g sobre la que incide una corriente uniforme U_∞ , se podría emplear el código de elementos de contorno empleado en el Capítulo 2 suministrando al programa el valor del ángulo de ataque efectivo para el perfil de la sección que se deseé analizar. Sin embargo, en este problema, existen dos diferencias con respecto al caso de un ala sobre la que incide una corriente uniforme a ángulo de ataque geométrico α_g : la primera es que en nuestro problema la velocidad varía de forma lineal con la distancia al eje y la segunda es que la velocidad que incide sobre una pala se encuentra perturbada por la anterior. Para solventar el primer inconveniente se propone un modelo consistente en considerar que sobre el ala incide una velocidad uniforme de valor $U_\infty \simeq \Omega(y_{max} + y_{min})/2$, es decir, una velocidad media entre la máxima y mínima a lo largo de la envergadura. Por otro lado, el modelado de la estela tras el ala no es un problema trivial hoy en día, por lo que se va a implementar un modelo sencillo que consiste en suponer que el ángulo inducido sobre la corriente de la pala anterior es convectado aguas abajo en la estela de torbellinos, por lo que en cada sección de la pala el ángulo de ataque efectivo será

$$\alpha_{eff}(y) = \alpha_g - 2\alpha_{ind}(y) \quad (3.3)$$

El fundamento teórico sobre el que se sustenta este modelo está basado en el Teorema de Bjerkness-Kelvin, que asegura que para el movimiento barótrópico de un fluido con fuerzas conservativas el valor de la circulación alrededor de una curva cerrada permanece constante en un marco de referencia que se mueve a la velocidad del fluido, es decir,

$$\frac{D\Gamma}{Dt} = 0 \quad (3.4)$$

por lo que la circulación total sobre cada ala es el doble de la que tendría si el flujo incidente no se hallara perturbado por la estela del ala anterior.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Fenomenología

3.3.2 Resultados cuantitativos

3.3.3 Escalado y conclusiones finales

Apéndice A

Aerodinámica potencial 2D. Método de Green.

Apéndice B

Aerodinámica de alas de envergadura finita. Vortex-Lattice

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 [11]	3
1.2	Representación esquemática de los diferentes dispositivos que identifican la tecnología utilizada en la producción de burbujas monodispersas. Figura adaptada de [11].	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 ℓ . Imagen tomada de [2].	8
1.6	Representación esquemática de un perfil aerodinámico que enfrenta una corriente a la velocidad U_∞ que forma un ángulo de ataque α 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 α 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.	13
2.1	Perspectiva del túnel hidrodinámico donde los experimentos han sido realizados.	16
2.2	Cámara de alta velocidad Phantom® v710	17

2.3	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.	19
2.4	Diferentes perspectivas del dispositivo generador de microburbujas bidimensional empleado en los experimentos.	20
2.5	Estructura de aluminio empleada 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.	21
2.6	Montaje experimental completo. En la Figura 2.6a puede apreciarse el sistema de posicionamiento del ala y variación del ángulo de ataque mientras que en la Figura 2.6b se muestra el equipo de visualización.	21
2.7	Ejemplo de imagen extraída de uno de los videos realizados a 5000 fps. La imagen muestra un experimento con $\alpha = 8^\circ$, $U_\infty = P_{int} =$.	23
2.8	Efecto de la posición del orificio en el proceso de generación de burbujas. En la figura se muestran dos orificios situados en $x/c = 0.0017$ a la izquierda y $x/c = 0$ a la derecha para un ángulo de ataque, $\alpha \approx 12^\circ$, una presión interior, $P_{int} = 200$ mbar 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.	25
2.9	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 Σ_{bda} es la superficie correspondiente al entorno del borde de ataque.	25
2.10	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
2.11	Formación de burbujas en un orificio situado en $\bar{s} = 0$ para velocidades del túnel diferentes. En ambos casos, $\alpha = 8^\circ$ y $P_{int} = 207$ mbar.	27
2.12	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
2.13	Evolución del diámetro y la frecuencia de las burbujas con el caudal de aire injectado para todos los ángulos de ataque testeados. En la Figura 2.13a y en la Figura 2.13b se representa la evolución del diámetro para dos velocidades diferentes, mientras que en la Figura 2.13c y la Figura 2.13c 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.	29
2.14	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 [3]. Nótese como la constante de la recta de mejor ajuste mostrada en la figura es muy similar a la hallada en [3].	30
3.1	Diferentes perspectivas del banco de ensayos empleado en la campaña experimental. En las figuras se muestra la estructura fabricada a base de perfiles de aluminio junto con el tanque de metacrilato en su interior.	33
3.2	Diferentes perspectivas del diseño del ala para el prototipo de dispositivo rotatorio.	35
3.3	Ilustración del diseño y fabricación del depósito de rotación estanca implementado en el dispositivo generador de microburbujas propuesto.	36

3.4	Perspectiva general del montaje experimental completo.	36
3.5	Muestra de imágenes extraídas de un vídeo realizado con $\alpha_g = 8^\circ$, $P_{int} = \text{lo que sea}$ y $\Omega = \text{nose cuantas rpm}$	38

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.	19
2.3	Rango paramétrico empleado durante la realización de los experimentos.	22
3.1	Medidas del tanque empleado en los experimentos del ala acuática rotativa	32
3.2	Dimensiones características relevantes del diseño del ala y los orificios de inyección. El valor de g en la última columna representa la distancia de separación entre los diferentes orificios a lo largo de la envergadura.	34
3.3	Espacio paramétrico a explorar en la campaña experimental. La última columna representa las posiciones de los orificios que son analizados en cada vídeo, donde debe apreciarse que siempre son 3 los orificios grabados.	37

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] A Evangelio and J M Gordillo, *Pressure gradient induced generation of microbubbles*, (2015), 653–668.
- [4] 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.
- [5] a M Gañán-Calvo and J M Gordillo, *Perfectly monodisperse microbubbling by capillary flow focusing.*, Physical review letters **87** (2001), no. c, 274501.
- [6] 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.
- [7] ———, *Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: an overview.*, Biotechnology advances **27** (2009), no. 2, 153–76.
- [8] José Manuel Gordillo, Alejandro Sevilla, and Francisco Campo-Cortés, *Global stability of stretched jets: conditions for the generation of monodisperse micro-emulsions using coflows*, Journal of Fluid Mechanics **738** (2014), 335–357.
- [9] 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.
- [10] Michiel Postema and A Imaging Applications, *Ultrasound-Induced Gas Release from Contrast Agent Microbubbles*, **52** (2005), no. 6, 1035–1041.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] M Sadatomi, *Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube*, **29** (2005), 615–623.
- [14] 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.
- [15] 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.

