



Universidad
Zaragoza



Area de Mecánica de Fluidos
Departamento de
Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos
Universidad de Zaragoza

Trabajo de fin de grado

Estudio de la evolución espacial de la concentración de burbujas por técnicas de análisis de imagen en flujos cavitantes.

Study on the spatial evolution of the bubble concentration through flow visualization techniques in cavitating flows.

Autor: Alberto Garrido Ruiz

Tutor: Dr. D. Luis Manuel Cerecedo Figueroa

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Zaragoza, noviembre 2021

Estudio de la evolución espacial de la concentración de burbujas por técnicas de análisis de imagen en flujos cavitantes.

Study on the spatial evolution of the bubble concentration through flow visualization techniques in cavitating flows.

SINOPSIS

A lo largo de esta memoria se expondrán los resultados obtenidos sobre el estudio de parte de la fenomenología, característica de los procesos de cavitación hidrodinámica, al generarla con diferentes geometrías de contracción/expansión, con el objetivo fundamental de determinar las posibles aplicaciones a la hora de explotar el fenómeno de la cavitación.

A través de técnicas de análisis de imágenes se ha estudiado la evolución espacial de la concentración de burbujas en flujos cavitantes. El fenómeno se generó en un canal bidimensional al que se le han colocado obstáculos con diversas geometrías para producir diferentes condiciones de cavitación. En función del caudal circulante y de la forma de la contracción se han logrado diversas condiciones en las nubes de burbujas de vapor así generadas, y manifestadas a través de su concentración dentro del campo de flujo.

El estudio sobre la concentración de burbujas, a su vez, se realizó a través de la escala de grises obtenidos de los fotogramas (cuadros) adquiridos con una cámara de alta velocidad. Con base en este análisis, realizado en regiones adecuadas del campo de flujo, se pudo observar la evolución espacial del proceso de generación, crecimiento e implosión de las burbujas de vapor. Los resultados así obtenidos generarán una base de datos que permita predecir, con criterios adecuados, respecto a la forma de las contracciones/expansiones, el uso y explotación del fenómeno en diversas aplicaciones.

Agradecimientos:

Quiero agradecer a la Universidad de Zaragoza y a todo su personal docente por la formación que me ha procurado durante estos años y, en especial, al Dr. D. Luis Manuel Cerecedo Figueroa, mi director de proyecto, por su dedicación, su tiempo, sus extensos conocimientos y su invaluable ayuda, sin la cual la elaboración de este trabajo fin de grado no habría sido posible.

Índice

1.INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Antecedentes.....	5
1.1.1. Proceso Avanzado de Oxidación (PAO): Cloración, Fotocatálisis y Cavitación.....	5
1.2. Sobre el grupo de cavitación y sus necesidades.....	6
1.3. Motivación.....	6
1.4. Alcance de la memoria.....	7
2.FÍSICA DEL PROBLEMA.....	9
2.1. Cavitación. Definición.....	9
2.1.1. Antecedentes de la cavitación como Proceso Avanzado de Oxidación (PAO).....	11
2.2. El vórtice de Rankine.....	11
2.3. Objetivos del presente trabajo.....	15
3.INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	16
3.1. Descripción de la instalación experimental.....	16
3.2. Geometrías del obstáculo.....	18
3.3. Características de la cámara de alta velocidad, lentes y la iluminación.....	22
3.4. Criterios para la captura de las imágenes.....	23
3.4.1. El tiempo de exposición de imágenes.....	24
3.4.2. Frecuencia de adquisición de imágenes.....	24
3.5. Descripción de la Metodología de Análisis de Imágenes. Caso base.....	25
3.5.1. Procedimiento previo. Acondicionamiento de las imágenes.....	25
3.6. Conclusiones parciales de capítulo.....	29
4.RESULTADOS DE LA CAVITACIÓN HIDRODINAMICA.....	30
4.1. Evolución espacial de la concentración de burbujas por el método de la escala de grises para el caso base.....	30
4.1.1. Evolución espacial de la concentración de burbujas.....	35
4.1.2. Análisis de la totalidad del campo de flujo.....	37
4.1.3. Selección de las condiciones experimentales para las demás geometrías.....	38
4.2. Resultados sobre otras geometrías y análisis comparativo.....	39
4.3. Conclusiones parciales del capítulo.....	42
5.CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	44
5.1. Resumen.....	44
5.2. Conclusiones finales: Elección de la geometría más apropiada.....	45
5.3. Trabajos futuros.....	46
BIBLIOGRAFIA.....	47
ANEXOS.....	49

ANEXO A: Software Fiji-ImageJ para el análisis de imagen y código empleado para la realización del proyecto.	49
A.1. Fiji-ImageJ.	49
A.2. Código programado en Fiji.	50

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes.

El acceso al agua potable, elemento primordial para el desarrollo de la vida humana, es uno de los problemas más críticos en muchas zonas del mundo por lo que es considerado uno de los principales retos en la actualidad. La falta de agua potable es responsable de más muertes en el mundo que la guerra. Se estima que 844 millones de personas carecen de un servicio básico de suministro de agua potable, cifra que incluye a 159 millones de personas que dependen de aguas superficiales, y que, en todo el mundo, al menos 2000 millones de personas se abastecen de una fuente de agua que está contaminada por heces. En los países más pobres, la mitad de las camas hospitalarias son ocupadas por pacientes con enfermedades relacionadas con el agua contaminada o la falta de saneamiento. Enfermedades derivadas del agua en mal estado (que derivan en diarreas severas) y la falta de rehidratación matan a 5 mil niños al día [1]. Se espera que el desarrollo tecnológico dé acceso a servicios de saneamiento e higiene, garantice la disponibilidad de agua potable y mejore la calidad de ésta, disminuyendo considerablemente las enfermedades transmitidas por su escasez o ausencia.

El proceso de tratamiento del agua debe incluir la desinfección (destrucción o inactivación) de algunos organismos patógenos de origen fecal [2,4], además de la eliminación de agentes químicos peligrosos [3,5]. A continuación, se describen brevemente los principales procesos de tratamientos de aguas residuales que incluyen la cloración (adición de cloro, dióxido de cloro, cloraminas, ...), la radiación ultravioleta con adición de ozono u óxido de titanio (TiO) como agentes oxidantes, y la cavitación, cuyo abanico de aplicaciones se perfila como una gran alternativa.

1.1.1. Proceso Avanzado de Oxidación (PAO): Cloración, Fotocatálisis y Cavitación.

Las propiedades desinfectantes del cloro y sus compuestos son conocidas desde hace cientos de años (p.e. el agua de javel o lejía usada en Francia desde 1792) y han supuesto uno de los mayores avances en la desinfección del agua para el uso humano [2]. Sin embargo, en los últimos años se ha detectado que la cloración del agua ha perdido eficacia debido al aumento de la resistencia de algunas cepas bacterianas a este proceso (Mir et al. [2]). Además, los compuestos químicos que aparecen como subproductos de la desinfección del agua por cloración (p.e., trihalometanos y ácidos haloacéticos), y a los que la población se encuentra expuesta (vía ingestión, inhalación o absorción por la piel del agua potable y de las piscinas), suponen riesgos para la salud [3,5]. Pruebas epidemiológicas muestran relación entre la exposición a largo plazo a los trihalometanos (subproductos de la cloración) y el riesgo de padecer cáncer de vejiga, aunque la naturaleza causal de la relación no es concluyente (Villanueva et al. [3]).

De esta forma, el avance tecnológico se está redirigiendo al desarrollo de nuevos métodos de desinfección/depuración. Se han experimentado, con gran éxito, métodos de desinfección que aprovechan la energía solar (procesos conocidos como SODIS: Solar DISinfection). Estos métodos, para uso doméstico, son capaces de realizar un tratamiento específico y completo, pero careciendo de control sobre los resultados [5].

Otro proceso avanzado de oxidación (PAO) se basa en la cavitación [4,5], tecnología que está demostrando su eficacia, no solo en la eliminación de microorganismos patógenos sino también en la oxidación de agentes químicos cancerígenos. Además, se han conseguido grandes avances hasta la fecha en lo referente al consumo energético y la viabilidad en el redimensionamiento de instalaciones para uso industrial [4,5,6].

Así, los procesos de tratamientos de aguas con cavitación tienen numerosas ventajas con respecto a otros procesos avanzados de oxidación [4,5,6,7], lo que hace de la cavitación un fenómeno físico de gran interés para la comunidad científica, con un amplio futuro, y sin requerimiento (o muy poca aportación) de sustancias oxidantes de apoyo [5].

Las diferentes formas de generar la cavitación son: la cavitación hidrodinámica, la cavitación ultrasónica, la cavitación por concentración de láser y la cavitación por arco eléctrico. Las dos últimas basadas en producir la cavitación mediante la concentración localizada de una gran cantidad de energía.

1.2. Sobre el grupo de cavitación y sus necesidades.

El Grupo de Cavitación, del Área de Mecánica de Fluidos, de la Universidad de Zaragoza, ha trabajado sobre este fenómeno. En particular, se están desarrollando nuevas tecnologías basadas en la cavitación hidrodinámica (CH) con el objetivo de aplicarlas al tratamiento de aguas residuales dada su mayor escalabilidad [5,7] y el mejor rendimiento respecto, por ejemplo, a la cavitación ultrasónica (Jyoti y Pandit [6], Abadía [8]).

En el año 1998, el Grupo inicia los estudios sobre la viabilidad del tratamiento de aguas contaminadas con compuestos orgánicos mediante cavitación (Brunet [9] y Arrojo [10]). En 2009, Torres [11] reporta resultados sobre su aplicación al mejoramiento de crudos pesados, mientras que Castaño [12] informa sobre la alteración de las propiedades fisicoquímicas de la glicerina. En 2012, Bueno [13] reporta sobre las consecuencias de aplicar el fenómeno de cavitación a la eliminación de distintos tipos de microorganismos en aguas infectadas artificialmente; con los resultados aquí obtenidos se pudo diseñar conceptualmente un equipo suficientemente eficiente, capaz de llegar a la completa eliminación de patógenos (Patente P201630269). Por otra parte, Abadía [8], a través del análisis de las fluctuaciones de presión producidas durante la cavitación, realizaría un estudio energético del nuevo equipo al comparar los procesos de cavitación hidrodinámica y cavitación ultrasónica; cuantificó la eficiencia del nuevo dispositivo cavitador confirmando las mejoras del diseño conceptual. Por último, en el año 2014, Lorient [14] estudió la presencia de los penachos de burbujas variando los regímenes de flujo y las geometrías de contracción y expansión en las paletas del rotor del nuevo dispositivo cavitador; desafortunadamente su estudio no fue concluyente debido a la complejidad de la geometría del equipo de cavitación y el acceso óptico al dispositivo. Para paliar este condicionamiento encontrado por Lorient, en el año 2015, Martín Vidaller [15] reporta el diseño y construcción de una instalación experimental que permite avanzar en el estudio de la cavitación hidrodinámica.

1.3. Motivación.

Teniendo en cuenta las posibles consecuencias que puede suponer la técnica de

cloración tradicional en la depuración del agua [2,3], y revisadas las tecnologías actuales para un mejor aprovechamiento del agua (desinfección y depuración) [4,5], a lo largo de la presente memoria se exponen los resultados obtenidos de un estudio experimental, por técnicas ópticas, del proceso de generación, evolución y disminución del número de burbujas generadas por cavitación.

Con base en las observaciones realizadas por Joyce et al. [16], el presente estudio pretende dar una primera recomendación en referencia a la selección adecuada de la geometría de la contracción-expansión para su aplicación en determinadas condiciones específicas deseadas. La concentración inicial de burbujas y su evolución espacial serán indicio de cómo se aprovecha el fenómeno (si la concentración de burbujas disminuye o aumenta).

Finalmente, estudios recientes realizados por Barre et al. [17] en dispositivos Venturi indican el acoplamiento de la concentración de burbujas con las estructuras de vorticidad generadas durante su desprendimiento. Esto centra la atención en la geometría de la contracción, pues en función de los fenómenos hidrodinámicos se producirán diferentes estructuras de las nubes de burbujas.

1.4. Alcance de la memoria.

La presente memoria se encuentra dividida en 5 capítulos.

En el capítulo 1 se han presentado los antecedentes que sientan las bases del proyecto (una breve descripción de las consecuencias del tratamiento de las aguas por cloración, las ventajas de la cavitación con respecto a este método clásico y las diferentes formas en las que se puede generar dicho fenómeno), y una introducción a los avances y necesidades del Grupo de Cavitación del Área de Mecánica de Fluidos, de la Universidad de Zaragoza.

En el capítulo 2 se explica el fenómeno de la cavitación (dando algunas aplicaciones de ésta), se ha desarrollado el análisis del vórtice de Rankine (bajo las cuales es posible observar la posible asociación de las estructuras de vorticidad a la generación de la cavitación), y su importancia en la evolución espacial de la concentración de las nubes de burbujas.

En el capítulo 3 se describen brevemente la instalación experimental diseñada y construida ex profeso, las geometrías elegidas del obstáculo (diseñadas y construidas de acuerdo a las propuestas del Grupo de Investigación), las prestaciones de la cámara de alta velocidad, las lentes empleadas y la configuración de la iluminación. Se desarrolla en detalle la metodología para el análisis de las imágenes obtenidas y se exponen las conclusiones parciales del capítulo.

En el capítulo 4 se exponen los resultados de la evolución espacial de la concentración de burbujas por el método de la escala de grises para el *caso base*. Se determinan las condiciones de flujo con base en el caso de referencia, se estudian otras geometrías distintas planteadas para estudio, se comparan con respecto al caso de referencia, y se presentan las conclusiones parciales del capítulo.

En el capítulo 5 se presenta una síntesis del trabajo realizado, las conclusiones finales del proyecto, y las recomendaciones de trabajos futuros que den continuidad a esta rama de investigación.

2. FÍSICA DEL PROBLEMA.

2.1. Cavitación. Definición.

La cavitación se define como la aparición de burbujas de vapor en el seno de un líquido, de apariencia homogénea, al someterlo a presiones suficientemente bajas [4,5,7].

La cavitación ha sido históricamente un fenómeno indeseable en las turbomáquinas y sistemas hidráulicos, ya que su presencia es causante de ruidos, vibraciones y alteraciones en el comportamiento hidrodinámico, culpable de erosión y pérdida de la eficiencia.

En el diagrama presión-temperatura para una sustancia pura (Figura 1) se pueden analizar las diferencias entre los procesos de ebullición y cavitación, donde se aprecia que, aunque inicialmente ambos conllevan a un cambio de fase, dicho cambio se produce de forma distinta. Mientras que en el primero se logra el cambio de fase cruzando la línea líquido-vapor mediante un aumento de la temperatura a presión constante, en el segundo se logra ese mismo cambio al reducir la presión a temperatura constante [5].

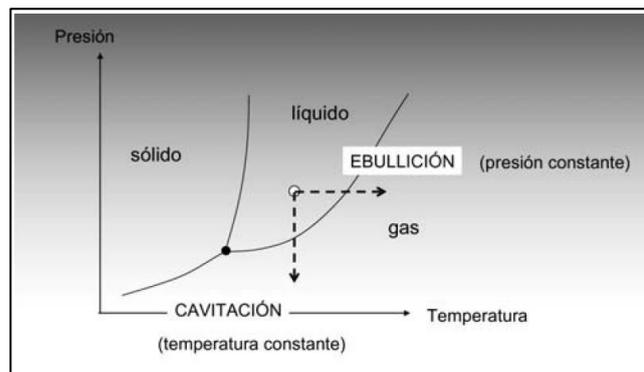


Figura 1. Diagrama p-T de cambio de fase de una sustancia [5].

Fundamentalmente, el descenso de la presión puede ser provocado por cambios bruscos en la velocidad del líquido (p.e., al pasar alrededor de un obstáculo sólido o por cambios en la geometría de la tubería por la que discurre el líquido - Cavitación Hidrodinámica), o por la acción de un transductor que genere ondas de presión al vibrar a altas frecuencias (Cavitación Ultrasónica). La cavitación también puede darse por enfoque de láseres de pulso corto (Cavitación por concentración de laser) e inducida mediante un arco eléctrico (Cavitación por arco eléctrico). Los fenómenos de cavitación pueden ser favorecidos por pequeñas partículas en suspensión en el líquido, las cuales actuarán como *núcleos de cavitación*, requiriendo así un menor esfuerzo de tensión para producir el cambio de fase.

Las burbujas, formadas por la disminución de la presión en el líquido, inevitablemente contienen gases no condensables y vapor del propio líquido [5,19]. La presión total dentro de la burbuja se encuentra en equilibrio con la presión del líquido en el exterior y la producida por la tensión superficial [5,18].

$$p_g + p_v = p_\infty + \frac{2\sigma}{R}$$

(Ec. 1)

donde p_g es la presión del gas; p_v es la presión de vapor de líquido; p_∞ es la presión lejos de la burbujas; σ es el coeficiente de tensión superficial del líquido; y R es el radio de la burbuja.

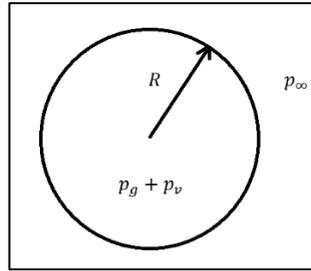


Figura 2. Equilibrio de presiones en una burbuja esférica.

Teniendo en cuenta los efectos dinámicos, el balance de fuerzas normales en la interfase de la burbuja es:

$$p_g(t) + p_v = p(R, t) + \frac{2\sigma}{R} - 2\mu \left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{r=R}$$

(Ec. 2)

Esta ecuación es muy similar a la condición de equilibrio planteada anteriormente (Ec. 1) salvo por la aparición de un término extra, que se debe a la contribución de la viscosidad del líquido [18].

Al aumentar la presión externa, p_∞ , el equilibrio de fuerzas en la burbuja se rompe y ésta tiende a implotar, colapsando violentamente. Lord Rayleigh en 1917 [19] demostró que durante el colapso se alcanzan presiones y temperaturas localizadas de miles de bar y grados Kelvin, respectivamente. Dichas implosiones suceden en tiempos del orden de los microsegundos (μs) por lo que el líquido permanece en condiciones próximas a las ambientales, lo que permite considerar que la implosión es adiabática, y que por tanto la temperatura permanece constante, facilitando el análisis de los resultados obtenidos [19,20]. También se ha demostrado que cuando la burbuja de vapor colapsa de forma asimétrica (por ejemplo, cerca de una pared o cuando se encuentra rodeada por otras burbujas) se generan micro-chorros de muy alta velocidad ($\sim 10^2$ m/s) y esfuerzos cortantes muy altos ($\sim 10^7$ s $^{-1}$) [5]. Las burbujas, generadas en zonas de muy altas velocidades del flujo, se convierten en “puntos calientes” durante la implosión que generan, por disociación del vapor de agua, radicales hidroxilo (OH*), y que convierten aquéllos en micro-reactores ideales para oxidar contaminantes, aumentar las velocidades de las reacciones químicas y someter organismos a un campo térmico que puede inactivarlos e incluso destruirlos [5,20].

Por otro lado, las pequeñas burbujas también podrían experimentar coalescencia, generando burbujas de mayor tamaño, lo cual las llevaría a explotar en vez de implotar. Este proceso es mucho más lento (tiempo de residencia mayores) y con una considerable menor liberación de energía. La dinámica de las burbujas vendrá determinada por las propiedades del líquido y por las características de los pulsos de la presión forzadora [3,5].

2.1.1. Antecedentes de la cavitación como Proceso Avanzado de Oxidación (PAO).

Existe una gran cantidad de bibliografía especializada sobre las aplicaciones y utilidades de la cavitación como PAO. Esto se debe al conjunto de fenómenos acoplados a la cavitación: efectos mecánicos (micro-chorros, grandes esfuerzos cortantes y ondas de presión), efectos termodinámicos (altas temperaturas y presiones durante el colapso) y efectos químicos (generación y liberación de radicales hidroxilo, OH^* , que promueven la oxidación de materia orgánica e inorgánica).

A continuación, se expone una síntesis de los trabajos que han servido de base para la elaboración y desarrollo del presente trabajo.

Jyoti y Pandit [6] experimentaron con la desinfección de agua de pozos mediante diferentes reactores de cavitación, observando una mayor ratio de desinfección con los reactores de cavitación hidrodinámica que con los reactores de cavitación ultrasónica; en este estudio destacan los bajos consumos energéticos de los reactores de cavitación hidrodinámica, que confirman la viabilidad de esta técnica.

En el estudio realizado por Farkade et al. [21] se investiga el uso de los reactores de cavitación para su aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas, y proponen el uso de la cavitación ultrasónica para la desinfección microbiana; los autores destacan el uso de la cavitación como sustituto del método de cloración.

Shirgaonkar [22] demostró los efectos de la cavitación como micro-reactor al lograr la liberación de una significativa cantidad de proteínas con un homogeneizador de alta velocidad y elevada presión. Este fenómeno se ha explotado mediante el desarrollo de reactores cavitantes aptos para procesos de emulsificación en alimentación, industrias farmacéuticas y de bioprocesado.

Castaño [12] reporta los resultados de experimentos de cavitación con glicerina, subproducto del proceso de obtención del biodiesel (el cual se obtiene en exceso y posee limitados usos). Para este estudio se emplea un reactor de cavitación hidrodinámica, logrando variar la composición química de la glicerina entre un 15% y un 21% (observada a través de la disminución de su viscosidad).

En general, la cavitación, además de las aplicaciones señaladas (desinfección y depuración) se ha investigado y aplicado en sistemas de limpieza (ultrasonidos en laboratorios, elementos mecánicos y filtros), soldadura (limpieza de piezas antes de soldar), emulsificación (evita o disminuye el uso de surfactantes), dispersión de sólidos, atomización (control del tamaño de partículas, como en el caso de los dosificadores de medicamentos por inhalación y en motores de combustión), desgasificación de líquidos (bebidas y revelado fotográfico), y secado, entre otras [5,20].

2.2. El vórtice de Rankine.

Con base en los resultados experimentales obtenidos por Barre et al. [17], en donde se observa un gran acoplamiento entre las estructuras de vorticidad y la concentración de burbujas de vapor, se procede a realizar un estudio analítico del flujo.

La circulación y la vorticidad se encuentran estrechamente relacionadas. Partiendo de la definición de la circulación, y aplicando el teorema de Stokes, se demuestra que:

$$\Gamma = \oint_C \vec{u} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{\omega} \cdot \vec{n} dS$$

(Ec. 3)

donde S es una superficie delimitada por la curva C descrita por una partícula fluida que viaja a velocidad \vec{u} ; $d\vec{l}$ es elemento diferencial sobre la curva C ; $\vec{\omega}$ es el vector vorticidad ($\vec{\omega} = 2\Omega$); y \vec{n} es el vector normal a la superficie. De esta manera, es imprescindible encontrar el vector velocidad, \vec{u} , para conocer el valor de la circulación.

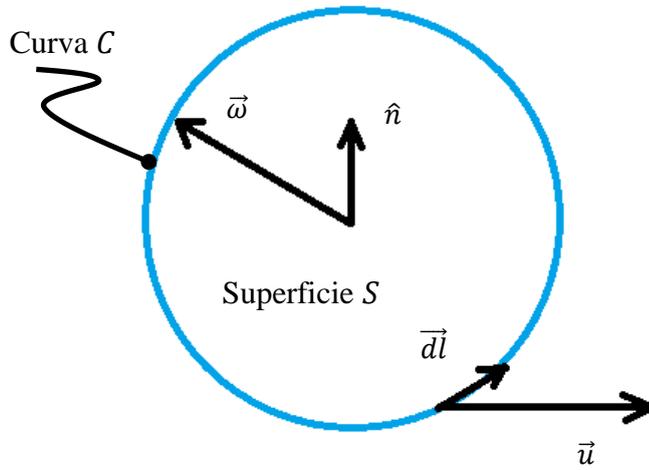


Figura 3. Relación entre vorticidad y la integral de contorno de la velocidad de la partícula fluida (circulación).

Partamos de las ecuaciones de Navier-Stokes (conservación de cantidad de movimiento para un flujo incompresible, estacionario y newtoniano) en coordenadas cilíndricas, y apliquémosla de acuerdo con la Figura 3. Inicialmente, la partícula fluida únicamente viaja en la dirección tangencial (sobre la curva C), lo que implica que: $u_r = u_z = 0$; además el flujo es simétrico ($\partial/\partial\theta = 0$) y las fuerzas másicas son despreciables:

$$\rho \left(\underbrace{u_r}_{0} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \underbrace{\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}}_0 + \underbrace{u_z}_{0} \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \underbrace{\frac{u_r u_\theta}{r}}_{u_r=0} \right) = -\frac{1}{r} \underbrace{\frac{\partial p}{\partial \theta}}_0 + \rho \underbrace{g_\theta}_0 + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \underbrace{\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2}}_0 + \underbrace{\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2}}_0 - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \underbrace{\frac{\partial u_r}{\partial \theta}}_0 \right]$$

(Ec. 4)

ó:

$$0 = \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} \right] = \frac{d}{dr} \left(r \frac{du_\theta}{dr} \right) - \frac{u_\theta}{r} = \frac{d^2}{dr^2} u_\theta + \frac{d}{dr} \frac{u_\theta}{r}$$

(Ec.5)

Al resolver se obtiene:

$$u_{\theta} = C_1 r + \frac{C_2}{r}$$

(Ec.6)

donde u_{θ} es la componente tangencial del flujo sobre la curva C , y C_1 , C_2 son las constantes de integración. De la ecuación (Ec.6) se deduce que el primer término del lado izquierdo se corresponde con la componente lineal típica de un vórtice forzado, mientras que el segundo término caracteriza el comportamiento (hiperbólico) como vórtice libre. A esta combinación de efectos se le conoce como el vórtice de Rankine.

1) **El vórtice forzado**, que se comporta como un movimiento de sólido rígido en rotación girando alrededor del eje geométrico del vórtice con una velocidad, Ω , cumple por definición que $u_{\theta} = \Omega r$, y por tanto su circulación será:

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} u_{\theta} \cdot ds = \int_0^{2\pi} (\Omega r) \cdot (r \cdot d\theta) = \int_0^{2\pi} \Omega r^2 d\theta = 2\pi r^2 \Omega \neq cte$$

(Ec. 7)

Así, la presión ejercida en un punto de dicho vórtice forzado se calcula como:

$$P = \int \rho \frac{u_{\theta}^2}{r} dr = \int \rho \frac{\Omega^2 r^2}{r} dr = \rho \Omega^2 \int r dr = \rho \frac{\Omega^2 r^2}{2} + C_3$$

(Ec. 8)

donde P es la presión, ρ es la densidad del fluido, C_3 la constante de integración, y r es la coordenada radial. Si despejamos Ω de la circulación (Ec. 7) y sustituimos en la presión (Ec. 8) obtenemos la expresión:

$$P = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\Gamma}{2\pi r^2} \right)^2 r^2 + C_3$$

(Ec. 9)

2) Por otra parte, **el vórtice libre** o **vórtice irrotacional** (denominado así porque se considera que todas las partículas fluidas giran alrededor de un mismo eje, pero no rotan sobre sí mismas, excepto en dicho origen), cumple por definición que $u_{\theta} = \frac{k}{r}$; con $k = cte$, y por lo tanto la circulación para éste será:

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} u_{\theta} \cdot ds = \int_0^{2\pi} \frac{k}{r} (r \cdot d\theta) = k \int_0^{2\pi} d\theta = 2\pi k = cte$$

(Ec. 10)

y la presión ejercida en un punto de dicho vórtice libre se calcula como:

$$P = \int \rho \frac{u_\theta^2}{r} dr = \rho \int \frac{k^2}{r^3} dr = -\rho \frac{k^2}{2r^2} + C_4$$

(Ec. 11)

siendo C_4 la constante de integración. Si despejamos la constante k de la circulación (Ec. 10) y sustituimos en la presión (Ec.11) obtenemos la expresión:

$$P = -\frac{\rho}{2} \left(\frac{\Gamma}{2\pi r} \right)^2 + C_4$$

(Ec. 12)

En resumen, el vórtice de Rankine combina los efectos de un vórtice forzado y de un vórtice libre. Para evitar la singularidad en centro geométrico del vórtice, Rankine estipula que hasta un cierto valor $r = R$, el flujo muestra un movimiento de sólido rígido, pero en la parte exterior se comporta como un vórtice libre. La función que representa al vórtice de Rankine toma la forma:

$$U_\theta(r) = \begin{cases} u_\theta = \Omega r, & r \leq R \text{ (forzado)} \\ u_\theta = \frac{k}{r}, & r > R \text{ (libre)} \end{cases}$$

(Ec. 13)

Debido a que no puede haber discontinuidades en el flujo, la presión en $r = R$ debe de ser la misma, por lo que se debe cumplir la condición:

$$P_{forzado}(r=R) = P_{libre}(r=R)$$

ó:

$$\frac{\rho}{2} \left(\frac{\Gamma}{2\pi R^2} \right)^2 R^2 + C_3 = -\frac{\rho}{2} \left(\frac{\Gamma}{2\pi R} \right)^2 + C_4$$

$$\rho \left(\frac{\Gamma^2}{4\pi^2 R^2} \right) = C_4 - C_3$$

(Ec. 14)

Debido a que en $r \leq R$ el flujo se comporta exclusivamente como un sólido rígido, la presión en el ojo del vórtice (vortex core: $r = 0$) es, por tanto, sustancialmente menor que la presión en el fluido que lo rodea (Ec.8). Si se dan las condiciones adecuadas (intensidad del vórtice) habría posibilidades de alcanzar la presión de vapor. De esta

forma existe una posible asociación entre las estructuras de vorticidad y la generación burbujas de cavitación.

2.3. Objetivos del presente trabajo.

El análisis realizado en el Apartado 2.2 coincide con los resultados reportados por Barre et al. [17], en donde, a través de un complejo equipo de fibra óptica, obtienen que los vórtices desprendidos están grandemente acoplados con la generación de las burbujas, por lo que estudiarlos de forma “controlada” se torna un tópico de gran importancia para el Grupo de Investigación. De esta forma, el presente proyecto tiene como objetivo el estudio de las consecuencias que la geometría de la contracción/expansión (obstáculo) tiene sobre la evolución espacial de la concentración de burbujas producidas por el desprendimiento de vórtices.

Se espera que la forma de las contracciones/expansiones den lugar a comportamientos hidrodinámicos distintos en la evolución de las nubes de burbujas. En función de la evolución de la densidad de burbujas, en cada zona del flujo debería ser posible generar criterios objetivos para los fines prácticos buscados por el Grupo de Investigación.

Para cumplir este objetivo, se empleó de una cámara de alta velocidad cuyas prestaciones permiten dar seguimiento a la evolución espacial y temporal de las nubes de burbujas generadas de forma diferente, y en función de la geometría del obstáculo. Cada uno de los cuadros (fotogramas) adquiridos es tratado con el programa de análisis de imagen Fiji-ImageJ (programa de dominio público y descarga gratuita), lo que ha permitido realizar el estudio de la evolución de las nubes de burbujas fotograma a fotograma. El análisis de las imágenes ha reportado una serie de datos numéricos que han sido posteriormente tratados en hojas de cálculo Excel. Mediante estos experimentos y la técnica de análisis desarrollada se han obtenido una serie de resultados que han permitido dar una primera descripción de la concentración y evolución de las burbujas.

3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA DE TRABAJO.

En este capítulo se introducen los equipos empleados y las metodologías seguidas durante la realización de este proyecto.

En primer lugar, se procede a la descripción breve de la instalación experimental, elemento principal donde se generó el fenómeno y cuyo diseño permite cambiar la geometría de los obstáculos. Posteriormente, se describe el proceso de corte y conformado por el que se generaron las diferentes geometrías propuestas. A continuación, se describen las características y prestaciones de la cámara de alta velocidad empleada para la captura de las imágenes, y la composición del arreglo óptico (lente y posición de la iluminación escogida).

Por último, se detallan los criterios para la adquisición de las imágenes y la metodología de su acondicionamiento para su posterior análisis.

3.1. Descripción de la instalación experimental.

Los ensayos han sido realizados en una instalación diseñada y construida ex profeso, la cual permite el acceso óptico para dar seguimiento al desarrollo de las nubes de burbujas en el líquido. (Detalles de la instalación en Vidaller [15]).

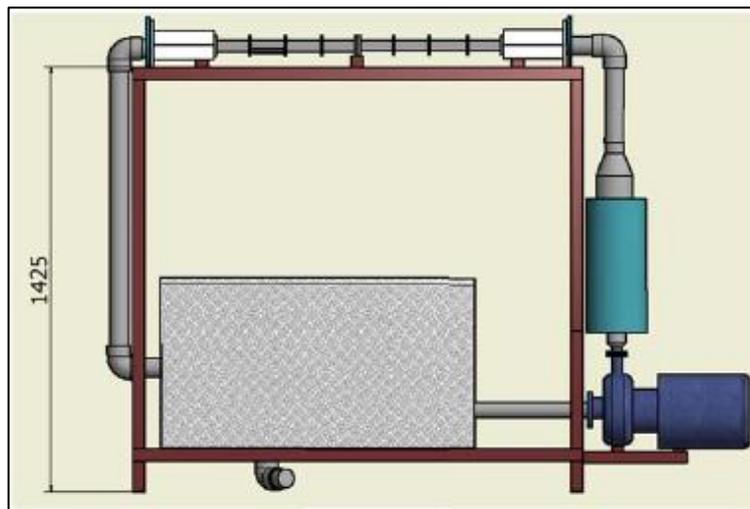


Figura 4. Alzado del dispositivo cavitador [15].

La instalación se ha diseñado con un sistema de recirculación de líquido mediante bombeo y un canal de sección rectangular de 50x20 mm. El canal cuenta con una longitud adecuada para permitir el desarrollo del flujo antes de llegar a la zona de pruebas [15]. El canal está construido de metacrilato, de 8 mm de grosor, para facilitar el acceso óptico y con ello el estudio del fenómeno mediante técnicas avanzadas de medida (velocimetría láser, y de visualización y análisis de imagen).

En la zona de ensayos del canal se puede colocar el obstáculo (de forma, número y tamaño variables), que actuará como contracción (Figura 5). Las burbujas son generadas por el aumento de la energía cinética del líquido y el consiguiente descenso local de la presión en la zona de mínimo paso del obstáculo de acuerdo con la ecuación de Bernoulli.

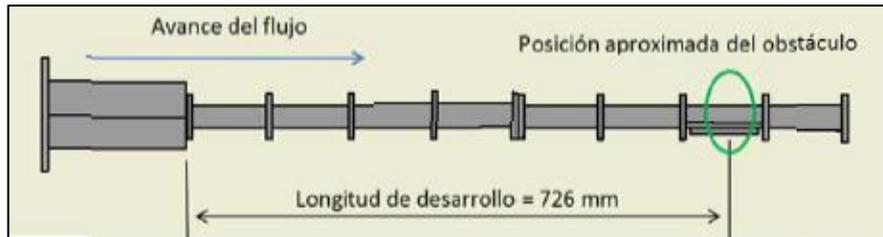


Figura 5. Longitud de desarrollo entre la entrada del canal y el obstáculo [15].

Para almacenar el líquido, se cuenta con un depósito troncocónico con tapa, de base rectangular y con capacidad de 300 litros, donde se almacena el agua para ser recirculada de nuevo al canal.



Figura 6. Deposito del dispositivo cavitador [15].

La bomba, encargada de hacer circular el líquido a través de la instalación, es una bomba centrífuga de la marca Caprari, modelo CM – Normalizada. El motor eléctrico es de inducción de 2 polos, apropiado para el servicio continuo, con aislamiento de clase F y capaz de generar una presión máxima de trabajo de 10 (bar).



Figura 7. Bomba Centrífuga Normalizada CM 32-160 A.

La medida del caudal que discurre a través de la zona de visualización se mide en todo momento mediante un rotámetro marca Hart, modelo series 6000 de área variable. Este equipo se dispone en sentido vertical ascendente y tiene un rango de medida de entre 2,5 y 25,0 m^3/h .



Figura 8. Rotámetro de área variable y convertidor de frecuencia.

La bomba se encuentra controlada por un convertidor de frecuencia VLT 6000 HVAC de marca Danfoss, el cual permite regular el caudal circulante de una forma mucho más precisa que empleando una válvula de estrangulamiento [8].

El método de operación previsto para el desarrollo de experimentos incluye el llenado del depósito, la puesta en marcha de la bomba y la regulación del flujo.

3.2. Geometrías del obstáculo.

Las diferentes geometrías (obstáculos) estudiadas han sido diseñadas y fabricadas específicamente para la realización de este proyecto. Todas las piezas fueron fabricadas a partir de una hoja de PVC de 8 mm de espesor. La anchura de todas ellas fue de 50 mm, coincidiendo así con la anchura del canal. La geometría fue modelada para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

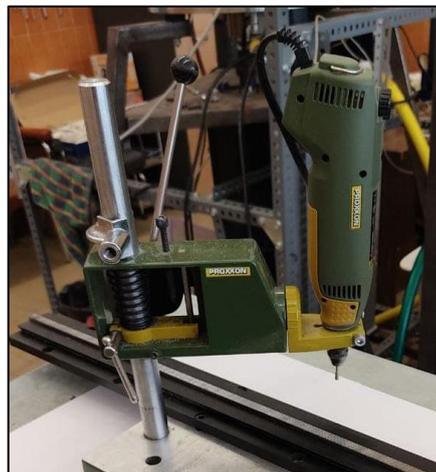


Figura 9. Fresadora marca Proxxon.

El conformado de las piezas se realizó en el propio laboratorio mediante una fresadora/taladradora marca Proxxon. Se diseñaron y fabricaron un total de 7 piezas que dieron juego para estudiar 9 geometrías diferentes, aunque 2 de ellas (Geometría N°2 y N°3), por la complejidad de los fenómenos asociados, han quedado fuera de los objetivos del presente proyecto. En la Tabla 1 se resumen las características

geométricas de las piezas ensayadas a lo largo de esta memoria.

Geometría N°1. Prisma rectangular de cantos vivos. *Caso base.*

Las geometrías se diseñaron con la finalidad de abarcar una amplia gama de posibilidades, partiendo de una “*geometría caso base*” de forma rectangular de 15 mm de altura (5 mm de paso de flujo) y con los cantos vivos, tal que el desprendimiento de la capa límite estuviera asegurado (Figura 10).

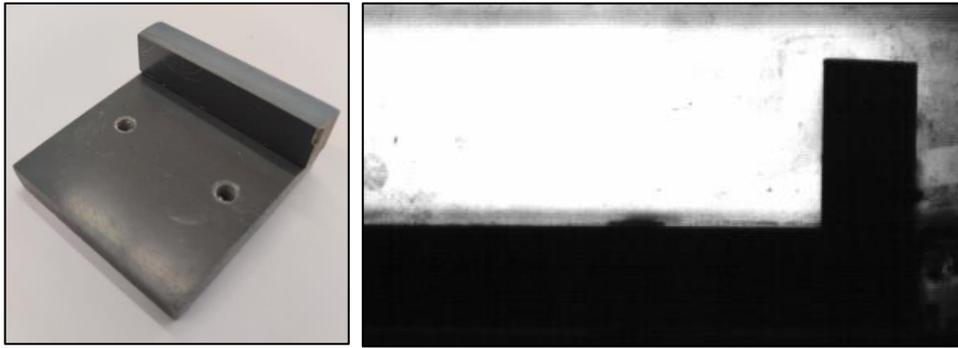


Figura 10. Geometría caso base y vista lateral desde la cámara.

Geometrías N°4 y N°5. Prisma piramidal I. Cuchilla.

La geometría N°4 se generó con una pieza en forma de “cuchilla”, de 15 mm de altura en su parte más alta y 7 mm de altura en su parte más baja. Esta pieza permitió estudiar las nubes de burbujas para el caso en el que la contracción es más suave que la expansión, pero al colocarla al revés, permite el arreglo contrario: contracción brusca y expansión suave. Así, con la pieza N°4 fue posible estudiar 2 geometrías distintas (Figuras 11 y 12).

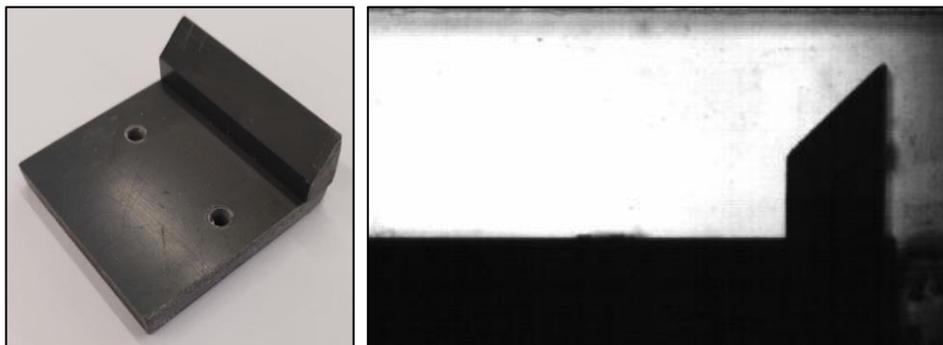


Figura 11. Geometría N°4 y vista lateral desde la cámara.

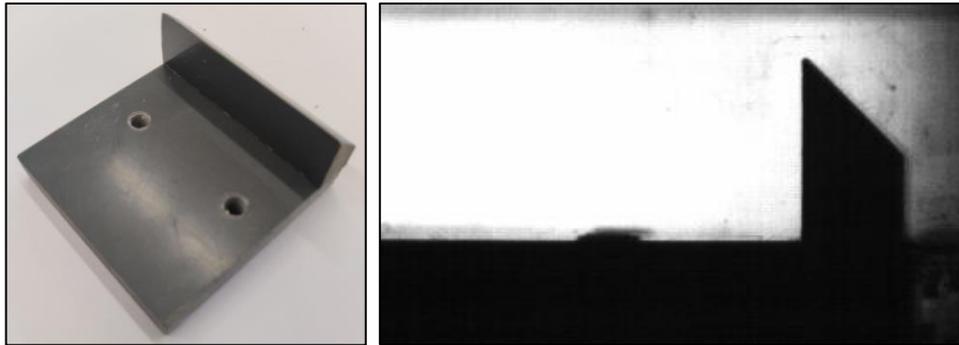


Figura 12. Geometría N°5 y vista lateral desde la cámara.

Geometría N°6 y N°7. Prisma trapezoidal.

La geometría N°6 se generó con un rectángulo sin esquina, de 16 *mm* de altura en su parte más alta y 12 *mm* de altura en su parte más baja, con 4 *mm* de anchura plana en su parte superior. El primer montaje forma una contracción brusca y una expansión suave (Figura 13).

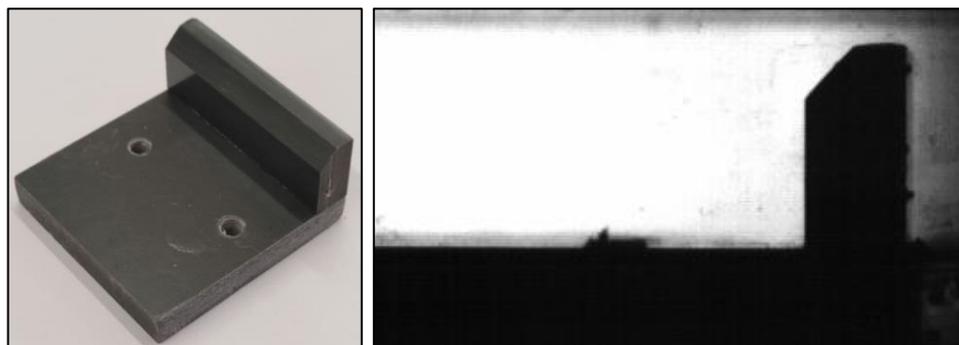


Figura 13. Geometría N°6 y vista lateral desde la cámara.

La geometría N°7 se logró con la misma pieza N°5, pero montada al revés, de forma que la contracción sea suave y la expansión brusca (Figura 14).

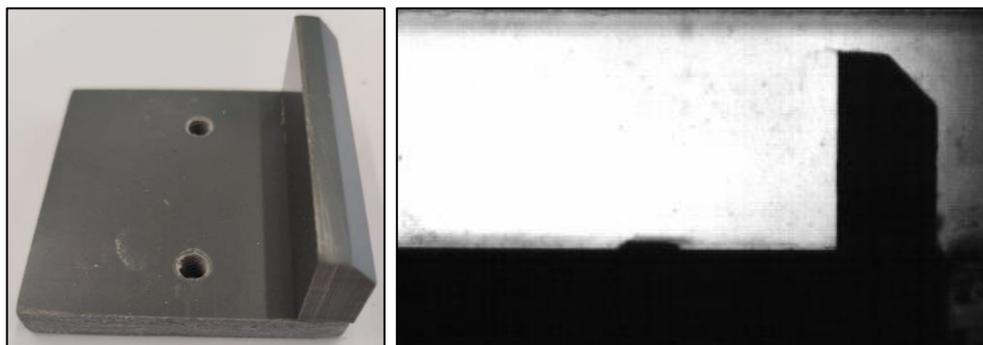


Figura 14. Geometría N°7 y vista lateral desde la cámara.

Geometría N°8. Prisma piramidal II.

La geometría N°8 consiste en una pieza con perfil triangular (en forma de doble agua)

en su parte superior, con 15 mm de altura en su parte más alta y 10 mm de altura en su parte más baja (Figura 15).

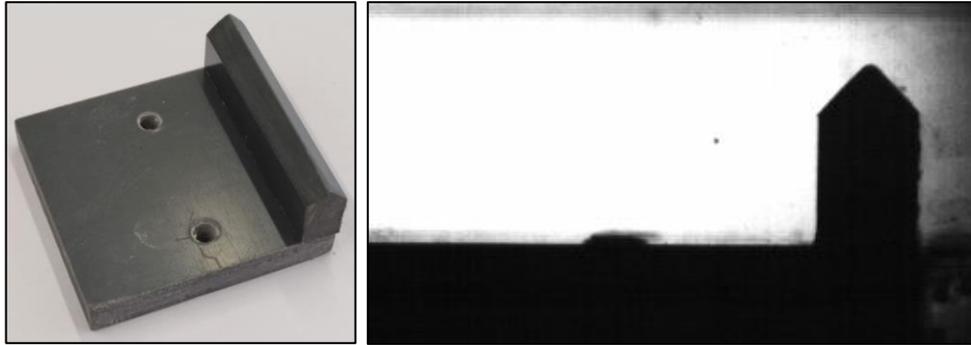


Figura 15. Geometría N°8 y vista lateral desde la cámara.

Geometría N°9. Prisma elipsoidal.

Para la geometría N°9 se fabricó una pieza con perfil elipsoidal en su parte superior (cantos suaves), con 14 mm de altura en su parte más alta y 12 mm de altura en su parte más baja (Figura 16).

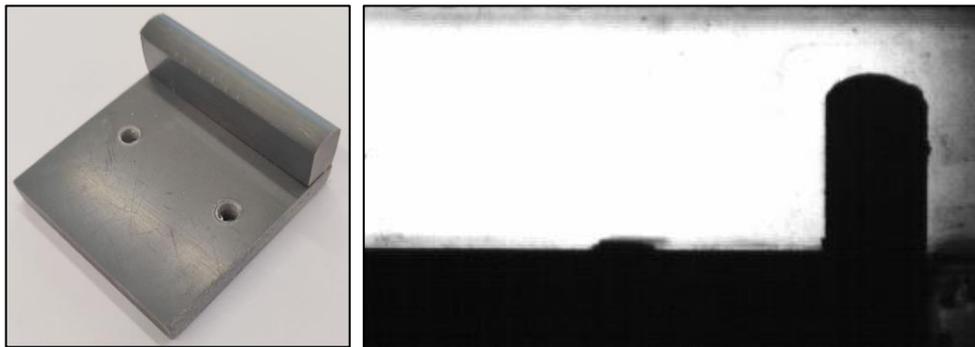


Figura 16. Geometría N°9 y vista lateral desde la cámara.

En la Tabla 1, se presentan los datos geométricos más representativos para las diferentes geometrías:

Geometría N.º	Descripción	Altura de paso h (mm)	Área de paso del flujo (mm ²)
1	Prisma rectangular de cantos vivos “geometría caso base”.	5	2.5×10^{-4}
4	Prisma piramidal I (en forma de cuchilla) con su parte inclinada en la zona de expansión del flujo.	5	2.5×10^{-4}
5	Prisma piramidal I (en forma de cuchilla) su parte inclinada en la zona de contracción del flujo.	5	2.5×10^{-4}
6	Prisma trapezoidal con su parte inclinada en la zona de expansión de flujo.	4	2.0×10^{-4}
7	Prisma trapezoidal con su parte inclinada en la zona de contracción de flujo.	4	2.0×10^{-4}
8	Prisma piramidal II con un perfil en forma de doble agua.	5	2.5×10^{-4}
9	Prisma elipsoidal (cantos limados y redondeados en su parte superior).	6	3.0×10^{-4}

Tabla 1. Características geométricas de los obstáculos estudiados.

3.3. Características de la cámara de alta velocidad, lentes y la iluminación.

Para la captura de las imágenes se empleó una cámara de alta velocidad marca Redlake, modelo MotionPro HS-4. Esta cámara es capaz de adquirir imágenes a muy altas frecuencias (número de cuadros capturados por segundo), pudiendo capturar más de 5000 cuadros por segundo con una resolución máxima de 512 x 512 píxeles.



Figura 17. Cámara de alta velocidad.

A la cámara se le acopló un zoom de gran diámetro, apto para las cámaras digitales de ultra alta definición, de marca SIGMA, modelo 24-70 mm F2.8 DG. Esta lente ha sido diseñada para minimizar puntos de luz, la distorsión en la imagen y la aberración cromática transversal, lo que garantiza una mayor calidad de imagen.

La lente tiene un diámetro de filtro de 82 mm y una ampliación máxima de 1:2.8, y es

adecuada para cámaras full-frame (DG).



Figura 18. Objetivo de la cámara.

Tras una serie de pruebas se optó por un arreglo a contraluz (se colocó la cámara al lado opuesto del foco de luz) en el plano horizontal, en ángulo recto con respecto a la zona de pruebas donde se pudieran captar los fenómenos de interés con la mayor nitidez.

Para determinar el tiempo de exposición, que es el tiempo que el obturador de la cámara permite el paso de la luz y por tanto el tiempo en que está capturando el fotograma, se realizaron los cálculos pertinentes que permitieron la decisión de este parámetro. En el Apartado 3.4 se muestran los resultados.

Los primeros ensayos se realizaron inicialmente con un foco LED de 30 W con una potencia de iluminación de 2100 lúmenes, pero debido al tiempo de exposición seleccionado, se observó la necesidad de una fuente de luz más intensa para satisfacer el tiempo de exposición de la cámara; así, éste se reemplazó por un foco halógeno de 300 W con una potencia de iluminación de 8600 lúmenes.



Figura 19. Foco LED marca inspire y Foco halógeno marca Massive.

Para mejorar la iluminación a lo largo de toda la zona bajo estudio, y evitar la alta concentración de luz en el centro de la imagen (complicando su posterior análisis), se difundió la luz colocando un folio blanco delante del propio foco.

3.4. Criterios para la captura de las imágenes.

Los principales criterios establecidos para la toma de las imágenes han sido el tiempo de exposición de la cámara y la frecuencia de adquisición de las imágenes.

3.4.1. El tiempo de exposición de imágenes.

Para el *caso base*, las condiciones experimentales se seleccionaron de forma que la visualización fuera adecuada al simple ojo humano. Estas condiciones se consiguieron con un caudal de $11 \text{ m}^3/h$, que coincide con una frecuencia de 30 Hz en el variador de frecuencia VLT. La altura (H) de la geometría N°1 (*caso base*) ha sido de $H = 0.015 \text{ m}$, lo que resulta en un *área de paso del flujo* de $A = 0.00025 \text{ m}^2$ (Tabla 1). Con estos datos se determinó la velocidad media del flujo, considerando que las microburbujas serán arrastradas a la misma velocidad.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{11.00}{0.00025} = 12.2 \text{ m/s}$$

(Ec. 15)

El software de la cámara permite un tiempo mínimo de exposición de $10 \mu\text{s}$. En ese tiempo y con ese caudal las burbujas se calcula un desplazamiento de $122.2 \mu\text{m}$; al ser esta distancia relativamente pequeña en comparación con campo visual de la imagen a analizar (70 mm), se considera que el desplazamiento individual de las burbujas no quedará reflejado en las imágenes de forma apreciable, lo que de otra forma daría lugar a aberraciones en las imágenes.

3.4.2. Frecuencia de adquisición de imágenes.

La frecuencia de adquisición de las imágenes se ha determinado considerando la necesidad de dar seguimiento a las estructuras de vorticidad que se desprenden de los obstáculos, y que se especula que están asociados a las nubes de burbujas (Apartado 2.2).

Partiendo de la idea de que las nubes de burbujas están asociadas a las estructuras de vorticidad desprendidas, como primera aproximación se hizo uso del número de Strouhal. El número de Strouhal (S_H) es un parámetro adimensional que caracteriza las escalas temporales del flujo, como en el caso de las estructuras organizadas y periódicas que se producen de forma natural (vórtices o torbellinos) [23,24]. Si la concentración de burbujas fuera arrastrada por estas estructuras, se esperaría que este parámetro fuera la conexión entre ambos fenómenos (desprendimiento y concentración).

Levi [25] propuso que en flujos turbulentos el número de Strouhal presenta un valor “universal” igual a $1/2\pi$, en función de la selección “adecuada” de la longitud característica; esto es:

$$S_H = \frac{f_v \cdot d}{U} = \frac{1}{2\pi}$$

(Ec. 16)

siendo f_v la frecuencia de desprendimiento de vórtices, d la longitud característica y U la velocidad media del flujo. Parte de esta deducción la extrajo del trabajo realizado por Crow y Champagne [23], en el que analizan el desprendimiento de vórtices de un “chorro libre”, y en el que consideran el radio de la tobera como longitud característica.

Para el presente estudio, al tratarse de un flujo bidimensional y ante la falta de datos en la bibliografía especializada, he considerado como longitud característica la altura de paso de flujo, h (Tabla 1), lo que equivaldría a: $h = 2d$ en el trabajo de Crow y Champagne. De esta forma, para el *caso base* se obtiene:

$$S_H = \frac{f_v \cdot 2d}{U} = \frac{f_v \cdot h}{U} = \frac{1}{\pi} = 0.3183$$

(Ec. 17)

Con esta primera aproximación, y con la velocidad del flujo en el *caso base*, se obtiene la primera aproximación a la *frecuencia natural de desprendimiento de vórtices* del flujo, de acuerdo con:

$$f_v = \frac{S_H \cdot U}{h} = \frac{0.3183 \times 12.2 \text{ (m/s)}}{0.005 \text{ (m)}} = 778\text{Hz}$$

(Ec. 18)

Con este resultado se determinó la frecuencia de muestreo siguiendo el criterio de Nyquist-Shannon, que indica la necesidad de al menos 2 muestras de la señal por periodo, para su correcto muestreo. Por acuerdo, se estipularon, al menos, 6 muestras por cada periodo (el periodo lo determinó la presencia de vórtices). Así se determinó una frecuencia de adquisición de las imágenes, f_a , de

$$f_a = 780 \left(\frac{\text{vórtices}}{s} \right) \cdot 6 \left(\frac{\text{muestras}}{\text{vórtice}} \right) = 4680 \left(\frac{\text{muestras}}{s} \right)$$

(Ec. 19)

De esta manera, la decisión final fue la de muestrear a 5 kHz, aprovechando al máximo la capacidad de la cámara y satisfaciendo el criterio de Nyquist-Shannon.

3.5. Descripción de la Metodología de Análisis de Imágenes. Caso base.

El análisis de imágenes se ha realizado mediante el programa de dominio público Fiji-ImageJ (ANEXO A).

Siguiendo las experiencias de Loriente [14], previamente a la extracción de la información de cada fotograma, cada imagen debe prepararse de forma que los defectos ocasionados por el fondo y las zonas de menor iluminación se minimicen. Después de este precondicionamiento, se continúa el procesado de las imágenes con el propio Fiji-ImageJ. Los datos obtenidos se recogieron y se vaciaron en hojas de cálculo Excel para su posterior manipulación y análisis.

3.5.1. Procedimiento previo. Acondicionamiento de las imágenes.

Mediante este procedimiento, previo a la extracción de la información de interés, se logra que los valores en la escala de grises sean debidos únicamente a la presencia de burbujas (que sirvieron como trazadores). La eliminación del fondo fue uno de los procedimientos más críticos para aumentar el grado de fiabilidad de los resultados presentados en esta memoria [14].

Inicialmente se obtuvieron imágenes de “fondo” para cada geometría. Primero se aseguraron condiciones de “no cavitación” en la instalación, de forma que fuera posible obtener una imagen clara del obstáculo en el canal (Figura 20.a). Después, bajo condiciones de cavitación (Figura 20.b), ya se procedió a restar el fondo para todos y cada uno de los fotogramas para todo caso de estudio.

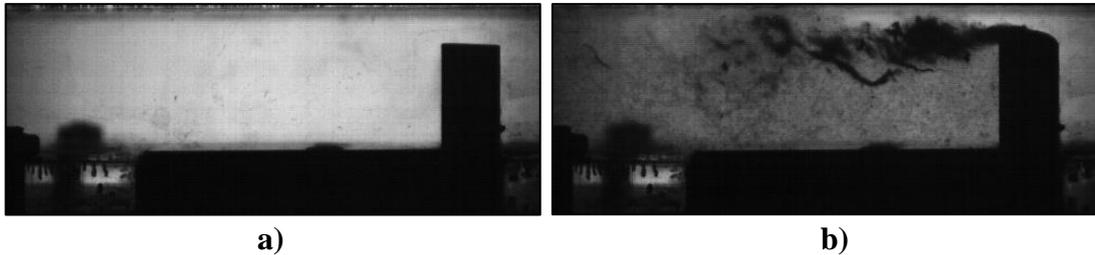


Figura 20. a) Imagen de fondo; b) Imagen con cavitación.

Para realizar esta tarea, se comenzó por invertir el LUT (Look Up Table), lo cual transforma el color de la imagen de origen en otro diferente. Al estar la imagen en escala de grises, es posible invertir todas las tonalidades, dando como resultado que las burbujas se observen en color blanco (valor en escala de grises: 255) y el resto de imagen en gama de grises incluyendo el negro (valor en escala de grises: 0). En la Figura 21.a se muestra la transformación de color.

Después, mediante la herramienta de procesamiento “Image Expresión Parser” fue posible restar la “imagen de fondo” a la serie de imágenes de interés (fotograma a fotograma).

Tras ello, se procedió a la homogeneización de los colores de fondo de la imagen, ya que, al observar el obstáculo en la imagen tratada, éste se encontraba en tonalidad de grises y no en color negro (Figura 21.a). Para corregirlo, primero se obtuvo el valor de la intensidad media en esa zona, después se sustrajo dicho valor a la imagen (Figura 21.b), y finalmente, se ajustaron los niveles de brillo y contraste (Figura 21.c). El valor de intensidad media sustraído fue 90 y en el ajuste de brillo y contraste se redujo el máximo hasta 165.

Todas las imágenes han sido capturadas bajo las mismas condiciones experimentales (nivel de iluminación, temperatura, distancia focal, apertura del diafragma, ...), independientemente del obstáculo. Así, además de obtener la evolución espacial de la concentración de burbujas con un alto grado de confianza para cada caso de estudio, fue posible la comparación directa entre las diferentes geometrías.

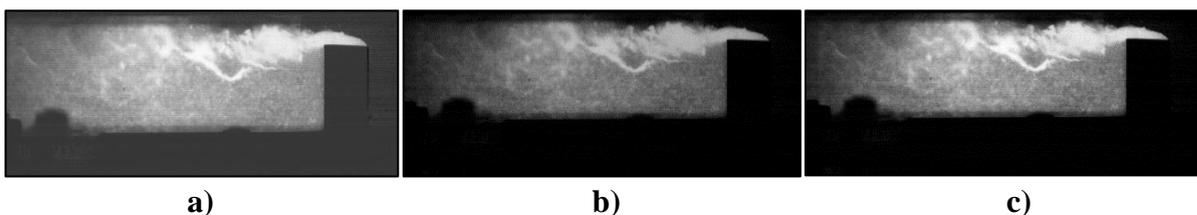


Figura 21. a) Imagen sin fondo; b) Imagen restada la intensidad media; c) Imagen ajustada en brillo y contraste.

Una vez arregladas todas las imágenes se procedió a extraer, para cada fotograma, un perfil en escala de grises por píxeles. Este perfil ayudó a cuantificar “la densidad de burbujas” que aparecen en cada cuadro, dentro de la región de interés (ROI: Region Of Interest) seleccionada. El criterio ha sido: cuanto más blanco haya en la escala de grises para cada píxel, mayor número de burbujas habrá en ese determinado píxel de la ROI.

En la Figura 22.a se presenta una ROI seleccionada arbitrariamente, a modo de ejemplo, y en la Figura 22.b se muestra el perfil en *escala de grises por píxel* de esa región.

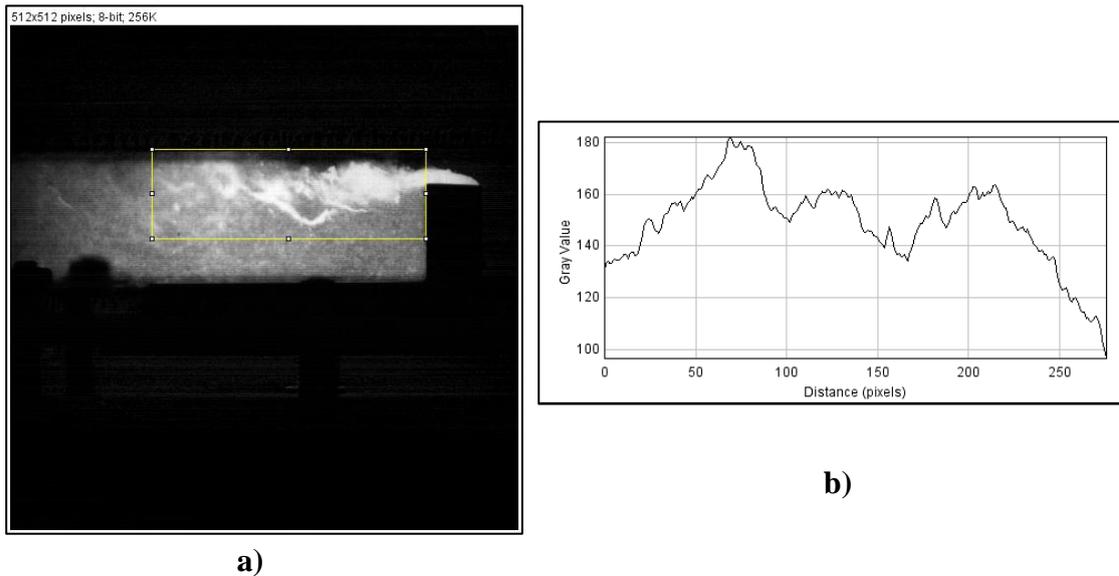


Figura 22. a) ROI; b) Extracción de la información en escala de grises por píxel.

Con el perfil de la escala de grises, y con la herramienta “Analysis Measurement” se calcularon las propiedades de una región de interés seleccionada (Figura 23). De esta forma en cada ROI es posible obtener el área bajo la curva, extraída previamente de cada fotograma (frame), y permitiendo hacerse una idea de la concentración de burbujas dentro de las diferentes zonas de estudio: a) de los 400 fotogramas de una sola ROI se extraen los comportamientos temporales, y b) los promedios aritméticos de los 400 fotogramas permiten el análisis de la evolución espacial al hacerlo para cada ROI.

El procedimiento de obtención de áreas quedó automatizado mediante una secuencia de comandos programados en el lenguaje propio del programa (IJ1). Esta secuencia fue personalmente desarrollada para este estudio específico. El código, que ahorró mucho tiempo para el pos-procesado, se encuentra en el ANEXO A.

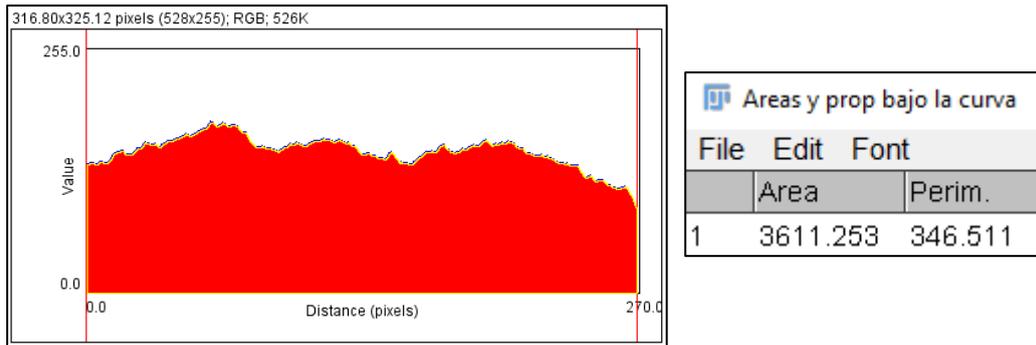


Figura 23. Área bajo la curva en la ROI.

Finalmente, cabe mencionar que se escogieron 9 ROI's para dar seguimiento al campo de flujo en donde las concentraciones de burbujas aún eran visibles (Figura 24). La primera se seleccionó exactamente encima del obstáculo, en el punto donde comienza a generarse las burbujas (*penacho*). Se escogió rectangular, con su largura igual al espesor del PVC (8 mm) y de altura igual a la de la zona de paso del flujo (5 mm). Sabiendo que cada imagen se capturó con una resolución de 512 x 512 *pixeles* (Apartado 3.3), ha sido posible calcular las medidas de la ROI en pixeles. Así, la primera ROI tiene una largura de 56 *pixeles* y una altura de 35 *pixeles*. (1 mm equivale a 7 *pixeles*).

Las siguientes regiones de interés (ROI2-ROI9) se escogieron cuadradas, empleando la altura de paso como parámetro característico ($h = 5 \text{ mm}$, para el *caso base*).

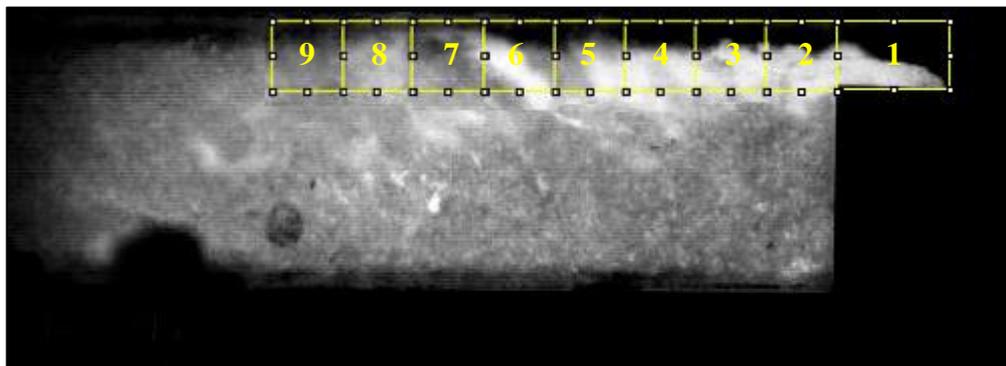


Figura 24. Regiones de interés (ROI's) seleccionadas durante el proyecto.

Al visionar las secuencias de imágenes obtenidas, las 6 primeras ROI escogidas (Figura 24) parecen mantener la información de las estructuras de vorticidad desprendidas y que fueron el objetivo principal para los fines que se persiguieron durante el presente proyecto. Por ello, la selección del número de regiones de interés, a lo largo del campo de flujo, se basó en la distancia en la cual las nubes de burbujas eran visibles en las imágenes adquiridas (Figura 24). Esta distancia resultó ser de entre 25 y 35 mm para el *caso base*, lo que indica una relación de: $x/h \approx 5.0 - 7.0$, siendo x la coordenada axial. Estos resultados plausiblemente coinciden con los resultados reportados por Crow y Champagne [23] y Cerecedo [24] en donde las estructuras coherentes son aún visibles. De esta manera: 1) se confirma como adecuada la altura de la zona de mínimo paso del flujo, h , como longitud característica, y 2) se decidió extender la zona de estudio hasta $x/h \sim 8$ (ROI 9), en donde todavía se observa la pervivencia de algunas

nubes de burbujas (Figura 24).

3.6. Conclusiones parciales de capítulo.

A través de una instalación experimental, diseñada y construida ex profeso, se ofrece la posibilidad de realizar estudios sobre la cavitación hidrodinámica a través de técnicas ópticas de medida, gracias a su buen acceso óptico. Esto posibilita un mejor seguimiento de las estructuras de concentración de burbujas. La correcta manipulación previa de las imágenes adquiridas, hacen que la técnica de análisis de imágenes permita dar las primeras impresiones sobre la fenomenología, a través de la concentración de burbujas acopladas a los vórtices (estructuras coherentes).

Para detallar el análisis se cuenta con una cámara de alta velocidad y una lente de alto rendimiento. Sus prestaciones han permitido la adquisición de imágenes con las que se espera dar seguimiento a la concentración de burbujas y su evolución espacial a través de la selección de varias regiones de interés (ROI) dentro del campo de flujo.

Asentados los criterios principales para las condiciones adecuadas para la captura de las imágenes (e.g. frecuencia de adquisición y tiempo de exposición) se ha procedido a realizar las primeras experiencias para, posteriormente, preparar las imágenes para su estudio. Uno de los retos consistió en determinar el mejor procedimiento para eliminar cualquier ruido de fondo que pudiera desviar los resultados. Las primeras pruebas conllevaron a una serie de pasos previos dentro de los que se homogeneizó el fondo y se regularon su brillo y su contraste.

Aprovechando la versatilidad del programa de análisis de imágenes, el estudio se puede realizar por regiones de interés (ROI) escogidas en función de las necesidades del proyecto y dentro del campo de flujo de interés (campo de visionado de las nubes de burbujas).

Para cumplir los objetivos, se obtuvieron los perfiles de la *escala de grises por pixel* para cada ROI. Con estos perfiles, considerados como indicativos de la concentración de burbujas en un instante determinado y para una región de interés fue posible aproximar la concentración de burbujas. Al dato trascendente ha sido el área bajo la curva de los mencionados perfiles de la escala de grises, considerando que cuanto menor sea este valor de área, menor será la concentración de burbujas en la región de interés para un instante determinado.

Finalmente, cabe comentar que el proceso de obtención de áreas se ha automatizado mediante una secuencia de comandos programados en el lenguaje propio del programa (IJ1), y desarrollado específicamente para este proyecto. Esta secuencia de comandos agilizó el cálculo repetitivo. Dicha secuencia de comandos se encuentra en el ANEXO A.

4. RESULTADOS DE LA CAVITACIÓN HIDRODINAMICA.

A lo largo del Capítulo 4 se presentan los resultados más importantes extraídos del análisis de las imágenes para las diferentes las geometrías bajo estudio.

Todo el proceso de análisis de imagen se ha realizado mediante el programa Fiji-ImageJ de distribución gratuita. Los datos numéricos han sido posteriormente trasladados a una serie de hojas de cálculo Excel, a partir de las cuales se ha procedido a su posterior análisis a través de numerosas gráficas. De esta forma, se ha podido conjeturar el comportamiento de la evolución espacial de las burbujas y su asociación con los vórtices desprendidos.

Los resultados del *caso base* (prisma rectangular), se emplean como referencia para describir los distintos comportamientos de las nubes de burbujas para otras geometrías de interés.

4.1. Evolución espacial de la concentración de burbujas por el método de la escala de grises para el caso base.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para la “*geometría caso base*” y se muestran diversos comportamientos que permiten sentar las condiciones experimentales y el punto de referencia para el resto de las geometrías estudiadas.

4.1.1. Cambios hidrodinámicos de las condiciones experimentales.

Los primeros experimentos han consistido en variar el caudal para observar los cambios que se producen: la concentración de burbujas y su distribución espacial en función de la velocidad media del flujo.

A pesar de que la inepción de la cavitación se observa entorno a los $8 \text{ m}^3/\text{h}$ (resultados no reportados en esta memoria), los caudales seleccionados para la realización de esta etapa se escogieron con base en el caudal de $11 \text{ m}^3/\text{h}$, que fue un caudal adecuado para realizar la visualización de las estructuras, y que aseguró la integridad de la instalación experimental de metacrilato. De esta forma, los caudales seleccionados han sido: 9.80 , 10.50 y $11 \text{ m}^3/\text{h}$. (Por debajo del caudal $9.8 \text{ m}^3/\text{h}$ fue difícil realizar el análisis de las imágenes debido a la escasez de burbujas que han servido como trazadoras).

Los resultados obtenidos, a través de las áreas de las curvas *escala de grises x pixeles*, se presentan para el total de los 400 fotogramas adquiridos para cada región de interés (ROI).

Cabe mencionar que, con base en la frecuencia de adquisición de la cámara, cada fotograma, a su vez, contiene la información de la evolución temporal de la estructura de vorticidad (que se esperan puedan ser asociadas con las nubes de burbujas), pues cada uno fue adquirido cada:

$$t_{\text{fotograma}} = \frac{1}{f_a} = \frac{1}{5 \times 10^3} = 2 \mu\text{s}$$

(Ec. 20)

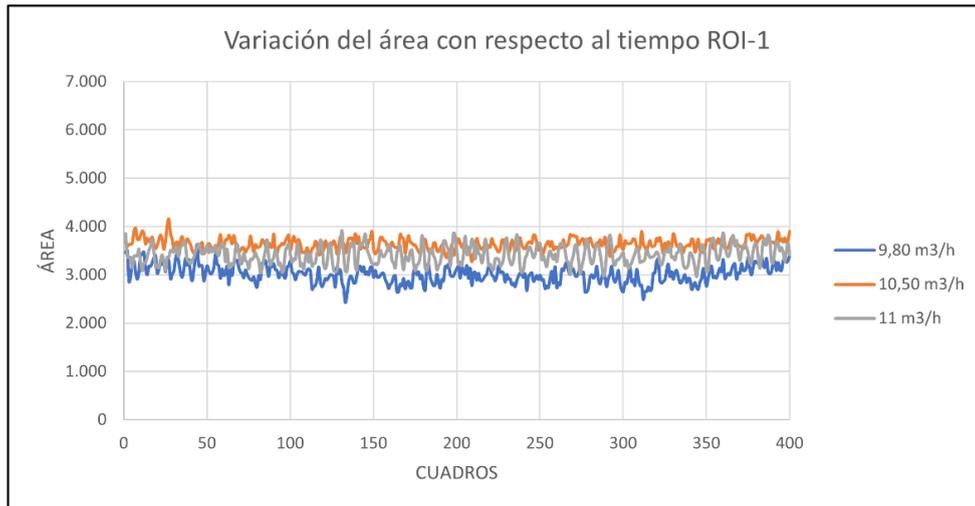


Figura 25. Variación de área en la geometría caso base ROI-1.

De esta manera, como muestran las oscilaciones de los datos en la Figura 25, es posible, además, deducir el comportamiento temporal del fenómeno. Por ejemplo, en la primera ROI-1 (Figura 25) se puede deducir el comportamiento del penacho de burbujas por encima del obstáculo (ver Figura 29 más abajo), ya que los fenómenos no estacionarios están completamente ligados al desprendimiento de vórtices en la esquina del obstáculo y a la dinámica individual y colectiva de las burbujas. Dada la pequeña región de esta zona de desprendimiento, se puede observar que la concentración de burbujas tiene una forma similar y cuasi-constante para los tres caudales estudiados. Como dato de referencia, la concentración media es de aproximadamente 3700 (escala de grises por pixel) para $11 \text{ m}^3/\text{h}$ y $10.50 \text{ m}^3/\text{h}$, y ligeramente inferior, de 3100 ($\sim 17\%$ de variación), para el caso $9.80 \text{ m}^3/\text{h}$. Esta variación de la concentración media de burbujas es del mismo orden que la variación en el valor del caudal.

En la Figura 26 se presentan las variaciones de las áreas de los 400 fotogramas para las restantes ROI's del caso base. En todas las gráficas se aprecian las oscilaciones de los datos, lo que confirma el estado no estacionario del desprendimiento de vórtices, su evolución espacial, y la asociación con la propia dinámica de las burbujas.



Figura 26. Evolución espacial de la concentración de burbujas. **a)** ROI-2; **b)** ROI-3; **c)** ROI-4; **d)** ROI-5; **e)** ROI-6; **f)** ROI-7; **g)** ROI-8; **h)** ROI-9.

También es posible observar en la Figura 26, cómo, conforme evolucionan las concentraciones de burbujas, las oscilaciones de los datos inicialmente crecen (mayor diferencia entre los picos y los valles) en las primeras regiones del flujo, alcanzan un punto máximo (en la ROI-5), y posteriormente disminuyen. Este comportamiento es similar al desarrollo del propio vórtice desprendido (Crow y Champagne [23]): su aumento en amplitud y su posterior transformación a estructuras más pequeñas. En la

Tabla 2 se presentan los resultados del valor promedio (de los 400 fotogramas) de las áreas, para cada caudal estudiado.

ROI	Área (Q=9.80 m ³ /h)	Área (Q=10.5 m ³ /h)	Área (Q=11.0 m ³ /h)
1	3100	3700	3700
2	750	2100	3900
3	200	1200	4500
4	200	900	4500
5	200	500	4500
6	200	500	4500
7	500	500	4000
8	600	600	3500
9	600	600	3000

Tabla 2. Datos de las áreas, escala de grises por pixel, para cada una de las ROI's del caso base.

Por curiosidad personal, y dada la experiencia sobre el análisis de señales adquirida durante mi formación profesional, se realizó la transformada rápida de Fourier (FFT) sobre los 400 fotogramas y para todas las regiones de interés estudiadas. Para este ejercicio, se tuvo en cuenta que cada fotograma ha sido adquirido en un espacio de tiempo de $2\mu\text{s}$, tal y como se ha calculado anteriormente (Ec.20).

Como aclaración, únicamente las muestras para el caso del caudal de $11\text{ m}^3/\text{h}$ han mostrado resultados interpretables. Esto pudo haberse debido a la poca cantidad de burbujas trazadoras en los otros dos casos de estudio, y por lo tanto a la baja resolución de cada fotograma.

Como se indica en la bibliografía especializada, para aplicar la FFT es necesario hacerlo sobre un número de muestras que resulte de la función de potencia base dos: 2^n . Como se han adquirido 400 fotogramas (decisión previa del Grupo de Investigación), la FFT se ha calculado para dos grupos de datos: 256 muestras (cuadros) consecutivas y para 512 muestras. La FFT de 512 muestras ha sido posible empleando la técnica de “relleno por ceros”, por lo que los resultados para este caso incluyen los 400 cuadros totales adquiridos y 112 “ceros”.

En la Figura 27 se muestran los resultados para las distintas ROI.

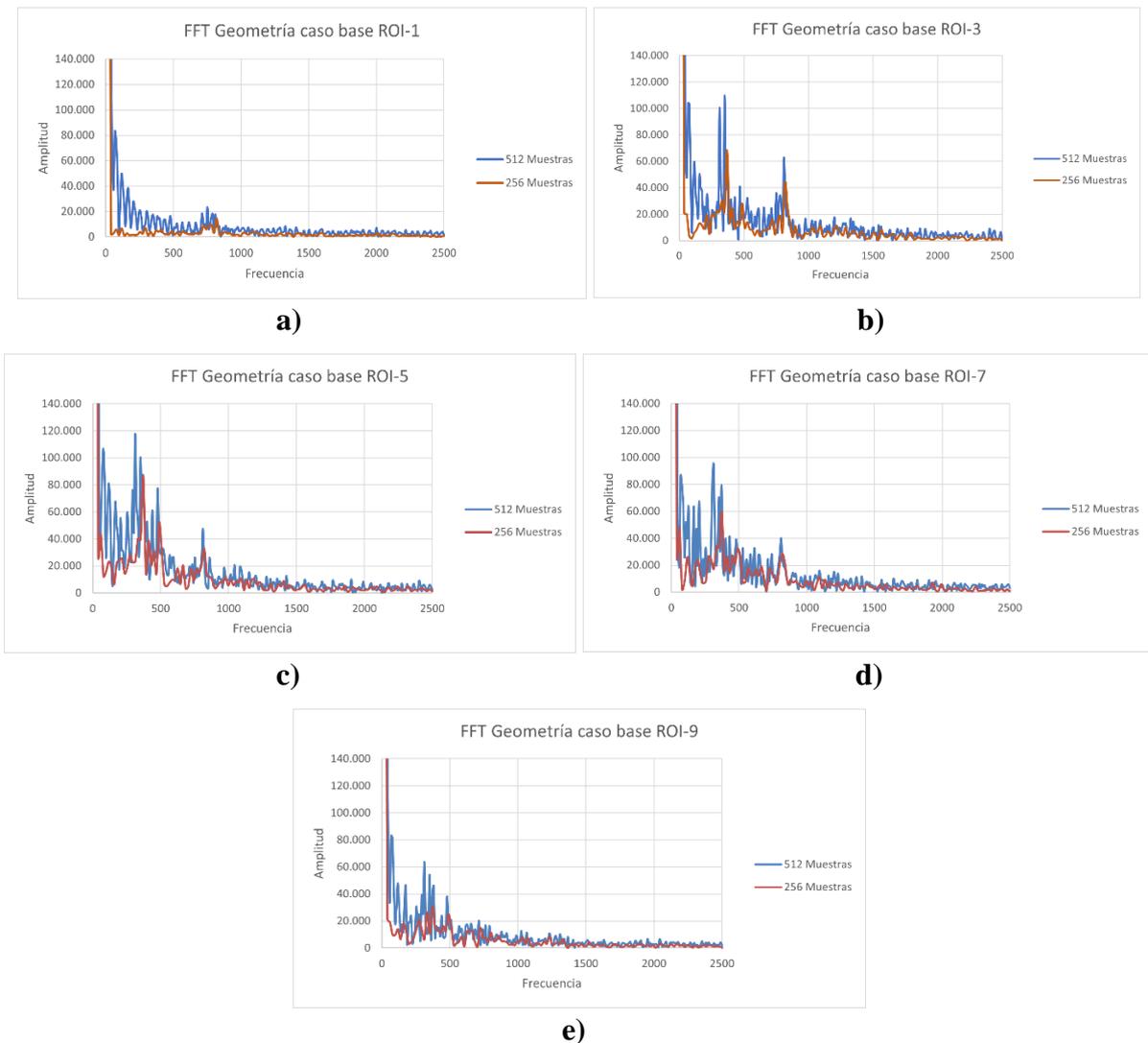


Figura 27. Transformada rápida de Fourier (FFT) para los 400 fotogramas. **a)** ROI-1; **b)** ROI-3; **c)** ROI-5; **d)** ROI-7; **e)** ROI-9.

Como se aprecia en la Figura 27, en la ROI-1 se puede identificar un rango de frecuencias de picos importantes; aunque la amplitud depende del número de muestras, el rango de frecuencias en las que se presentan es muy similar (712 – 820 Hz) para 512 y 256 muestras. Esto plausiblemente coincide con la frecuencia de desprendimiento de vórtices, f_v , calculada a través de número de Strouhal (Apartado 3.4.2, Ec.18), por lo que ésta se considerará como *la frecuencia fundamental* del fenómeno. También se aprecia que hasta la ROI-5 este pico en la frecuencia fundamental aumenta, y posteriormente disminuye hasta desaparecer (Figura 27.e), coincidiendo con el comportamiento de la amplitud de las oscilaciones de los datos obtenidos en el apartado anterior (Apartado 4.1.1, Figura 26.d).

Otro comportamiento interesante, que se aprecia en la Figura 27, es que conforme se avanza espacialmente en el campo de flujo (mayor número de ROI), en la FFT empieza a destacar un pico en un rango menor de frecuencias (300 – 400 Hz) que el observado inicialmente en la ROI-1. Este pico (que coincide con la mitad de la frecuencia fundamental) se interpreta a través de la propia evolución espacial de las estructuras las nubes de burbujas, que está condicionadas por la propia dinámica de la burbuja

(individual y colectiva) Finalmente, este pico, ubicado en el rango de las frecuencias subarmónicas, decrece, indicando la posible desaparición y o dispersión de las burbujas que inicialmente constituían la estructura.

4.1.2. Evolución espacial de la concentración de burbujas.

A partir del análisis de frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier, realizado en el apartado anterior, se ha podido observar la presencia de picos en rangos de frecuencias asociadas a las estructuras de vorticidad (se observa una estrecha coincidencia con la frecuencia de desprendimiento de vórtices). De esta forma, a lo largo de este apartado se va a proceder al análisis de los datos de área, obtenidos de las curvas de *escala de grises por pixel* (Figura 22) para el caso de caudal de $11 \text{ m}^3/\text{h}$, que fue el caso que mejor permitió observar el comportamiento de las nubes de burbujas a lo largo del campo de flujo.

La primera idea desarrollada se basa en intentar extraer la información sobre la propia estructura de vorticidad desprendida del obstáculo. Inicialmente se parte de la idea de que la estructura de vorticidad presenta las condiciones (intensidad) adecuadas para alcanzar la presión de vapor (Aparatado 2.2), entonces aquellos fotogramas en donde la concentración de burbujas sea mayor estarán asociadas a la presencia del vórtice, obviando la posibilidad de que algunas hayan sido generadas en otro punto y transportadas por convección hasta el fotograma en cuestión. Esta idea sería similar a la de “congelar” la estructura haciendo medidas “condicionadas” [24].

Para determinar el criterio del “condicionamiento” de los fotogramas, se parte de las frecuencias de adquisición de las imágenes ($f_a = 5000 \text{ Hz}$) y de generación de vórtices, f_v . Ésta última se ha seleccionado a partir del armónico fundamental observado en las FFT (Apartado 4.1.1, Figura 27). Así, el criterio del “condicionamiento” de los fotogramas (para el caso $11 \text{ m}^3/\text{h}$) se calculó como:

$$\frac{f_a}{f_v} = \frac{5000}{820} = 6.0975 \approx 6 \text{ cuadros}$$

(Ec. 21)

Sabiendo que cada 6 cuadros, aproximadamente, se captaría el desprendimiento de un vórtice, se ha procedido a calcular los valores mínimo, máximo, y la media aritmética para cuadros alternados: cada 6 fotogramas. En concreto, se ha calculado la evolución de la densidad de partículas según el criterio del número de fotograma: (0-5-11-...,1-6-12-...,2-7-13-...,3-8-14-...,4-9-15-...), hasta completar los 400 fotogramas adquiridos. Los valores numéricos *ínfimo* (MIN), y *supremo* (MAX) de toda la secuencia de fotogramas, y la *media aritmética* de los 400 cuadros, se muestran en la Tabla 3.

	MIN	MEDIA ARITMETICA	MAX
ROI 1	2.955	3.406	3.911
ROI 2	2.388	3.628	4.888
ROI 3	2.182	4.135	6.005
ROI 4	1.941	4.151	6.446
ROI 5	1.968	4.511	6.935
ROI 6	1.771	4.362	6.659
ROI 7	1.958	3.968	6.499
ROI 8	2.038	3.552	5.433
ROI 9	1.759	3.071	4.857

Tabla 3. Valores numéricos, ínfimo, supremo y media aritmética, de las áreas obtenidas de los 400 fotogramas, para cada ROI.

Para mejor visualización de los datos, en la Figura 28 se muestran los valores del promedio aritmético de las áreas (*escala de grises por pixel*), Área, adimensionalizados con el valor inicial (valor de la ROI-1: $(\text{Área})_{ROI-1}$), para todas las regiones de interés del campo de flujo del *caso base*.

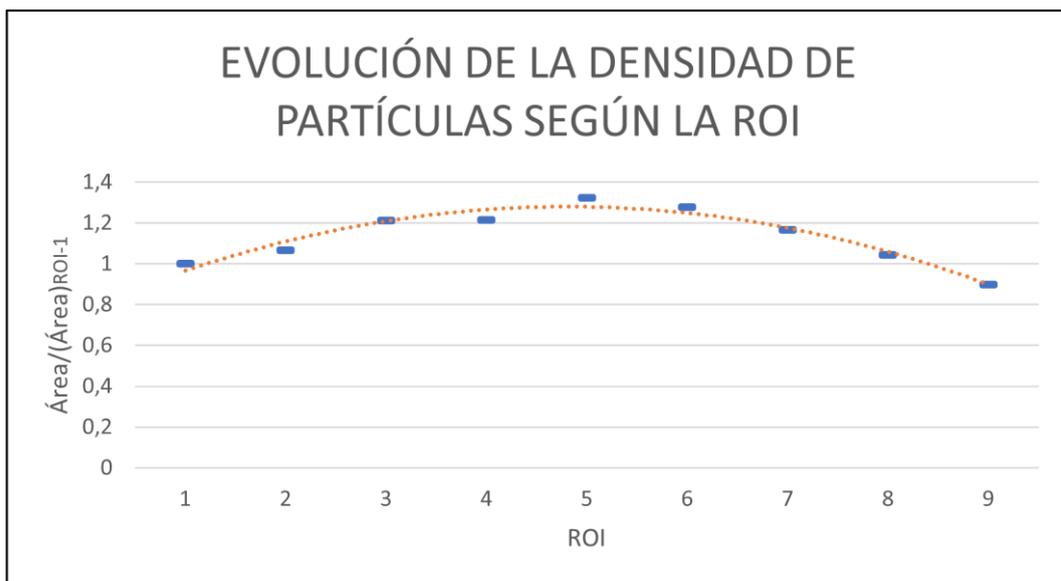


Figura 28. Evolución de la densidad de partículas para 400 cuadros consecutivos en la *geometría caso base*.

La curva que se describe a través de los resultados del área promedio para cada ROI muestra un comportamiento de aumento inicial, valor máximo y descenso suave. Continuando con la idea de que los vórtices desprendidos presentan las condiciones adecuadas para producir cavitación, es posible inferir que: 1) en la primera zona (ascenso suave) el vórtice desprendido del obstáculo presenta la intensidad adecuada como para generar burbujas; 2) las estructuras coherentes las arrastran consigo mismas durante su desarrollo espacial, y no se descarta que sus condiciones dinámicas promuevan el aumento en la concentración de burbujas en esta región del flujo; 3) se alcanza un máximo que coincide plausiblemente en la zona donde las oscilaciones (diferencia entre amplitud de picos y valles, Figura 26) de su frecuencia fundamental, f_v , también lo alcanzan; 4) una vez que el vórtice desprendido evoluciona a estructuras

más pequeñas, la concentración de burbujas disminuye, como un posible indicio de su desaparición.

Estos resultados obtenidos son muy interesantes, ya que permiten conocer un poco sobre el comportamiento de la concentración de burbujas a lo largo de la zona de estudio. Así, si la geometría escogida asegurase el desprendimiento de vórtices en una zona lo más estrecha posible (zonas cercanas a la propia contracción) y así mismo se garanticen las condiciones adecuadas para su rápida degeneración, se tendría como consecuencia una frecuencia mayor de presencia y desaparición de burbujas. Esto conllevaría a acortar los tiempos de pervivencia de las burbujas y sus posibles colapsos violentos, sin dar tiempo a otros posibles fenómenos como la coalescencia entre ellas.

4.1.3. Análisis de la totalidad del campo de flujo.

Con base en los resultados del apartado anterior, se ha considerado realizar un análisis más completo de la “*geometría caso base*”. Este análisis pretende fijar la atención en el campo de flujo detrás del propio obstáculo con la idea de estudiar el comportamiento de la estructura visionada detrás de este. Dicho análisis aumenta en 24 ROI's el análisis base presentado en el Apartado 4.1.2 (Figura 29). La primera ROI-1 se escoge coincidiendo con la geometría del obstáculo, tal y cual se ha mencionado (Apartado 3.5.1), mientras que las otras 32 mantuvieron su sección cuadrada. Teniendo en cuenta el parámetro característico ($h = 5\text{ mm}$), estas últimas midieron 35×35 pixeles (Figura 29).

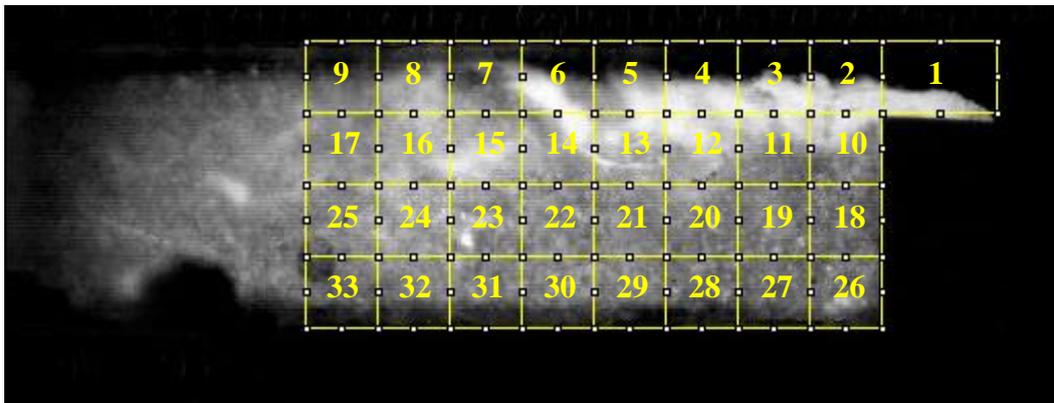


Figura 29. Regiones de interés (ROI's) para el análisis de la totalidad del campo de flujo.

En la Figura 30 se pueden ver, divididas por secciones transversales, la media aritmética de las concentraciones de burbujas (representadas por el área obtenida de las curvas *escala de grises por pixel*, Área). Para el eje de las abscisas, x , se ha considerado el centro geométrico de cada ROI seleccionada.

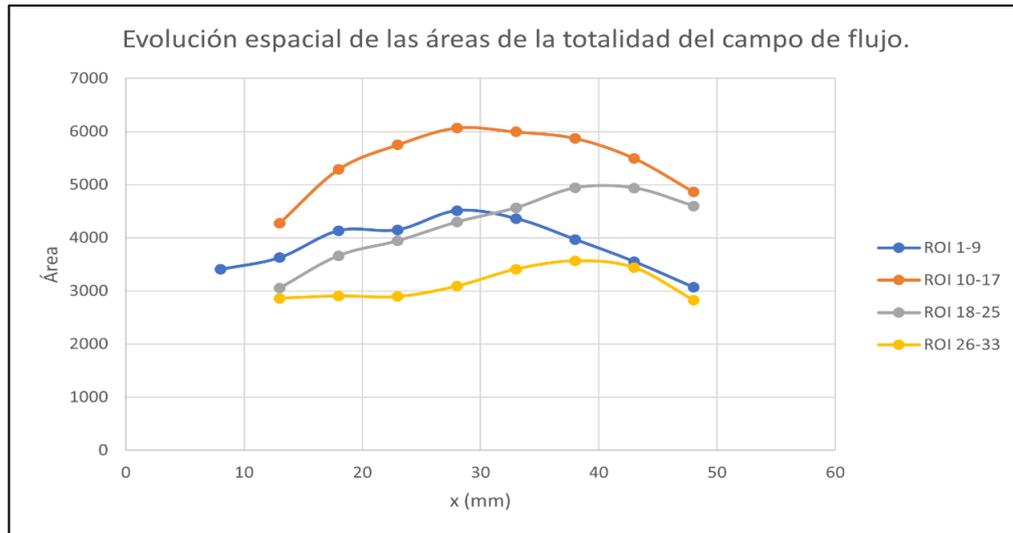


Figura 30. Evolución espacial de las áreas de las regiones de interés (ROI's) para el análisis de la totalidad del campo de flujo.

Las concentraciones promedio más elevadas de burbujas se observan en las ROI 1–5, ROI 10–17 y ROI 22–25. Sin embargo, es la segunda sección transversal (ROI 10-17) la que contiene una mayor concentración de burbujas, alcanzando su valor promedio máximo en la ROI 13. Este comportamiento puede explicarse teniendo en cuenta la evolución espacial de los vórtices desprendidos y la aportación de una gran estructura de vorticidad visionada detrás del obstáculo. Las estructuras desprendidas del obstáculo se desarrollan bidimensionalmente (en la coordenada axial al flujo y en la coordenada transversal, hacia la parte trasera del obstáculo), y tienen más espacio para crecer hacia abajo (y arrastra burbujas) que hacia arriba.

El flujo de recirculación por la presencia del obstáculo (a través de los vídeos, se observa que las líneas de corriente, trazadas por las burbujas de vapor, tienden a dirigirse hacia el obstáculo) parece favorecer del aumento en la concentración de burbujas en la zona ROI 10-17. Así, la mayor concentración de burbujas en el segundo plano horizontal bajo estudio está promovida por la propia evolución del penacho sobre el obstáculo (que experimenta mayor evolución hacia abajo - zona ROI 2-9) y por la convección de otras burbujas por recirculación.

Respecto a la zona ROI 18-25, se tiene una gran concentración al final producida por el arrastre de algunas burbujas desde la corriente principal y otras que podrían provenir de la recirculación detrás del obstáculo.

4.1.4. Selección de las condiciones experimentales para las demás geometrías.

A partir de todos los resultados presentados anteriormente se han determinado las condiciones experimentales para el estudio del resto de las geometrías.

Observando las gráficas que muestran la variación de área con respecto al tiempo (Figuras 25 y 26), se puede apreciar que para los caudales de 9.80 y $10.50 \text{ m}^3/\text{h}$ la concentración de burbujas disminuye drásticamente al avanzar la ROI, lo que imposibilita un estudio preciso de la evolución de las nubes de burbujas para estos casos. Debido a esta limitación en el número de burbujas (que sirven también como

trazadoras), se ha escogido como referencia el caso del caudal de $11 \text{ m}^3/h$, que permite una adecuada observación de los fenómenos acoplados y una mejor interpretación de los resultados.

4.2. Resultados sobre otras geometrías y análisis comparativo.

Se han analizado el resto de las geometrías (Apartado 3.2), obteniendo información referente a la distribución de la concentración de burbujas según las condiciones experimentales especificadas anteriormente. En todas las geometrías se ha estudiado la concentración de burbujas exclusivamente en la zona ROI 1-9. Los tamaños de las ROI se han obtenido empleando el mismo criterio que para la “*geometría caso base*”, por lo que sus dimensiones han variado ligeramente en cada caso dependiendo de la altura de paso, h , de cada geometría (Tabla 1).

De la misma forma que para el *caso base*, se han obtenido las evoluciones espaciales de la concentración de burbujas a partir de las áreas *escala de grises por pixel* para cada una de las geometrías. Así, todo el análisis comparativo entre las otras 6 geometrías bajo estudio se basa en la “*geometría caso base*”, ya explorada en los apartados anteriores.

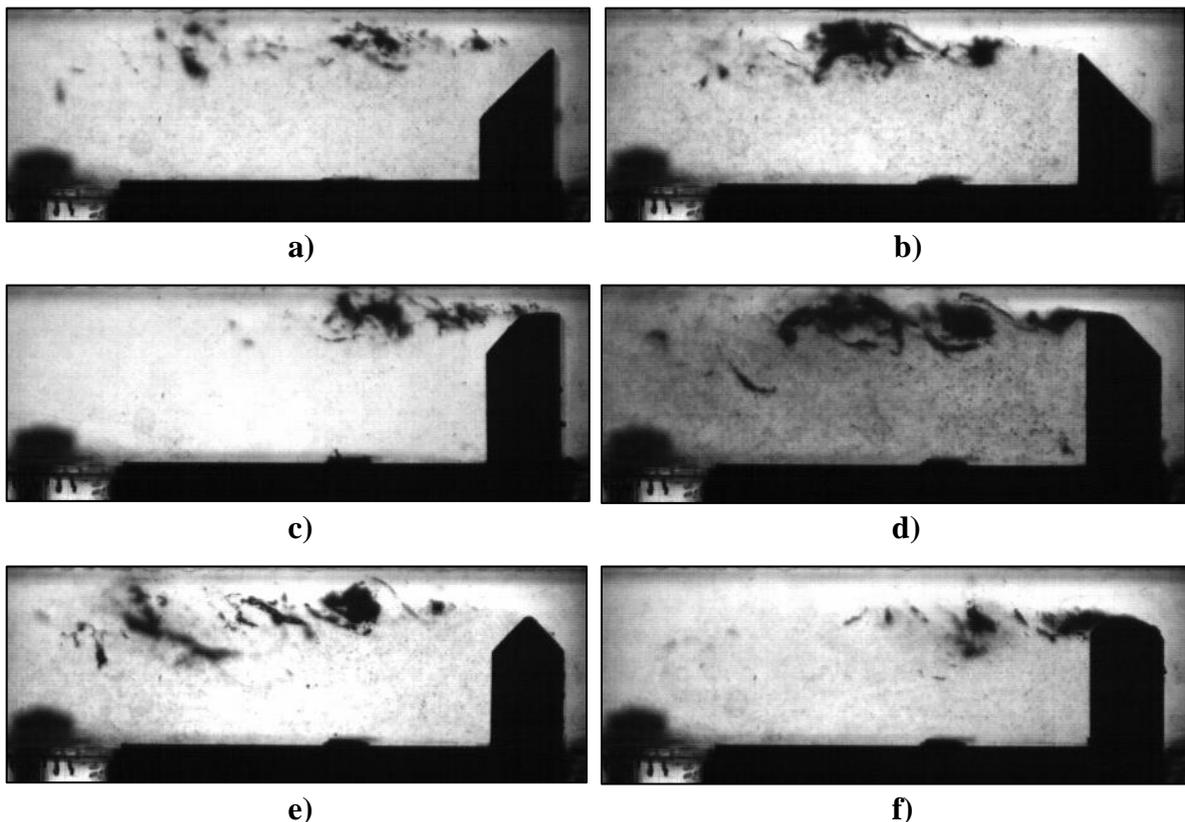
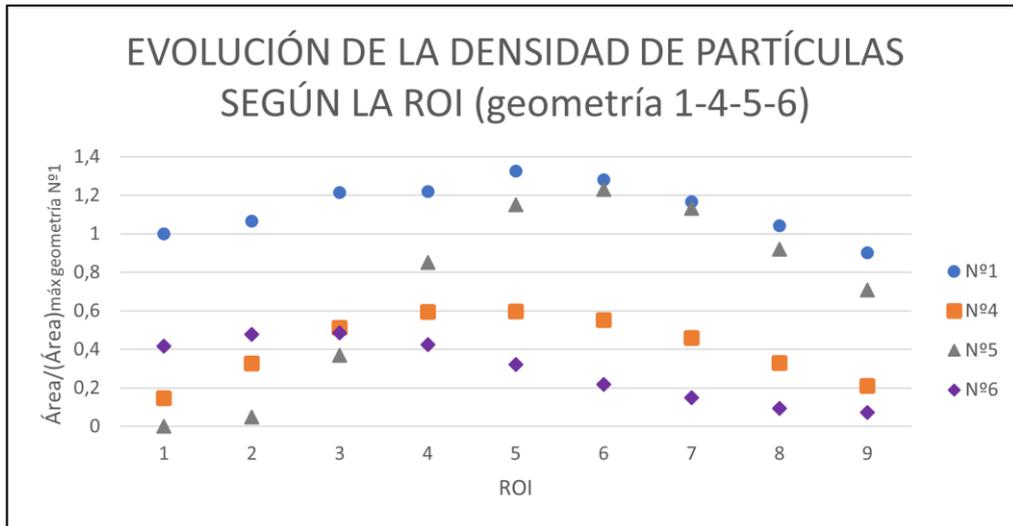
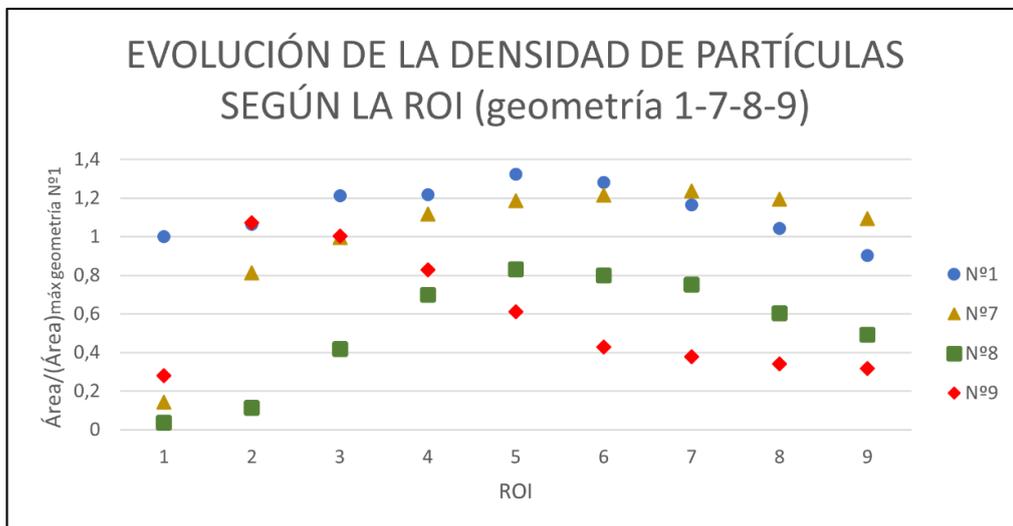


Figura 31. Generación de las estructuras de vorticidad en función de la geometría. **a)** Geometría N°4; **b)** Geometría N°5; **c)** Geometría N°6; **d)** Geometría N°7; **e)** Geometría N°8; **f)** Geometría N°9.

En la Figura 32 se muestra la comparación de los resultados para las restantes geometrías. La adimensionalización se ha realizado con el caso de referencia (*geometría caso base*, o geometría N°1). De esta figura se destacan las siguientes observaciones:



a)



b)

Figura 32. Estudio de la evolución espacial de la concentración de burbujas para las diferentes geometrías. **a)** Comparación con las geometrías Nº4, Nº5 y Nº6; **b)** Comparación con las geometrías Nº7, Nº8 y Nº9.

- Como ya se mencionó, la geometría Nº1 (*geometría caso base*) incrementa su concentración de burbujas de forma suave: en la ROI-5 alcanza un 130% de la concentración inicial, y tras ese punto se produce una disminución suave de la concentración de burbujas manteniendo un 90% de su concentración inicial.
- La concentración inicial de burbujas en la geometría Nº4 es menor que en el caso *geometría caso base*, partiendo de una concentración relativa del 15%, pero aumentando de forma suave hasta alcanzar su máximo en la ROI-5 con un 60% de valor relativo y disminuyendo suavemente hasta un 21% en la ROI-9.
- En la geometría Nº5 se detecta una concentración prácticamente nula de burbujas en las ROI-1 y ROI-2 debido a que el desprendimiento de vórtices se realiza al filo de la ROI-1 (Figura 31.b). Sin embargo, muestra un aumento

drástico desde un 1% respecto a la concentración inicial de burbujas del *caso base* hasta alcanzar su máximo de un 121% en la ROI-6; tras ese punto disminuye hasta el 70% en la ROI-9.

- La geometría N°6 parte de una concentración inicial relativa del 41%, con un aumento de la concentración relativa muy pequeño, hasta su máximo de un 50% en la ROI-3; tras ese punto disminuye suavemente hasta el 9% en la ROI-9.
- La geometría N°7 parte de una concentración relativa inicial de un 18% y aumenta drásticamente hasta la ROI-3 y luego, con un aumento más suave, alcanza su máximo en la ROI-7 con un 122%, para después descender ligeramente hasta el 110% en la ROI-9.
- La geometría N°8 tiene una concentración relativa inicial muy pequeña (4%) pero mayor que en el caso de la geometría N°5. El aumento en la concentración relativa de burbujas alcanza su máximo con un 81% en la ROI-5, para disminuir lentamente hasta una concentración de un 50% en la ROI-9.
- Finalmente, la geometría N°9 parte de una concentración relativa inicial de un 29% y aumenta extremadamente rápido alcanzando su máximo, de un 109% relativo a la concentración inicial del *caso base* en la ROI-2, seguido de una disminución fuerte hasta la ROI-6 con un 41% y una disminución suave hasta la ROI-9 con un 32%.

Con base en estas observaciones, las geometrías N°6, N°7 y N°9 indican que al final de la zona de estudio existe una alta concentración de burbujas residuales que por falta de las condiciones adecuadas del flujo siguen perviviendo. La suavidad con que la concentración de burbujas decae al final de la zona de estudio, en estas geometrías, podría considerarse poco recomendable, aunque esta situación sigue bajo estudio. Sin embargo, el criterio más adecuado debería ser el de que la mayoría de las burbujas generadas inicialmente desaparezcan lo antes posible (en regiones pequeñas y en cortos periodos de tiempo) para asegurar que la mayoría colapsan de forma deseada.

En la Figura 33 se realiza una comparación particular entre las geometrías N°1, N°4, N°5 y N°8. Para este ejercicio se decidió adimensionalizar con el valor máximo de la concentración alcanzado por cada geometría ($\text{Área}_{\text{máx-cada geometría}}$) y con la posición en donde cada una alcanza dicho máximo ($(x)_{\text{máx-cada geometría}}$). La idea es observar la rapidez con la que se generan las nubes de burbujas, en cada caso particular, hasta alcanzar su valor máximo, y también la rapidez con la que disminuye la concentración de burbujas. En particular, la geometría N°8 se escogió porque al final de la zona de estudio el descenso en la concentración de burbujas es similar al que presenta el caso base (Figura32.b).

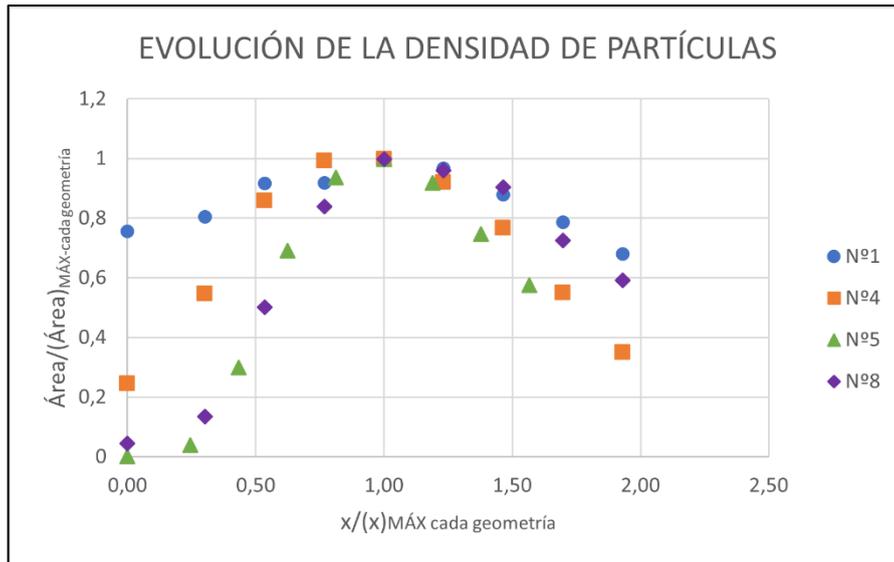


Figura 33. Evolución espacial de la concentración de burbujas para las geometrías N°1, N°4, N°5 y N°8. Adimensionalización con el valor máximo detectado para cada geometría.

De la Figura 33 vuelve a destacar el rápido aumento en la concentración que se obtiene de la geometría N°5 y la tendencia a disminuir en una zona más estrecha del campo de flujo. Este rápido aumento en la concentración también lo muestra la geometría N°8, pero la disminución de la concentración, al final de la zona de estudio, indica una pervivencia de un número mayor de burbujas en el caso de la geometría N°8.

Las geometrías N°4 y N°5, son las que muestran un descenso más pronunciado al final de la zona de estudio.

4.3. Conclusiones parciales del capítulo.

El análisis de imágenes ha permitido realizar una primera descripción del comportamiento de la concentración de burbujas para dar una visión global de los fenómenos acoplados a la dinámica de flujos cavitantes en una contracción: 1) el desprendimiento de vórtices con el inicio de la presencia de burbujas; 2) el desarrollo de la estructura de vorticidad con un aumento asociado en la concentración de burbujas; 3) la evolución de esta estructura de vorticidad y una apreciable disminución de la concentración de burbujas al final de la zona de estudio.

A partir del análisis de datos de la concentración de burbujas mediante la transformada rápida de Fourier se ha observado un pico en la frecuencia de 820 Hz. Dicha frecuencia concuerda con la *frecuencia fundamental* de desprendimiento de vórtices observada por Crow y Champagne [23], y Cerecedo [24], lo que asocia la concentración a las estructuras coherentes. La aparición de una frecuencia subarmónica, el aumento en amplitud ésta y la disminución en paralelo de la amplitud del armónico fundamental, concuerda con los resultados esperados del desarrollo de vórtices desprendidos.

Las gráficas que muestran el cálculo de las FFT para los casos de caudales de 9.80 y 10.50 m³/h no han arrojado resultados concluyentes, pero el caso 11 m³/h ha aportado información trascendente para los objetivos planteados a lo largo del presente

proyecto. Por todo esto se decidió realizar la comparación de comportamientos entre diferentes geometrías para estas mismas condiciones del flujo.

Las primeras observaciones en el *caso base* (prisma rectangular con cantos vivos) confirman un comportamiento paralelo entre el desprendimiento de vórtices y su evolución, y los cambios espaciales en la concentración de burbujas. Al comparar este comportamiento del *caso base* con otras geometrías, destacan las siguientes observaciones:

- Las superficies con cantos vivos (filos) ayudan a la pronta generación y desarrollo de las nubes de burbujas, con una consecuente pronta desaparición de éstas (Figura 32.a y b).
- Las superficies con filos o esquinas no parecen presentar cambios radicales de este comportamiento al ubicarlas al revés respecto al flujo, es decir, al ponerlas de frente (generando contracción suave y expansión brusca) o hacia atrás (generando contracción brusca y expansión suave).
- Por el contrario, las superficies sin cantos vivos (esquinas o filos) muestran evoluciones en la concentración de burbujas más suaves. Se observa que en las que se presenta un menor ángulo en la contracción y/o expansión, la concentración de burbujas tienden a pervivir durante más tiempo y espacio respecto a aquéllas que son más bruscas.

Con estas observaciones se puede concluir que, para reducir los tiempos de pervivencia de las burbujas, parece adecuado emplear geometrías con filos vivos. “Aprovechar el fenómeno” debe tener en cuenta la necesidad de que las burbujas desaparezcan lo antes posible, como un indicio de un tiempo de pervivencia corto y su consecuente colapso violento.

Al final del presente trabajo, no fue posible concluir si la disminución de la concentración de burbujas ha sido debida a su implosión dentro del campo de estudio, o si se debe a que han sido arrastradas hacia otras zonas que quedaron fuera de los objetivos del presente trabajo.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

5.1. Resumen.

Investigaciones sobre el método tradicional para potabilizar el agua muestran la poca fiabilidad que la cloración presenta: 1) generación de subproductos cancerígenos para el ser humano y 2) resistencia de determinados microorganismos ante este proceso.

La cavitación es un fenómeno que, inicialmente evitado en las turbomáquinas, se presenta como una gran alternativa para la depuración de aguas residuales debido a: 1) la poca (o nula) necesidad de agregar agentes químicos para realizar el proceso, 2) la escalabilidad de los equipos para su uso a nivel industrial, 3) la nula generación de subproductos dañinos para el ser humano. Así, cualquier avance en el conocimiento de este fenómeno, que abarca efectos mecánicos, termodinámicos y químicos será de gran ayuda para el desarrollo y puesta a punto de esta tecnología.

Uno de los trabajos de interés para centrar los objetivos del presente proyecto ha sido el realizado por Barre et al. [17], en donde se puede observar el gran acoplamiento que hay entre las estructuras de vorticidad (perfiles de velocidades) y la nubes de burbujas (concentración) generadas a través de un tubo Venturi. Un estudio analítico sobre el vórtice de Rankine (que combina los efectos de un vórtice forzado y un de vórtice libre) alumbra sobre la posibilidad de que la intensidad de los vórtices desprendidos sea adecuada para lograr la disminución de la presión necesaria para generar el cambio de fase. De esta forma, confirmar este acoplamiento con técnicas sencillas de medida se vuelve de interés para el Grupo de Investigación.

Con esta motivación, se han realizado ensayos experimentales, con técnicas ópticas de medida, para visualizar la posible conexión entre la concentración de burbujas y el desprendimiento de vórtices. En la presente memoria se muestran los resultados más relevantes obtenidos de numerosos ensayos en flujos cavitantes, realizados en una instalación experimental diseñada y construida ex profeso. Dicha instalación permite el acceso óptico adecuado para aplicar las técnicas de visualización y análisis de imágenes implementados durante el presente proyecto.

Mediante el uso de una cámara de alta velocidad y una lente de alto rendimiento se ha procedido a la captura de imágenes en diferentes condiciones experimentales, con el objetivo de realizar un estudio de las consecuencias que la geometría de la contracción/expansión tiene sobre la evolución espacial de la concentración de burbujas en flujos cavitantes.

Las geometrías de los obstáculos, que han permitido el desprendimiento de vórtices y con ello el avance del estudio, fueron construidas de acuerdo con las propuestas realizadas por el Grupo de Investigación, bajo cuya tutela se desarrolló el presente proyecto. Una multiherramienta sirvió como fresadora para dar forma a las piezas estudiadas.

Se ha resaltado la importancia de dar seguimiento al desprendimiento de vórtices que, se especula que está asociado a la concentración de burbujas. La correcta manipulación previa de las imágenes adquiridas, mediante el software Fiji-ImageJ, permiten que de la técnica de análisis de imágenes se obtenga información fiable sobre la evolución

espacial de la concentración de burbujas, que también han servido como trazadoras del flujo.

Se han implementado diversos códigos en el lenguaje de programación propio de Fiji que han permitido el tratamiento y análisis de miles de imágenes, capturadas previamente con la cámara de alta velocidad.

Se presentan los resultados para la *geometría caso base* (prisma rectangular con cantos vivos), con datos directamente obtenidos del análisis de imágenes y de la escala de grises de cada fotograma, lo cuales ha permitido estudiar el comportamiento de la concentración de burbujas a lo largo del campo de flujo. Los resultados de la cavitación hidrodinámica, referentes a la evolución espacial de la concentración de burbujas para el *caso base*, han permitido, a su vez, asociar el desarrollo propio de los vórtices desprendidos: su aumento de tamaño y su posterior transformación en estructuras más pequeñas. Mediante un análisis más completo de la “*geometría caso base*”, abarcando la totalidad del campo de flujo, ha sido posible estudiar la concentración de burbujas en diferentes secciones transversales detrás del obstáculo. Esta mayor visión sobre todo el campo de flujo, permitió sondear una gran estructura de vorticidad que se genera por la recirculación del flujo detrás del obstáculo. Parte de la concentración de burbujas en esta zona de estudio se debe al movimiento convectivo de esta gran estructura, y parte al desarrollo espacial de los vórtices desprendidos del obstáculo.

Posteriormente, los resultados para el resto de las geometrías, previamente adimensionalizadas con el caso de referencia (*geometría caso base*), han permitido realizar una serie de observaciones respecto a la velocidad de generación y desaparición de la concentración de burbujas en cada caso de estudio.

5.2. Conclusiones finales: Elección de la geometría más apropiada.

Las conclusiones más relevantes obtenidas del presente estudio han sido:

- Las nubes de burbujas parecen estar correctamente asociadas con las estructuras de vorticidad que se desprenden de los obstáculos: la generación de vórtices con el inicio de la presencia de burbujas; el desarrollo espacial del vórtice desprendido con un asociado aumento en la concentración de burbujas; y la transformación de los vórtices desprendidos en estructuras más pequeñas, coincidiendo con la disminución de la concentración de burbujas.
- Las geometrías con cantos vivos (filos y esquinas) ayudan a la rápida generación y desarrollo de las nubes de burbujas, con una consecuente pronta desaparición de éstas.
- Las superficies con mecanizados suaves amortiguan los efectos del fenómeno (aumento de los tiempos de pervivencia de las burbujas).

Para la aplicación del fenómeno de cavitación al tratamiento de aguas contaminadas se recomienda geometrías que: 1) generen una adecuada concentración de burbujas, 2) evitar el exceso de burbujas que podría desencadenar en fenómenos de coalescencia, y 3) que todo el proceso de generación e implosión de las burbujas generadas se realice en regiones estrechas del campo de flujo (espacios reducidos), consiguiendo el colapso del mayor número de burbujas.

Las geometrías N°4 y N°5 (cantos vivos) fueron las que mostraron zonas más corta de generación, crecimiento y desaparición de burbujas. A falta de un estudio más profundo, esto podría significar periodos cortos de pervivencia de burbujas, y un mayor número de colapsos de burbujas.

5.3. Trabajos futuros.

El presente proyecto muestra interesantes resultados, pero deja abiertas las puertas a numerosos trabajos futuros. Con la experiencia adquirida, se proponen las siguientes cuestiones para investigación:

- La confirmación de los efectos de pared en el desarrollo del flujo. Tomas de vídeo en la dirección vertical (perpendicular a las mostradas en el presente estudio) podrían ilustrar a este respecto.
- El análisis de la geometría rectangular de diferentes alturas se descartó en última instancia (geometrías N°2 y N°3) por producir un efecto de “cercanía con la pared”, fenómeno de mayor complicación y que requiere un estudio en profundidad.
- Un inconveniente importante en la mayoría de las pruebas realizadas en este proyecto se ha debido a la resolución de la cámara digital para detectar zonas de muy baja concentración de burbujas. Sería deseable rehacer el estudio con una cámara con mayores prestaciones (p.e., de mayor resolución y menor tiempo de exposición). Esto mejoraría el análisis de imágenes a menores caudales (con menor cantidad de burbujas trazadoras), y quizás aporte nueva información en lo referente a la evolución espacial de las burbujas y al comportamiento de las estructuras de vorticidad desprendidas de los obstáculos.
- Los ensayos realizados en el canal bidimensional han aportado una primera descripción de la distribución espacial de las burbujas generadas por un obstáculo aislado. Sería conveniente el uso de múltiples geometrías colocadas en serie y simultáneamente para estudiar los efectos al disminuir los tiempos de pervivencia de las burbujas. Estudiar cómo influye la separación entre obstáculos (modificación de las condiciones aguas abajo del obstáculo) en la evolución de las nubes de burbujas sería un siguiente paso a tener en cuenta.
- Mediante la adquisición de las señales de presión que se generan durante el proceso de cavitación, se plantea complementar el estudio realizado por las técnicas ópticas implementadas durante este proyecto. Este análisis es de gran interés pues complementaría los resultados obtenidos referentes a la dinámica propia de las burbujas.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] OMS, “Agua. Datos y Cifras”, junio 2019. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- [2] Mir, J., Morató, J. and Ribas, F., “Resistance to chlorine of freshwater bacterial strains”, *Journal of Applied Microbiology* (1997).
- [3] Villanueva, C.M., Font-Ribera, L. and Salas, L.A., “Overview of Disinfection By-Products and Associated Health Effects”, Springer International Publishing (2015).
- [4] Gogate, P.R. and Kabadi, A.M., “A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology”, *Elsevier Biochemical Engineering Journal* (2008).
- [5] Dopazo, C., “¿Cavitar o no cavitar? La inevitable ubicuidad de las burbujas” Discurso de la sesión inaugural del año académico, Real Academia de Ingeniería (2008).
- [6] Jyoti, K.K. and Pandit, A.B., “Water disinfection by acoustic and hydrodynamic Cavitation”, *Elsevier Biochemical Engineering Journal* (2000).
- [7] Cerecedo, L.M., Dopazo, C., and Gómez-Lus, R., “Water disinfection by hydrodynamic cavitation in a rotor-stator device”. *Ultrasonics-Sonochmestry* (2018)
- [8] Abadía, L., “Estudio experimental sobre la cavitación hidrodinámica a partir de los espectros de presión generados por las burbujas de vapor” Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza (2012).
- [9] Brunet, B., “Tratamiento de aguas contaminadas mediante cavitación” Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza (2000).
- [10] Arrojo, S., “Estudio dinámico y químico-analítico de oxidación radicalaria en burbujas en un bucle de cavitación hidrodinámica” Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza (2002).
- [11] Torres, D., “Mejoramiento de crudos mediante cavitación” Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza (2009).
- [12] Castaño, D., “Tratamiento de glicerina con cavitación. Dimensionado de una planta piloto” Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza (2000).
- [13] Bueno, J.A., “Eliminación de microorganismos por medio de técnicas avanzadas de cavitación” Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza (2012).
- [14] Loriente, R., “Estudio experimental sobre la concentración de burbujas de vapor en cavitación hidrodinámica mediante análisis de imágenes” Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza (2014).
- [15] Vidaller, C.M., “Diseño y construcción de una instalación experimental para ensayos de cavitación hidrodinámica” Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza (2015).
- [16] Joyce, E., Phull, S.S., Lorimer, J.P., and Mason, T.J. “The development and evaluation of ultrasound for treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured *Bacillus* species”. *Ultrasound Sonochemistry*, vol. 10, pp. 315-318, (2003).
- [17] Barre, S., Rolland, J., Boitel, G., Goncalves, G., and Fortes Patella, R.,

- “Experiments and modeling of cavitating flows in veturi: attached sheet cavitation”, J. Mechanics B/Fluids (2009).
- [18] Franc, J-P., “Physics and Control of Cavitation”, University of Grenoble (2006).
- [19] Rayleigh (Lord), “The pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity”, Phil. Mag. 34 (6), 94 (1917).
- [20] Brennen, C.E., “Cavitation and bubble dynamics”, Oxford University Press, (1995).
- [21] Farkade, V., Harrison, S. and Pandit, A., “Improved cavitation cell disruption following pH pretreatment for the extraction of B-galactosidase from *Kluveromyces lactis*”, Elsevier Biochemical Engineering Journal (2006).
- [22] Shirgaonkar, I.Z., Lothe, R.R. and Pandit, A.B., “Comments on the mechanism of microbial cell disruption in high pressure and high-speed devices”, Biotechnol Prog.14 (1998).
- [23] Crow, S.C. and Champagne, F.H., “Orderly stricture in jet turbulence”, The Boeing Company (1970).
- [24] Cerecedo, L.M., “Estudio experimental por técnicas ópticas de la estructuración de un chorro de partículas, inyectado por tobera: efectos del forzado acústico” Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza (2000).
- [25] Levi, E., “An oscillatory approach to turbulence” Instituto de Ingeniería, Universidad autónoma de México (1991).

ANEXOS.

ANEXO A: Software Fiji-ImageJ para el análisis de imagen y código empleado para la realización del proyecto.

A.1. Fiji-ImageJ.

ImageJ es un software de dominio público (descarga gratuita) para el procesamiento de imágenes con múltiples derivados y variantes, entre las que se incluyen Fiji, ImageJ2 y AstroImageJ entre otros.



Figura 34. Software ImageJ.

El software original de ImageJ está inspirado en NIH Image para Macintosh y lleva en continuo desarrollo desde 1997. Es capaz de mostrar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir imágenes en 8-bit, 16-bit y 32-bit. Es capaz de leer una gran cantidad de formatos de imagen, entre los que se incluyen TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS y “raw”.

El programa soporta “stacks” de imágenes que comparten una misma ventana. Puede calcular valores estadísticos de área y de pixel según ajustes de usuario, medir distancias y ángulos, crear histogramas de densidad y admite funciones de procesamiento de imágenes estándar, como la manipulación de contraste y brillo, la nitidez, el suavizado y la detección de bordes.

El software dispone de calibración espacial, capaz de proporcionar medidas dimensionales reales en unidades como los milímetros. Dispone también de calibración de escala de grises y de densidad.

Fiji es una versión de ImageJ con extras. Es en si una distribución de ImageJ e ImageJ2 con múltiples complementos útiles para el análisis de imágenes en campos como la biología.

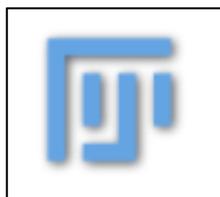


Figura 35. Software Fiji.

Se trata de un software de código abierto con una importante contribución por parte de

la comunidad científica y con aplicaciones desarrolladas para el análisis de microorganismos y estructuras celulares.

El software Fiji posee una gran adaptabilidad a distintos lenguajes de programación como Java, JavaScript y Python, entre otros.

A.2. Código programado en Fiji.

El análisis de imágenes se realizó mediante el software Fiji-ImageJ, el cual permite la lectura de macros y scripts de programación. Durante el desarrollo del proyecto se han implementado diversos códigos en el lenguaje propio de Fiji (lenguaje basado en Java) que han permitido el análisis de miles de imágenes, necesario para el logro de los objetivos planteados a lo largo del presente proyecto.

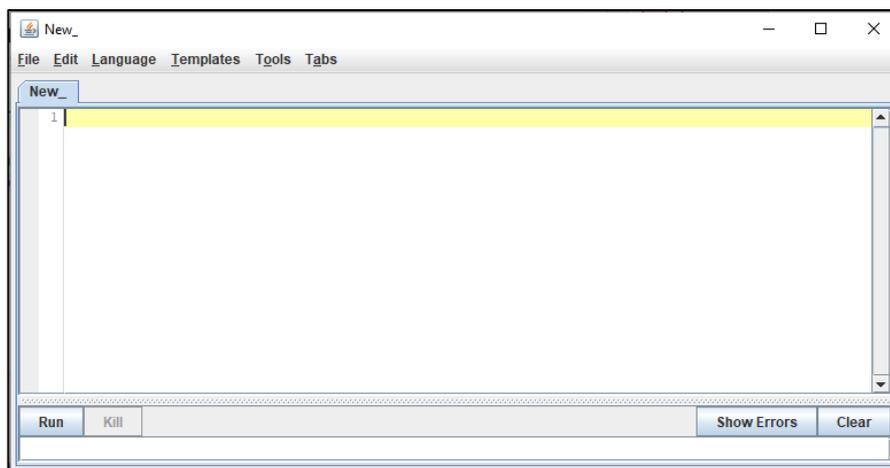


Figura 36. Consola para programación de scripts en Fiji.

A continuación, se dispone el código programado para el análisis de las imágenes:

```
1 run("Profile Plot Options...", "width=450 height=200 minimum=255 maximum=0 fixed interpolate");
2 run("Set Measurements...", "area perimeter shape integrated redirect=None decimal=3");
3
4 imagen=getTitle();
5 roiManager("Reset");
6
7 Stack.getDimensions(width, height, channels, slices, frames);
8
9 n=slices;
10 area=newArray(n);
11
12 makeRectangle(357,119,35,35); //cambiar dimensiones de la ROI
13
14 waitForUser("Calibrar"); //calibrar Los pixel-mm (analyze/set_scale)
15 getBoundingRect(x, y, width_roi, height);
16 setSlice(1);
17 setColor("red");
```

```

18
19 for (j=0; j<sllices; j++)
20 {
21     makeRectangle(x, y, width_roi, height);
22     array= getProfile();
23     array_final=Array.concat(array_final,array);
24     selectWindow(imagen);
25     makeRectangle(x, y, width_roi, height);
26     roiManager("add");
27     roiManager("select",j);
28     roiManager("Rename", "Frame_"+j);
29     roiManager("Multi Plot");
30     drawLine(60,0,60,255); //primera linea
31     drawLine(498,0,498,255); //segunda, linea
32     doWand(220,214); //punto en medio del area roja
33     fill();
34     run("Measure"); //medicion de area
35     //waitForUser;
36     close("Profiles");
37     selectWindow(imagen);
38
39     run("Next Slice [>]");
40
41 }
42
43 //Array.show(array, array_final,area); //muestra estos arrays de datos
44 IJ.renameResults("Results", "Areas y prop bajo la curva");
45 array_final=Array.slice(array_final,1,n*width_roi+1);
46 //run("Profile Plot Options...", "width=width_roi height=200 minimum=255 maximum=0 interpolate draw");
47 //Plot.create("Concatenado"+imagen, "Distance Pixel", "Y-axis Label", array_final);
48 //Plot.show();
49 i=0;
50 for (row=1; row<=n; row++)
51 {
52     for (col=1; col<=width_roi; col++)
53     {
54         setResult(col, row-1, array_final[i]);
55         i++;
56     }
57 }
58
59 //IJ.renameResults("Results", "Punto y Frame");
60 selectWindow(imagen);
61 Array.show(array_final);
62 run("Profile Plot Options...", "width=width_roi height=200 minimum=255 maximum=0 fixed interpolate draw");
63 selectWindow("ROI Manager");

```

Se dispone, también, el código programado para abrir todas las imágenes de un directorio formando un “stack”, analizable por el conjunto de instrucciones:

```

1
2 input = "/Users/ALBERTO/Desktop/TFG/PIEZAS/PIEZA N°9/TRATADAS imageJ/";
3
4 list = getFileList(input);
5 for (i = 0; i < list.length; i++){
6     open(input + list[i]);
7 }

```

Por último, se implementó un código que permitiera abrir un directorio entero de imágenes, el tratamiento rápido de éstas y su posterior guardado en otro directorio diferente:

```

1
2
3 function action(input, output, FONDO, filename) {
4     open(FONDO);
5     A=getTitle();
6     open(input + filename);
7     B=getTitle();

```

```
8
9     imageCalculator("Subtract create", A, B);
10    saveAs("Jpeg", output + filename);
11    close();
12 }
13
14 input = "/Users/ALBERTO/Desktop/PROCESADO/CAPTURAS/"; //carpeta con Las imagenes a tratar
15 output = "/Users/ALBERTO/Desktop/PROCESADO/TRATADAS imageJ/"; //carpeta donde guardar Las imagenes tratadas
16 FONDO = "/Users/ALBERTO/Desktop/PROCESADO/FONDO/0.jpg" //Imagen de fondo: RENOMBRAR IMAGEN COMO '0'
17
18 setBatchMode(true);
19 list = getFileList(input);
20 for (i = 0; i < list.length; i++){
21     action(input, output, FONDO, list[i]);
22 }
23 setBatchMode(false);
```