



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE LA LÍNEA DE CONTACTO EN LA DINÁMICA DE FORMACIÓN DE BURBUJAS

Alumno: Carlos Javier Molina Álvarez

Tutores: Rocío Bolaños Jiménez
Cándido Gutiérrez Montes

Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Área: Mecánica de Fluidos

Abril, 2018



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Rocio Bolaños Jiménez y Cándido Gutiérrez Montes, tutores del Proyecto Fin de Carrera titulado: *Estudio de la influencia de la línea de contacto en la dinámica de formación de burbujas*, que presenta Carlos Javier Molina Álvarez, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Abril de 2018

El alumno:

Los tutores:

Carlos Javier Molina Álvarez

Rocio Bolaños Jiménez

Cándido Gutiérrez Montes

Índice

1. Introducción	7
1.1 Motivación	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Conceptos preliminares: tensión superficial	9
1.3.1 Condiciones de equilibrio	9
1.3.2 Líneas y ángulos de contacto	12
2. Descripción del problema	15
2.1 Formación de burbujas.....	15
2.2 Tipos de alimentación	19
2.3 Parámetros del problema y análisis dimensional	22
3. Trabajo experimental.....	29
3.1 Descripción de la instalación experimental	29
3.2 Metodología de obtención de resultados.....	35
3.3 Pruebas preliminares	38
3.4 Experimentos finales	39
4. Procesado de imágenes.....	43
4.1 Volumen	44
4.2 Depura Contorno.....	46
4.3 Grabit	47
4.4 Calibrador.....	47
5. Resultados.....	48
5.1 Evolución temporal del volumen.....	50
5.2 Frecuencia de burbujeo.....	55
5.3 Análisis del efecto del borde del inyector	57
5.4 Análisis del efecto de la línea de contacto fija o móvil en la dinámica de formación de la burbuja.....	63
6. Conclusiones y trabajo futuro	67
7. Bibliografía.....	69
8. Anexos.....	71
8.1 Código del programa Volumen.....	71
8.2 Código del programa Depura_contorno	78
8.3 Código del programa Calibrador	80

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Burbujas en bebida carbonatada y en aireador planta de tratamiento de aguas residuales. Fuente: Bigstockphoto y Environmental dynamics international....	7
Figura 1. 2. Sección de aleación AlSi9Mg0.6 + 20% SiC después de solidificación. Fuente [8]	7
Figura 1. 3 Fuerza debida a la tensión superficial. Fuente [14]	9
Figura 1. 4 Fuerza actuando en la interfase de dos fluidos debida a la tensión superficial. Fuente [14]	10
Figura 1. 5 Ángulo estático en burbuja. Fuente [20]	12
Figura 1. 6 Líneas de contacto entre tres medios diferentes. Fuente [14].....	13
Figura 1. 7 Ángulos de contacto gota de aceite. Fuente [14].....	13
Figura 1. 8 Ángulos de contacto vaso de agua. Fuente [14]	14
Figura 1. 9 Ángulos de contacto gotas de agua y de mercurio sobre superficie sólida. Fuente [14]	14
Figura 2. 1 Burbuja dividida geoméricamente: (1) Media esfera; (2) Zona esférica; (3) Tronco de cono invertido; (4) Tronco de cono; (5) Cilindro. (a) mojabilidad alta ($\theta < 90^\circ$) (b) mojabilidad baja ($\theta > 90^\circ$). Fuente [12].....	16
Figura 2. 2 Superficie de burbujas durante el "pinch-off" para líquidos con viscosidades diferentes: a) Agua b) 50% Glicerina c) 85% Glicerina d) 99% Glicerina. $D_i= 2.7\text{mm}$ y $D_o=3.14\text{mm}$. Fuente [18].....	18
Figura 2. 3 Secuencia del análisis de imágenes: a) imagen en escala de grises, b) binarización, c) contorno, d) reconstrucción 3D. Fuente [1].....	19
Figura 2. 4 Etapa expansión y colapso condiciones caudal constante.....	20
Figura 2. 5 Vista general de las etapas de formación de una burbuja en un orificio con $\theta_0 < 90$. Fuente [12].....	21
Figura 2. 6 Esquema de la burbuja con las variables relevantes.....	22
Figura 2. 7 Relación entre el volumen final de la burbuja con el volumen de Fritz frente a la relación del caudal de gas con el caudal crítico. Datos experimentales obtenidos de [2] para cada uno de los inyectores (símbolos transparentes) y los tomados de [15] (símbolos oscuros).....	28
Figura 3. 1 Instalación experimental (1)	30
Figura 3. 2 Instalación experimental (2)	30
Figura 3. 3 Panel de iluminación led y depósito	31
Figura 3. 4 Manómetro y caudalímetro	32
Figura 3. 5 Cámara de alta velocidad (1)	32
Figura 3. 6 Cámara de alta velocidad (2)	33
Figura 3. 7 Lente	33
Figura 3. 8 Válvula y tubo capilar	34
Figura 3. 9 Experimento en curso.....	34
Figura 3. 10 Salida del aire donde situamos la tobera o el orificio.....	35
Figura 3. 11 Gomaespuma en tobera.....	36
Figura 3. 12 Menú principal programa "fastcam" con el que realizamos los videos .	36

Figura 3. 13 Reguladores manuales en tres direcciones.....	37
Figura 3. 14 Algunos de los inyectores ensayados	38
Figura 3. 15 TFCE	39
Figura 3. 16 Orificio PMMA, $D_i = 1 \text{ mm}$; Tobera PMMA, $D_i = 1 \text{ mm}$ y Tobera PMMA, $D_i = 3 \text{ mm}$	40
Figura 3. 17 Orificio Teflón, $D_i = 1 \text{ mm}$ y Tobera Teflón, $D_i = 1 \text{ mm}$	40
Figura 3. 18 Orificios y toberas utilizados.....	40
Figura 4. 1 Esquema de la burbuja con las variables relevantes y los ejes de referencia.....	43
Figura 5. 1 Evolución temporal de la burbuja con tobera PMMA.....	48
Figura 5. 2 Evolución temporal de la burbuja con orificio de teflón.....	48
Figura 5. 3 Evolución temporal de la burbuja con orificio PMMA + vaselina	49
Figura 5. 4 Evolución temporal de la burbuja orificio PMMA + Neverwet	49
Figura 5. 5 Figura Volumen - Tiempo	50
Figura 5. 6 Ampliación gráfica Volumen - Tiempo	51
Figura 5. 7 Ejes de coordenadas.....	52
Figura 5. 8 Figura Z max - Tiempo	52
Figura 5. 9 Figura Pendiente - Frames.....	53
Figura 5. 10 Contorno seleccionado.....	53
Figura 5. 11 Gráfico de barras frecuencia PMMA.....	57
Figura 5. 12 Gráfico de barras volumen PMMA.....	58
Figura 5. 13 Gráfico de barras frecuencia teflón.....	59
Figura 5. 14 Gráfico de barras volumen teflón.....	59
Figura 5. 15 Gráfico de barras frecuencia PMMA + vaselina	60
Figura 5. 16 Gráfico de barras volumen PMMA + vaselina	61
Figura 5. 17 Gráfico de barras frecuencia toberas PMMA.....	62
Figura 5. 18 Gráfico de barras volumen toberas PMMA.....	62
Figura 5. 19 Gráfico de barras frecuencia orificios	64
Figura 5. 20 Gráfico de barras volumen orificios	64
Figura 5. 21 Gráfico de barras frecuencia toberas	65
Figura 5. 22 Gráfico de barras volumen toberas	66

Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Descomposición de las variables del problema en magnitudes fundamentales	23
Tabla 2. 2 Variables seleccionadas para el análisis dimensional	24
Tabla 3. 1 Experimentos realizados	41
Tabla 3. 2 Comportamiento línea de contacto experimentos.....	42
Tabla 5. 1 Volúmenes obtenidos	54
Tabla 5. 2 Frecuencias obtenidas.....	56
Tabla 5. 3 Comparativa PMMA.....	57
Tabla 5. 4 Comparativa teflón.....	58
Tabla 5. 5 Comparativa vaselina	60
Tabla 5. 6 Comparativa diámetro tobera	61
Tabla 5. 7 Comparativa orificios	63
Tabla 5. 8 Comparativa toberas	65

1. Introducción

1.1 Motivación

La formación de burbujas, es un proceso que ocurre en la naturaleza de forma natural y que además tiene importancia en multitud de aplicaciones industriales como en procesos metalúrgicos de fabricación de superficies metálicas y acero, como vemos en [8], aireación de reactores químicos o plantas de tratamiento de aguas residuales y en la vida cotidiana como las burbujas de CO₂ de las bebidas carbonatadas.



Figura 1. 1 Burbujas en bebida carbonatada y en aireador planta de tratamiento de aguas residuales. Fuente: Bigstockphoto y Environmental dynamics international

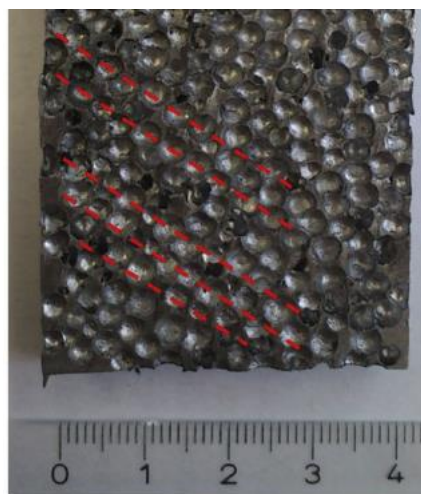


Figura 1. 2. Sección de aleación AISi9Mg0.6 + 20% SiC después de solidificación.

Fuente [8]

También en el ámbito de la medicina, en los últimos años, están apareciendo diferentes aplicaciones relacionadas con burbujas. Concretamente, se trabaja con microburbujas magnéticas cubiertas con nanopartículas y rellenas de fármacos anticancerígenos. Mediante imanes se conducen las burbujas hasta una localización determinada y entonces se estallan por medio de un dispositivo que crea vibraciones ultrasónicas. Así, se permite que el medicamento actúe eficazmente y no ataque a células sanas.

Hasta ahora, los equipos industriales que realizan estos procesos se diseñan en base a los parámetros disponibles, es crucial tener un amplio conocimiento del problema para poder optimizarlos. Existe principalmente una demanda común en todas estas aplicaciones, que las burbujas sean del menor tamaño posible y tener la mayor capacidad de control posible sobre éstas.

Todo lo comentado anteriormente justifica la investigación en el ámbito de la dinámica de formación de burbujas así como en elementos de control y estudio de la línea y el ángulo de contacto, ya que la mayoría de los estudios existentes ignoran la influencia de éstas y sin embargo, tienen una importancia relevante en la consecución del proceso.

1.2 Objetivos

- Profundizar en la investigación y el desarrollo de la generación de burbujas en general y en el control de la línea de contacto de una manera más particular.
- Establecer un hábito experimental de obtención de resultados, que además implica trabajar con una cámara de alta velocidad y encontrar la forma óptima de visualización de la entrefase de la burbuja.
- Realizar una rutina con Matlab para detectar la evolución de la entrefase la burbuja y poder analizar y comparar los resultados obtenidos con los estudios existentes en la materia.
- Evaluar los cambios que las diferentes configuraciones de inyección producen en la evolución temporal del volumen de la burbuja.

1.3 Conceptos preliminares: tensión superficial

1.3.1 Condiciones de equilibrio

Antes de definir la geometría particular de nuestro problema, debemos explicar algunos conceptos básicos de tensión superficial, necesaria para establecer el balance de fuerzas en condiciones cuasi-estáticas que veremos más adelante.

Como aparece explicado en [14] la tensión superficial es la energía asociada a la superficie de separación entre dos medios materiales diferentes, en condiciones de equilibrio el sistema tiende a minimizar esa energía adoptando una solución de área mínima, esto es lo que explica la forma esférica de las burbujas, al menos las de tamaño reducido en las que no entran en acción otros tipos de energías cinéticas proporcionales al volumen.

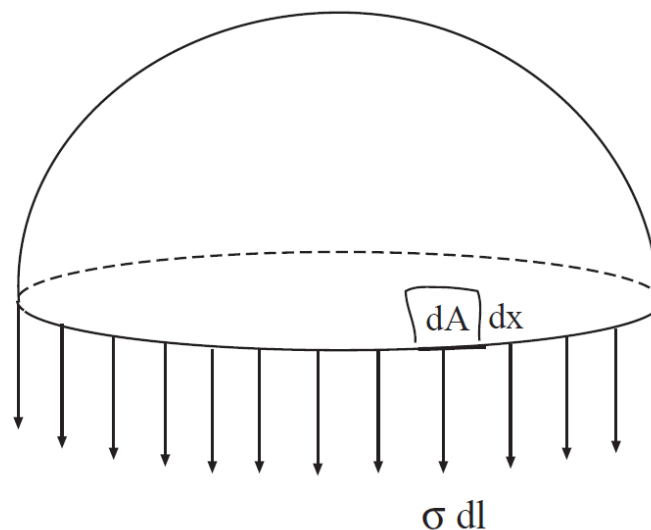


Figura 1. 3 Fuerza debida a la tensión superficial. Fuente [14]

Si A es la superficie de separación entre dos medios materiales diferentes, necesitamos una cantidad de energía σdA para aumentar la superficie de separación en una cantidad dA .

A esta cantidad σ que depende exclusivamente de la temperatura y de los medios en contacto es a lo que llamamos tensión superficial. A través de cualquier línea que

tracemos en la superficie existe una fuerza de magnitud σ por unidad de longitud que es normal a la línea considerada y está contenida en el plano tangente a la interfase, el trabajo de dicha fuerza cuando estiramos la superficie una longitud dx en la dirección normal a la línea es $\sigma dl dx = \sigma dA$, por tanto podemos afirmar que:

Energía por unidad de área = fuerza por unidad de longitud

Partimos de dos fluidos inmiscibles (que llamaremos 1 y 2), si consideramos su superficie de separación, y seleccionamos un elemento diferencial de superficie rectangular y lados dl_1 y dl_2 . Estamos en disposición de estudiar el equilibrio del fluido que se encuentra en el volumen de control de espesor $\varepsilon \ll dl_1, dl_2$; cuyas caras superior e inferior se encuentran contenidas en el fluido 1 y 2, como vemos desarrollado en [14].

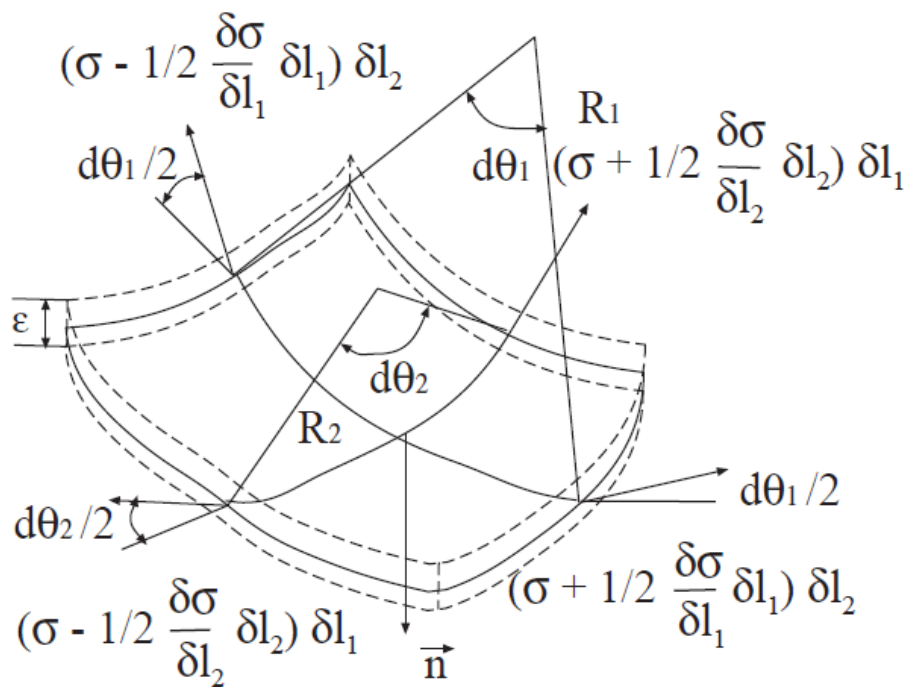


Figura 1. 4 Fuerza actuando en la interfase de dos fluidos debida a la tensión superficial. Fuente [14]

Como $\varepsilon \ll dl_1, dl_2$ las fuerzas másicas y las fuerzas de inercia son despreciables frente a las fuerzas de superficie y a las fuerzas de tensión superficial. En concreto, el fluido 2 ejerce una fuerza superficial sobre el volumen de control considerado (a través de la superficie inferior) de:

$$(-p_2 \cdot \bar{n} + \bar{\tau}'_2 \cdot \bar{n}) dl_1 dl_2 \quad (1.1)$$

Análogamente, la fuerza que ejerce el fluido 1 resulta ser

$$-(-p_1 \cdot \bar{n} + \bar{\tau}'_1 \cdot \bar{n}) dl_1 dl_2 \quad (1.2)$$

Estas fuerzas deben equilibrarse con la resultante de fuerzas de tensión superficial, de manera que podemos escribir la ecuación de equilibrio como

$$[(p_1 - p_2) + \bar{n} \cdot (\bar{\tau}'_2 - \bar{\tau}'_1) \cdot \bar{n}] dl_1 dl_2 = \sigma dl_2 d\theta_1 + \sigma dl_1 d\theta_2 \quad (1.3)$$

Sabiendo que $d\theta_1 = dl_1/R_1$ y que $d\theta_2 = dl_2/R_2$ donde R_1 y R_2 son los radios de curvatura de la superficie, tenemos como condición de equilibrio en la dirección normal

$$[(p_1 - p_2) + \bar{n} \cdot (\bar{\tau}'_2 - \bar{\tau}'_1) \cdot \bar{n}] dl_1 dl_2 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) dl_1 dl_2 \quad (1.4)$$

Pasamos ahora a evaluar la componente tangente al plano de las fuerzas de superficie, esta vendrá dada por

$$\{(\bar{\tau}'_2 - \bar{\tau}'_1) \cdot \bar{n} - [\bar{n} \cdot (\bar{\tau}'_2 - \bar{\tau}'_1) \cdot \bar{n}] \bar{n}\} dl_1 dl_2 \quad (1.5)$$

Que se debe equilibrar con la contribución de la tensión superficial

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial l_1} \bar{e}_1 + \frac{\partial \sigma}{\partial l_2} \bar{e}_2 \right) dl_1 dl_2 \quad (1.6)$$

Que aparece cuando existen gradientes superficiales de σ . Para simplificar, si llamamos $\nabla_s = (\partial/\partial l_1, \partial/\partial l_2)$ al operador gradiente superficial, reducimos la condición de equilibrio en el plano tangente a

$$(\bar{\tau}'_2 - \bar{\tau}'_1) \cdot \bar{n} - [\bar{n} \cdot (\bar{\tau}'_2 - \bar{\tau}'_1) \cdot \bar{n}] \bar{n} + \nabla_s \sigma = 0 \quad (1.7)$$

1.3.2 Líneas y ángulos de contacto

La línea de contacto, es el elemento de unión entre los tres estados (sólido, líquido y gaseoso) que tienen lugar en el desarrollo de nuestro experimento. Existe una dependencia directa entre el ángulo estático del material utilizado y el carácter de la línea de contacto de éste.

Se define el ángulo estático como el ángulo entre la superficie sólida y la tangente de la interfase (a nivel macroscópico) en el líquido. El ángulo puede ser estático o dinámico cuando la línea de contacto es móvil. Como podemos ver en [7].

En [20], también podemos ver un modelo teórico y experimental de la influencia de variaciones de ángulos estáticos por debajo de 90 grados.

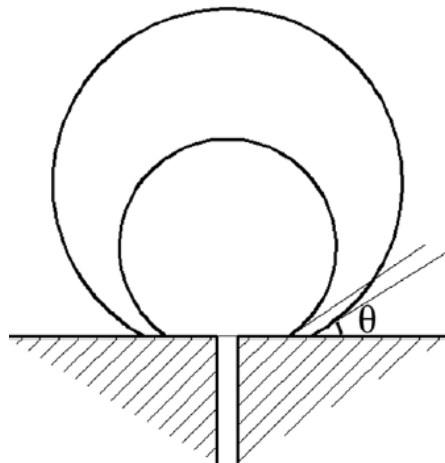


Figura 1. 5 Ángulo estático en burbuja. Fuente [20]

La línea de contacto, y en un sentido más amplio la mojabilidad del material, tienen una influencia directa en la forma, el crecimiento y el colapso de la burbuja. Por ello se trata de un elemento de estudio fundamental que puede ayudarnos a controlar el proceso de burbujeo e incluso ampliar las aplicaciones en las que se inyecta cualquier tipo de gas en un medio líquido. Siendo además un elemento que históricamente no se ha tenido en cuenta a la hora de desarrollar este tipo de sistemas, que generalmente se han tratado realizando exclusivamente un balance de fuerzas.

Como hemos apuntado anteriormente, llamamos línea de contacto a la intersección entre tres entrefases distintas como podemos ver en la figura 1.6.

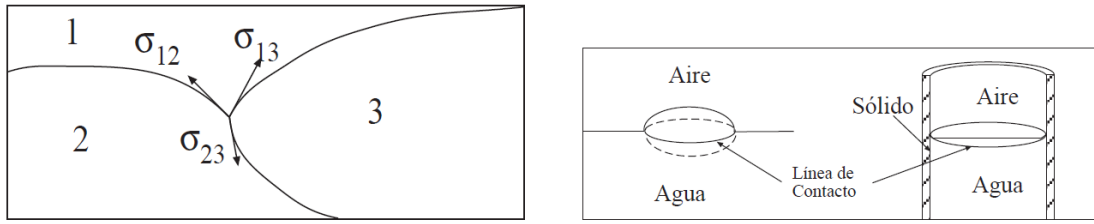


Figura 1. 6 Líneas de contacto entre tres medios diferentes. Fuente [14]

Algunos ejemplos de estas líneas son el borde de una gota de aceite flotando en agua o el borde de la superficie del agua en contacto con la pared de un vaso.

Puesto que la línea no tiene volumen ni superficie, su equilibrio se reduce al estudio de las fuerzas de tensión superficial. Para reflejar este concepto, verificamos las relaciones para el caso de una gota de aceite de la figura siguiente, donde los ángulos α y β son los denominados ángulos de contacto.

$$\sigma_{aire-agua} = \sigma_{aire-aceite} \cos \alpha + \sigma_{agua-aceite} \cos \beta \quad (1.8)$$

$$\sigma_{aire-aceite} \sin \alpha = \sigma_{agua-aceite} \sin \beta \quad (1.9)$$

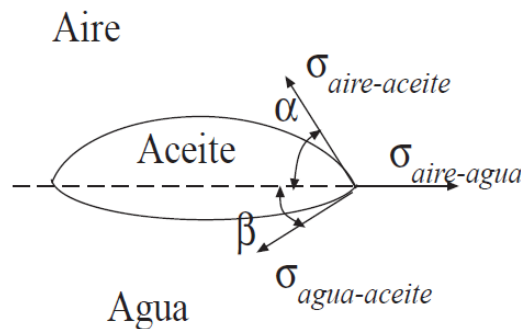


Figura 1. 7 Ángulos de contacto gota de aceite. Fuente [14]

Esta relación nos permite determinar los ángulos de contacto, siempre que se cumpla la condición $\sigma_{aire-agua} < \sigma_{agua-aceite} + \sigma_{aire-aceite}$.

Por otra parte, cuando uno de los medios que aparece en la intersección es un sólido, el equilibrio de las fuerzas de tensión superficial se debe verificar solo en la dirección tangente a la superficie sólida, por tanto para el caso del vaso de agua tenemos

$$\sigma_{s-1} = \sigma_{s-2} + \sigma_{1-2} \cos \theta \tag{1.10}$$

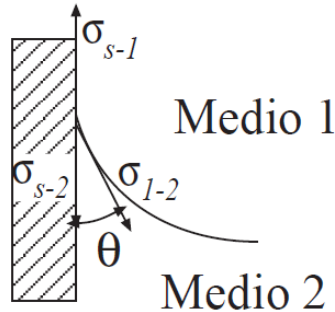


Figura 1. 8 Ángulos de contacto vaso de agua. Fuente [14]

Donde el ángulo de contacto θ es función de los tres medios en contacto: sólido, agua y aire; y de la temperatura. En el caso de que el medio 1 sea aire y el medio 2 un líquido, diremos que el líquido moja la pared en el caso de que $\theta < \pi/2$. El agua moja la mayoría de superficies sólidas, en el caso del mercurio ($\theta \approx 150^\circ$) en muchos casos. Es por ello que una gota de agua adquiere una forma distinta a la que adquiere una gota de mercurio del mismo volumen al depositarla sobre una superficie sólida

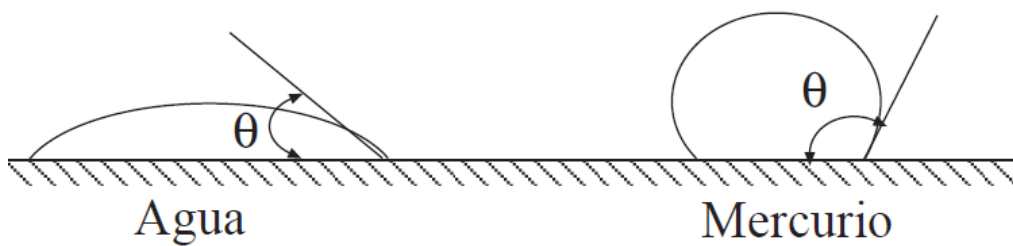


Figura 1. 9 Ángulos de contacto gotas de agua y de mercurio sobre superficie sólida. Fuente [14]

2. Descripción del problema

2.1 Formación de burbujas

Antes de pasar a desarrollar las características del proceso de formación de burbujas, debemos hacer una pequeña distinción dentro de los sistemas de contacto gas-líquido, y es que en este tipo de sistemas bifásicos hablamos de gotas cuando la fase dispersa es el estado líquido y de burbujas cuando la fase dispersa es el estado gaseoso.

La formación de gotas ha sido ampliamente estudiada en comparación con la formación de burbujas, ya que en esta última el fenómeno de colapso se produce a alta velocidad lo que implica que no podamos apreciar sus particularidades a simple vista, siendo necesaria la utilización de equipos específicos como cámaras de alta velocidad.

Existen numerosas técnicas para generar burbujas de tamaño reducido, como coflujo o flujos cruzados, sin embargo, la manera tradicional de generación de burbujas desde un orificio o inyector en el interior de un líquido en reposo continúa siendo extensamente utilizada, y además, sigue sin estar totalmente comprendida. La formación de burbujas en un inyector sumergido tiene varios regímenes como el burbujeo en cadena o el jetting. Estos regímenes de formación dependen de la geometría del inyector, el caudal de aire, las propiedades del sistema gas-líquido y de las fuerzas que actúan en él.

En el caso de formación de una única burbuja, la formación y el colapso de la burbuja producen una perturbación en el líquido de un volumen del orden del de la burbuja. El proceso de formación de burbujas está gobernado por muchas condiciones de operación diferentes como el caudal a través del inyector, el modo de operación o la condición estática o dinámica del líquido. También influyen las propiedades del líquido (viscosidad, densidad...) y la naturaleza de éste, que determinan el modo de formación y el correspondiente tamaño de la burbuja. En muchos casos, las propiedades del sistema bifásico y las dimensiones y material del inyector gobiernan las fuerzas que influyen en el proceso de formación. El caudal de gas a través del

inyector y el tamaño de éste tienen un efecto directo sobre la frecuencia de burbujeo. En algunas publicaciones como en [12], se señala la influencia de la mojabilidad del material, diferenciando incluso la geometría en la formación de la burbuja en caso de que la mojabilidad sea alta ($\theta_0 < 90^\circ$) o baja ($\theta_0 > 90^\circ$).

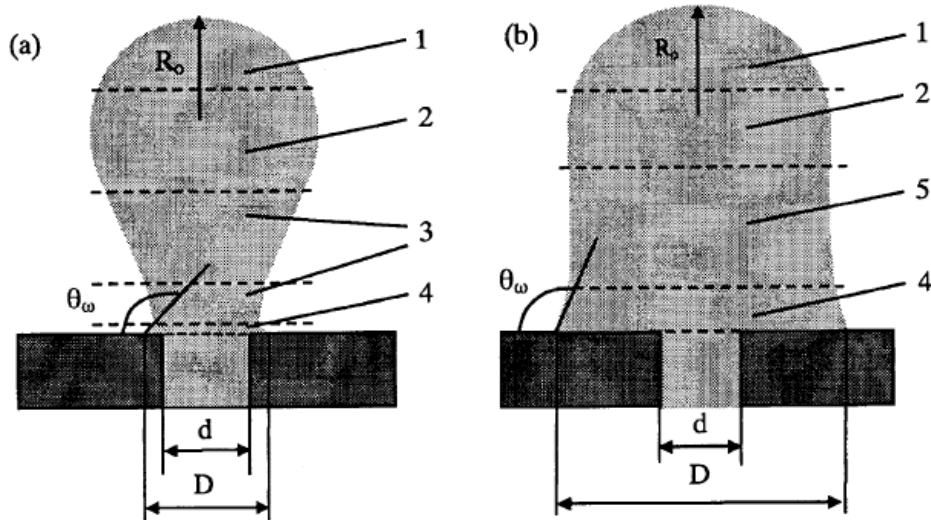


Figura 2. 1 Burbuja dividida geoméricamente: (1) Media esfera; (2) Zona esférica; (3) Tronco de cono invertido; (4) Tronco de cono; (5) Cilindro. (a) mojabilidad alta ($\theta < 90^\circ$) (b) mojabilidad baja ($\theta > 90^\circ$). Fuente [12]

En el colapso de una burbuja inmersa en un líquido de baja viscosidad, la tensión superficial queda en los instantes iniciales dominada por la inercia del líquido. No podemos por tanto, describir el fenómeno de colapso con una solución universal, debido a que en función de las condiciones iniciales o de los parámetros de control, el colapso puede producirse de forma simétrica o asimétrica como observamos en [2]. Además, cualquier posible asimetría inicial se mantiene hasta el colapso de la burbuja, lo que puede provocar que no exista simétrica axial, ya que pequeñas variaciones del inyector con respecto al eje vertical, hacen que la burbuja se desprenda de manera irregular, perdiendo dicha axil-simetría.

Con una ley potencial de la forma $R_0 \propto \tau^\alpha$ (donde τ es el tiempo hasta el pinch-off siguiente) podemos describir la evolución temporal del radio mínimo adimensional, R_0 , esta evolución es diferente según se trate de caso simétrico o asimétrico. En el caso de rotura simétrica, la dinámica del colapso viene determinada mediante un balance entre la aceleración radial del líquido y la succión producida por el flujo de aire

que pasa a través del cuello de la burbuja. Para el caso simétrico, el colapso está dominado solamente por la inercia del líquido y no existe flujo a través del cuello, el cual se va haciendo cada vez más esbelto conforme se aproxima al colapso, a diferencia del caso asimétrico. Existen varios estudios experimentales que obtienen un valor para el exponente un poco mayor a $1/2$, su valor exacto, sin embargo, depende de las condiciones iniciales y de la propia configuración del sistema. Esta variación de α también puede expresarse mediante una ley equivalente al caso asimétrico: $\tau \propto R_0^2 \exp(-\log(R_0^2))^{1/2}$ la aproximación a esta ley asintótica se cumple tan cerca del pinch-off que resulta muy difícil comprobarla mediante resultados experimentales.

Estas leyes asintóticas tienen otro inconveniente, la dinámica del gas siempre juega un papel determinante en los últimos instantes del pinch-off, independientemente de la razón de densidades gas-líquido, el principal efecto del gas es la generación de burbujas satélite cuyo tamaño depende del cociente de densidades del gas y de líquido.

En relación al tiempo de colapso, Thoroddsen et al. [18] proponen el tiempo capilar $t_\sigma^* = (\rho a^3 / \sigma)^{1/2}$, el proceso de colapso se puede describir como una consecuencia de la inestabilidad de Rayleigh del hilo de gas que conecta la burbuja con la boquilla inyectora.

Podemos destacar otros estudios previos relacionados con la formación de burbujas y la influencia de la línea de contacto, Gnyloskurenko et al. [11], profundizan en la influencia del ángulo estático llevando a cabo un estudio en el que utilizando diferentes recubrimientos y materiales ensayan un amplio rango de ángulos, con una instalación muy similar a la del presente proyecto, utilizan también una solución líquida de aluminio para el depósito además de agua. Apuntan como conclusión, que se obtienen resultados muy parecidos con ambos líquidos y sin embargo, si se observan importantes diferencias en función del ángulo estático escogido.

En [19], Vafaeli et al, estudian la formación de burbujas en el caso de un orificio del orden de $55 \mu\text{m}$, y bajo caudal de aire ($0.015 - 0.83 \text{ ml/min}$), y demuestran como en estas condiciones la modificación de la línea y el ángulo de contacto tienen un efecto directo en el volumen de la burbuja, más que pequeñas variaciones en el caudal.

En otros trabajos, como en [17], Snoeijer et al, se han centrado en la comprensión de los mecanismos físicos que influyen en la línea de contacto, concretamente en líquidos que se desplazan a lo largo de un medio sólido. Se discuten los procesos microscópicos que tienen efecto en la mojabilidad y se identifican las diferentes dinámicas de las regiones de las líneas de contacto móviles.

Otros autores como Thoroddsen et al. [18] también han profundizado en el problema de formación de burbujas, en concreto, ensayando como afecta el cambio de densidad del líquido, obteniendo resultados similares como podemos ver en la imagen 2.2.

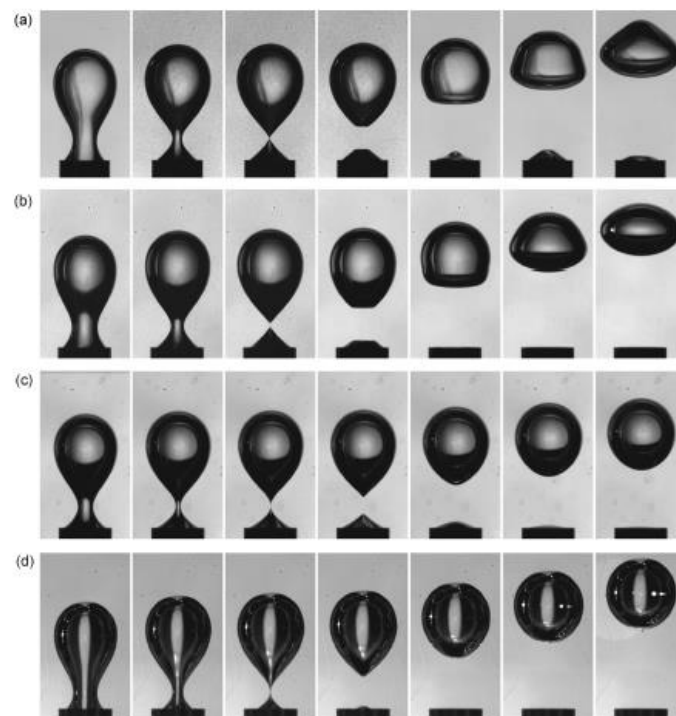


Figura 2. 2 Superficie de burbujas durante el "pinch-off" para líquidos con viscosidades diferentes: a) Agua b) 50% Glicerina c) 85% Glicerina d) 99% Glicerina. $D_i= 2.7mm$ y $D_o=3.14mm$. Fuente [18]

En otros trabajos como [9] y [6] podemos ver algunos estudios numéricos relacionados con formación de burbujas y comparaciones entre estudios numéricos y experimentales.

También es interesante destacar el procedimiento de otros estudios como [1] en los que se utiliza el análisis de imágenes para tratar la formación de burbujas como en el presente trabajo, pero generando un modelo 3D para estudiar sus propiedades como vemos en la figura 2.3.

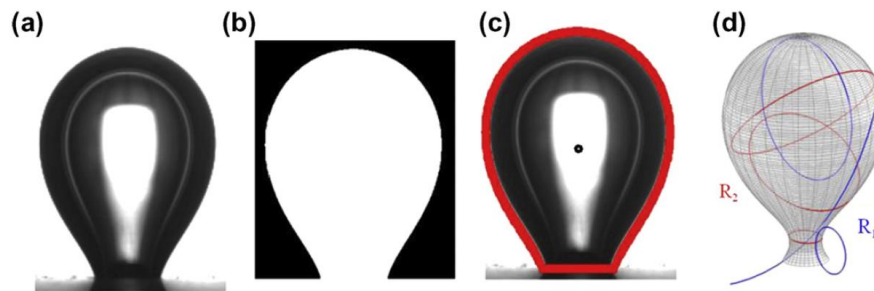


Figura 2. 3 Secuencia del análisis de imágenes: a) imagen en escala de grises, b) binarización, c) contorno, d) reconstrucción 3D. Fuente [1]

La formación de burbujas en un depósito de agua en reposo se da debido a la inyección de un gas a través de un orificio. La forma en la que está sumergido el inyector, el volumen de la cámara de alimentación, el diámetro del inyector y el material de éste y el tipo de alimentación tienen una influencia directa en el proceso.

2.2 Tipos de alimentación

Existen principalmente dos tipos de condiciones de alimentación en la formación de burbujas en un líquido en reposo: caudal constante y presión constante; aunque en los últimos años se han llevado a cabo investigaciones que demuestran la importancia de la cámara de alimentación como podemos ver en [5], y debido a la influencia de ésta surge una nueva condición de ensayo mixta.

Con la configuración de presión constante, el gas antes de entrar al inyector se mantiene en una cámara a la misma presión durante el período de formación debido al gran tamaño de ésta. En este caso el caudal de gas a través de la aguja varía durante la formación. Se define el proceso de formación de burbujas en dos etapas,

al igual que en caso de caudal constante, aunque para estas condiciones el caudal a través del inyector no sea constante. El caudal varía a medida que avanza la formación de la burbuja en dos etapas. En la primera etapa, el volumen de la burbuja varía con el caudal a través del inyector. En la segunda etapa, el caudal es constante a través de la aguja e igual al caudal final de la primera fase. El volumen final de la burbuja se obtiene sumando el volumen de la primera etapa con el volumen de la segunda.

En el proceso de formación de una burbuja a caudal constante podemos distinguir dos etapas como vemos en la figura 2.4. La primera, una etapa de expansión en la que la burbuja crece axial y radialmente hasta que transcurrido un tiempo, comienza a aparecer un estrechamiento en la interfase que denominamos como "cuello". A partir de aquí comienza la etapa de colapso, la burbuja rompe normalmente por esta zona de radio mínimo que se estrecha con el paso del tiempo, dividiendo la burbuja en dos partes que se separan finalmente en el instante de rotura, denominado "pinch-off". Como podemos ver en [2] y [12] llamamos tiempo de burbujeo al tiempo total que abarca a ambas fases.

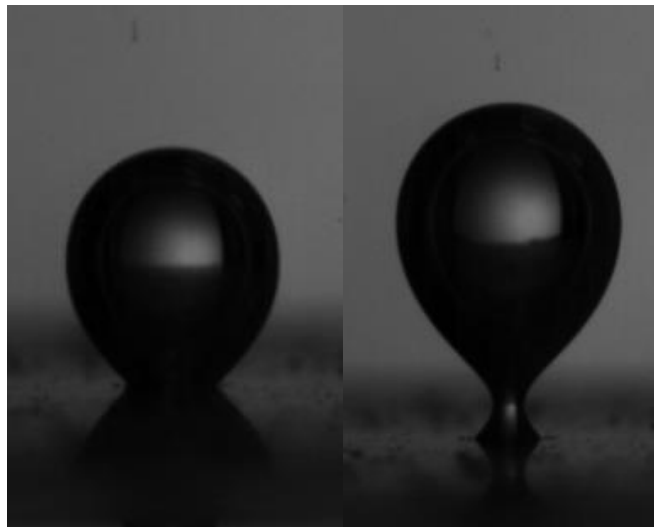


Figura 2. 4 Etapa expansión y colapso condiciones caudal constante

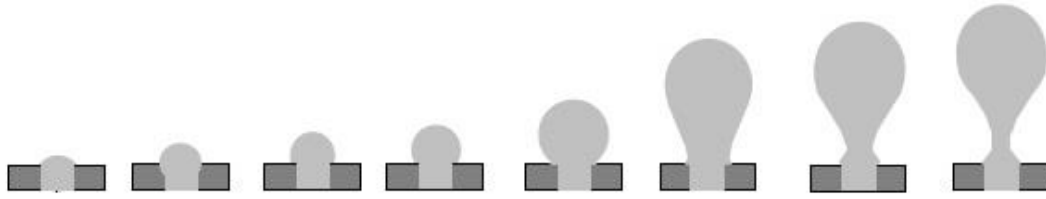


Figura 2. 5 Vista general de las etapas de formación de una burbuja en un orificio con $\theta_0 < 90$. Fuente [12]

La condición de alimentación mixta es la opción menos estudiada, a pesar de que está presente en numerosos procesos industriales. La formación de burbujas en este caso es un poco más compleja que en las dos configuraciones anteriores. Las fluctuaciones de presión son del orden de las caídas de presión a lo largo del circuito de gas y por tanto el caudal de alimentación varía con el tiempo, impidiendo la generación controlada de burbujas de un tamaño determinado.

Para lograr esta alimentación mixta, se coloca una cámara de alimentación de gas justo antes del orificio o la tobera. Con esta configuración, el volumen de la cámara de gas V_c tiene una notable influencia en el proceso cuando el caudal y la presión no son constantes.

Park et al. [16], diferenciaron distintos regímenes de formación en función del volumen de la cámara de gas: Cámaras pequeñas, en las que el volumen de la burbuja no depende del volumen de la cámara; cámaras medianas, donde el volumen de la burbuja y de la cámara son linealmente dependientes; y cámaras grandes, en las que el volumen de la burbuja no depende del volumen de la cámara y cuyo límite son las condiciones de presión constante.

Las cámaras de gas se pueden clasificar en función del número adimensional de la capacidad N_c definido por Hughes et al. [13], como:

$$N_c = \frac{g(\rho_t - \rho_0)V_c}{\pi a^2 \rho_0 c^2} = \frac{g(\rho_t - \rho_0)V_c}{\pi a^2 \gamma P_m} \quad (2.1)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, c es la velocidad del sonido, ρ_t la densidad del líquido, ρ_0 la densidad del gas a temperatura ambiente, γ la proporción

de calores específicos (coeficiente politrópico), a el radio del orificio y P_m la presión media absoluta dentro de la cámara. Este número adimensional define la relación entre el volumen real de la cámara y el volumen de la cámara correspondiente a la transición entre la región de cámaras pequeñas y medianas [16]. Así, para valores de $N_c \leq 1$ nos encontramos en la región de cámara pequeña, y en la región de cámara grande para $N_c \geq 10$, siendo determinado el valor exacto por el radio del inyector, las propiedades físicas o la presión en la superficie del líquido.

La formación de burbujas desde un orificio que separa un depósito de agua de una cámara de gas se puede describir como un proceso de dos etapas: etapa de espera y etapa de formación. La de espera comienza, cuando se desprende la burbuja anterior y finaliza cuando la nueva burbuja empieza a crecer. Además, la presión en el interior de la cámara de gas crece durante esta etapa hasta que la burbuja se empieza a formar, y disminuye cuando la burbuja empieza a aumentar durante la etapa de formación. Estas variaciones de presión que tienen lugar dentro de la cámara de gas se suelen utilizar para describir el proceso de formación y se miden normalmente con la ayuda de transductores de presión.

2.3 Parámetros del problema y análisis dimensional

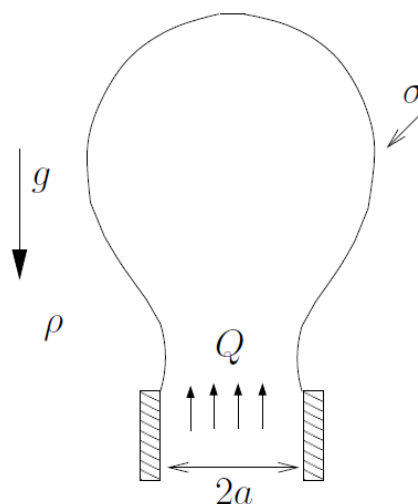


Figura 2. 6 Esquema de la burbuja con las variables relevantes

El análisis dimensional nos permite simplificar problemas físicos para facilitar su resolución. Intentamos estudiar las relaciones entre las diferentes variables de estudio

para establecer cuales son más importantes y abreviar desde el punto de vista matemático nuestro problema.

Para aplicarlo, tenemos que fijar primero las variables y los parámetros que intervienen:

- El tamaño de la burbuja, que lo podemos caracterizar por una longitud (a) que hace referencia al radio de cada una de las circunferencias en las que dividimos el volumen de la burbuja a lo largo del eje vertical
- Las propiedades físicas del fluido: la densidad (ρ) y la viscosidad (μ)
- La tensión superficial (σ)
- La gravedad (g)

El parámetro que nos interesa conocer es el caudal, Q . Que depende de las variables definidas anteriormente.

Aplicamos entonces, el teorema Π de Buckingham a la siguiente relación

$$Q = f(\rho, \mu, \sigma, g, a) \quad (2.2)$$

Construimos la matriz dimensional y evaluamos su rango, la diferencia entre el número de variables y el rango nos proporciona la cantidad de números adimensionales.

	Q	ρ	μ	σ	g	a
M	0	1	1	1	0	0
L	3	-3	-1	0	1	1
T	-1	0	-1	-2	-2	0

Tabla 2. 1 Descomposición de las variables del problema en magnitudes fundamentales

El rango de la matriz es 3, por tanto, obtenemos $6 - 3 = 3$ números adimensionales. Elegimos tres variables dimensionalmente independientes, una que

haga referencia a la geometría de la burbuja (a), otra a sus propiedades físicas (ρ) y la tensión superficial (σ)

	Π_Q	Π_ρ	Π_μ	Π_σ	Π_g	Π_a
	Q	ρ	μ	σ	g	a
M	0	1	1	1	0	0
L	3	-3	-1	0	1	1
T	-1	0	-1	-2	-2	0

Tabla 2. 2 Variables seleccionadas para el análisis dimensional

Calculamos ahora los diferentes Π ;

Caudal

$$\Pi_Q = \frac{Q}{\rho^x \sigma^y a^z}$$

Resolvemos el sistema de ecuaciones obtenido del siguiente producto matricial, para obtener el valor de los subíndices x,y,z.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$x + y = 0$$

$$-3x + z = 3$$

$$-2y = -1$$

$$x = -\frac{1}{2}; y = \frac{1}{2}; z = \frac{3}{2}$$

Por tanto el número adimensional del caudal sería

$$\Pi_Q = \frac{Q}{\rho^{-1/2} \sigma^{1/2} a^{3/2}} \quad (2.3)$$

Si elevamos a 2 numerador y denominador obtenemos:

$$\Pi_Q = \frac{\rho Q^2}{\sigma a^3} = \textit{Weber} \quad (2.4)$$

Viscosidad

$$\Pi_\mu = \frac{\mu}{\rho^x \sigma^y a^z}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$x + y = 1$$

$$-3x + z = -1$$

$$-2y = -1$$

$$x = \frac{1}{2}; y = \frac{1}{2}; z = \frac{1}{2}$$

Por tanto el número adimensional de la viscosidad sería:

$$\Pi_\mu = \frac{\mu}{\rho^{1/2} \sigma^{1/2} a^{1/2}} = \frac{\sqrt{\rho \sigma a}}{\mu} = \textit{Re} \quad (2.5)$$

Que es el número de Reynolds expresado con la tensión superficial, sabiendo que:

$$v_\sigma = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho a}} \quad (2.6)$$

Obtendríamos el número de Reynolds en su forma más habitual:

$$Re = \frac{\rho v_{\sigma} a}{\mu} \quad (2.7)$$

Gravedad

$$\Pi_g = \frac{g}{\rho^x \sigma^y a^z}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}$$

$$x + y = 0$$

$$-3x + z = 1$$

$$-2y = -2$$

$$x = -1; y = 1; z = -2$$

Por tanto el número adimensional de la gravedad sería:

$$\Pi_g = \frac{g}{\rho^{-1} \sigma^1 a^{-2}} = \frac{\rho g a^2}{\sigma} = Bond \quad (2.8)$$

Una vez declarados todos los parámetros adimensionales tenemos:

$$We = f(Re, Bo) \quad (2.9)$$

Como $Re \gg 1$ lo podemos despreciar en este problema y nos quedaría

$$We = f(Bo) \quad (2.10)$$

O lo que es lo mismo

$$Bo = f(We) \quad (2.11)$$

Dentro de la formación de agua en reposo, definimos la velocidad capilar U_c como el cociente entre las fuerzas de inercia y las de tensión superficial.

$$U_c = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho a}} \quad (2.12)$$

Trabajamos en condiciones cuasi-estáticas $U_c \gg U_g = \frac{Q}{\pi a^2}$ es decir, las fuerzas inerciales tienen una influencia tan pequeña que podemos despreciarlas y la burbuja se separará cuando las fuerzas de flotabilidad superen a las fuerzas superficiales, como se justifica en [3]; esta manera es la más clásica y sencilla de trabajar en la generación de burbujas, ya que simplifica el número de variables implicadas y nos permite ver de forma más clara el efecto que tiene la modificación de otros parámetros como por ejemplo la línea de contacto en nuestro problema.

Dicho de otra manera, siempre trabajamos por debajo del We_c (Weber crítico), de manera que podemos despreciar también We dependiendo nuestro problema exclusivamente del Bo .

Esto lo vemos desarrollado en [15], este caudal crítico se puede calcular en términos de nuestros parámetros de control, We_c mediante la siguiente expresión:

$$We_c = (16/3)^{1/3} Bo^{-2/3} \quad (2.13)$$

Por debajo de este valor crítico, el volumen de la burbuja formada se mantiene constante; dado un radio de inyector, este volumen en el punto crítico se conoce como *volumen de Fritz* V_F , que se obtiene a partir del balance entre flotabilidad y tensión superficial:

$$V_F = \frac{2\pi\sigma a}{\rho g} \quad (2.14)$$

La formación cuasi-estática se comprobará también mediante el posterior procesamiento de imágenes como veremos más adelante. Utilizaremos el volumen final de la burbuja para comprobar que efectivamente a medida que aumenta el caudal de gas, el volumen permanece constante e igual al volumen de Fritz hasta llegar al caudal crítico, Q_c . En la gráfica 2.7 aparecen los datos experimentales obtenidos en Bolaños-Jiménez [2] junto con los datos numéricos de Oguz & Prosperetti [15]

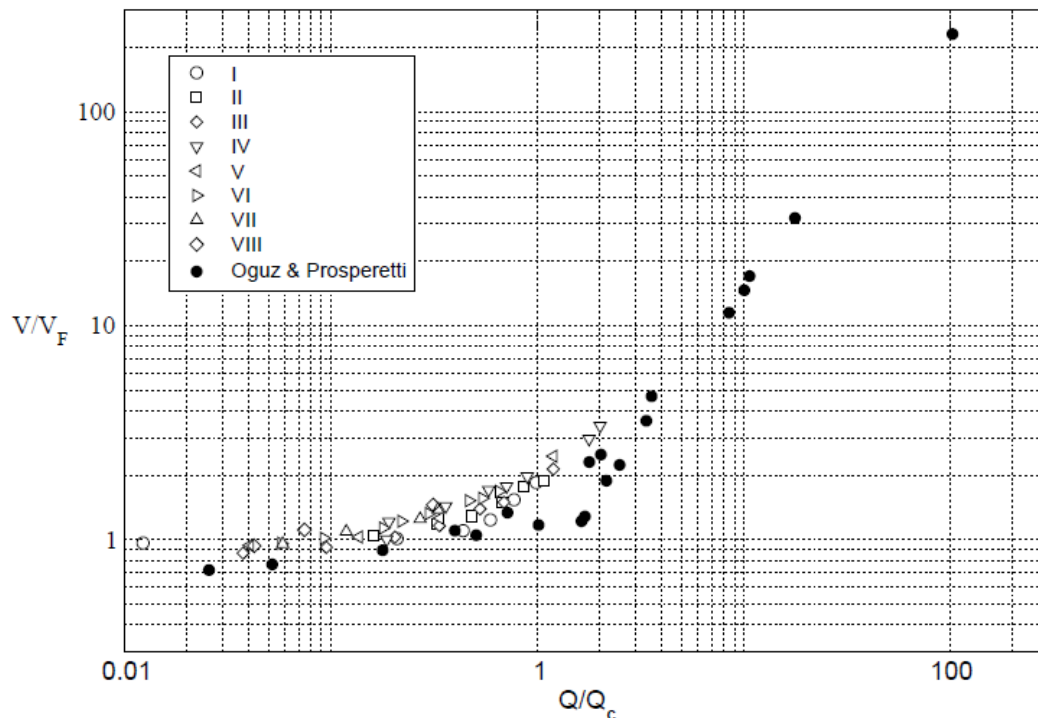


Figura 2. 7 Relación entre el volumen final de la burbuja con el volumen de Fritz frente a la relación del caudal de gas con el caudal crítico. Datos experimentales obtenidos de [2] para cada uno de los inyectores (símbolos transparentes) y los tomados de [15] (símbolos oscuros).

En los que se puede comprobar que el volumen es prácticamente constante o como mucho el cociente entre el volumen final y el volumen de Fritz llega a 2, hasta el caudal crítico.

3. Trabajo experimental

3.1 Descripción de la instalación experimental

La instalación experimental consta de un depósito con agua en reposo, con un orificio en su parte inferior a través del cual inyectamos el gas (aire).

La trayectoria del gas es la siguiente: Partimos de una instalación de aire a presión a la cual nos conectamos y llegamos hasta un manómetro regulador que nos permite ajustar la presión que queremos a la entrada del proceso que marcaremos en todos los casos a 4 bares, seguidamente nos encontramos con una válvula para regular el paso de caudal y un caudalímetro para comprobar este último, y antes de llegar al orificio del depósito de agua tenemos un tubo capilar que aumenta las pérdidas de carga, asegurando así que el caudal de aire que entra al depósito es constante, hecho que comprobaremos también al realizar el análisis de imágenes.

Es imprescindible para la correcta consecución del experimento que no se produzca ninguna entrada de agua en la trayectoria del gas a lo largo de la instalación.

Aquí vemos un esquema general de la instalación:

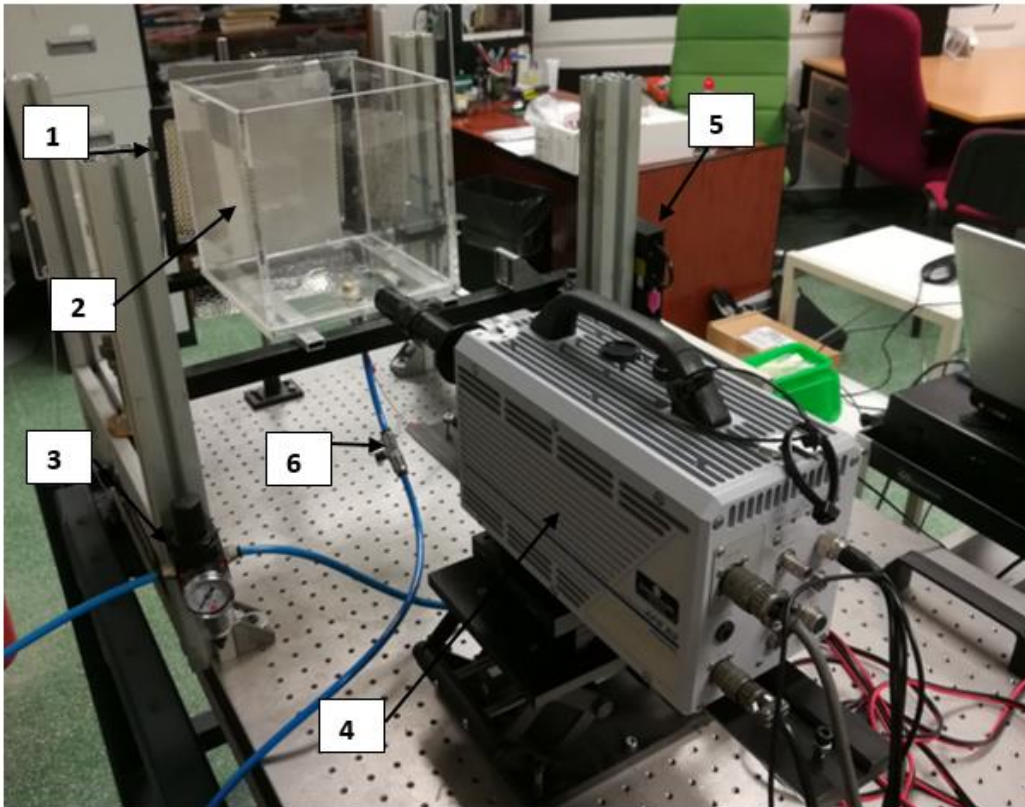


Figura 3. 1 Instalación experimental (1)

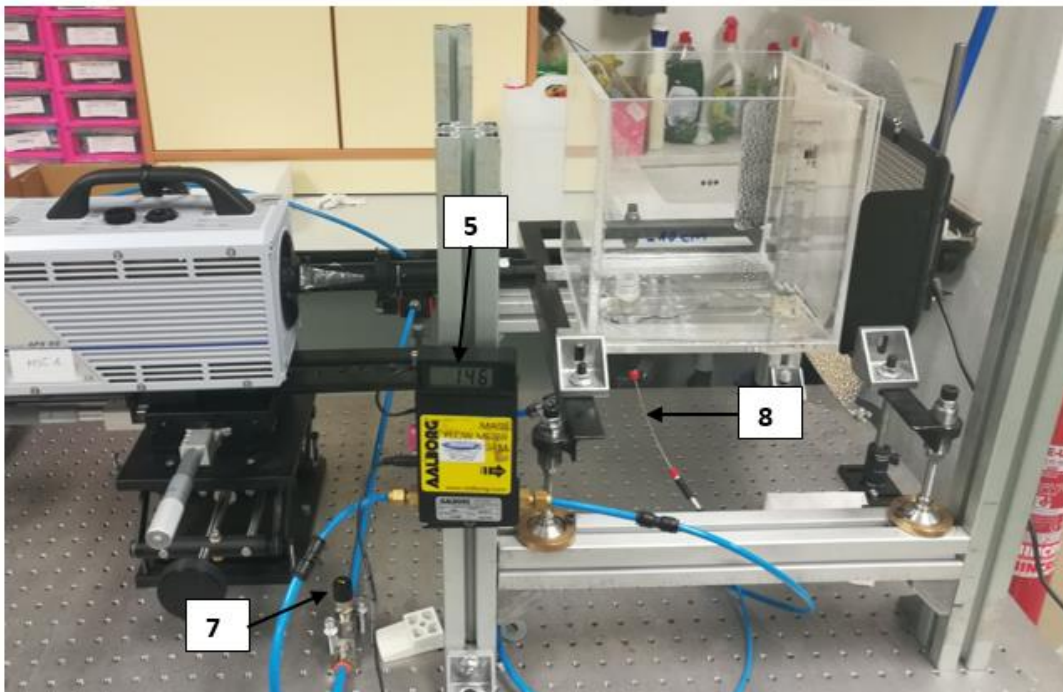


Figura 3. 2 Instalación experimental (2)

En las dos imágenes anteriores podemos distinguir las siguientes partes:

1) Panel de iluminación led, 2) Depósito, 3) Manómetro, 4) Cámara de alta velocidad, 5) Caudalímetro, 6) Válvula de descarga, 7) Válvula reguladora de caudal de aire, 8) Tubo capilar.

Vemos en detalle cada uno de los elementos:

Panel de iluminación led: De la marca Yongnuo con una potencia de 36 W.

Depósito: De metacrilato, totalmente transparente para no contaminar la obtención de imágenes.

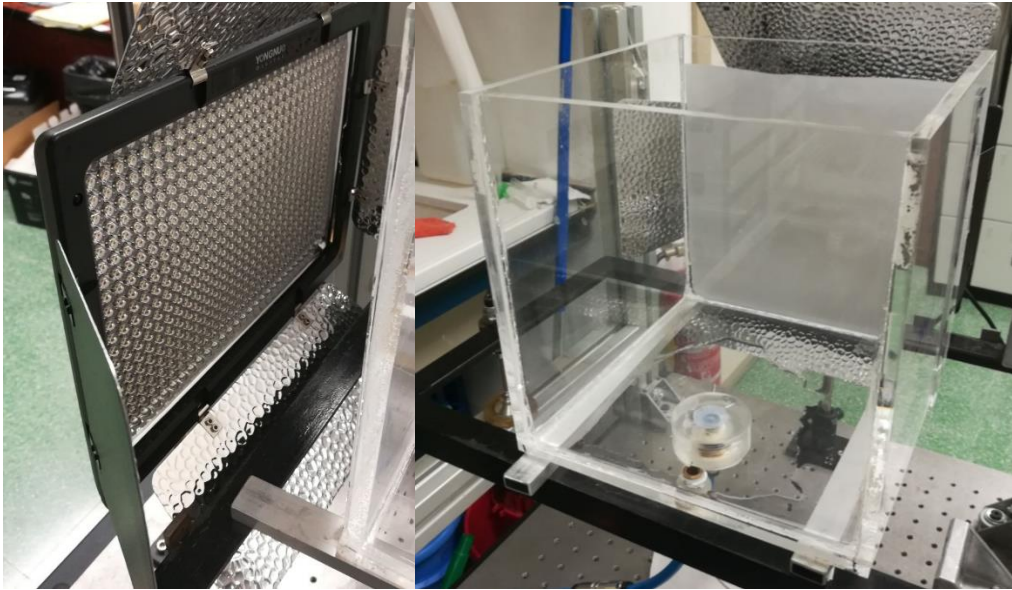


Figura 3. 3 Panel de iluminación led y depósito

Manómetro: De la marca Asp con un rango de medida de 0 a 10 bares.

Caudalímetro: de la marca Aalborg, modelo GFM17 con un rango de medida de 0 a 250 ml/min

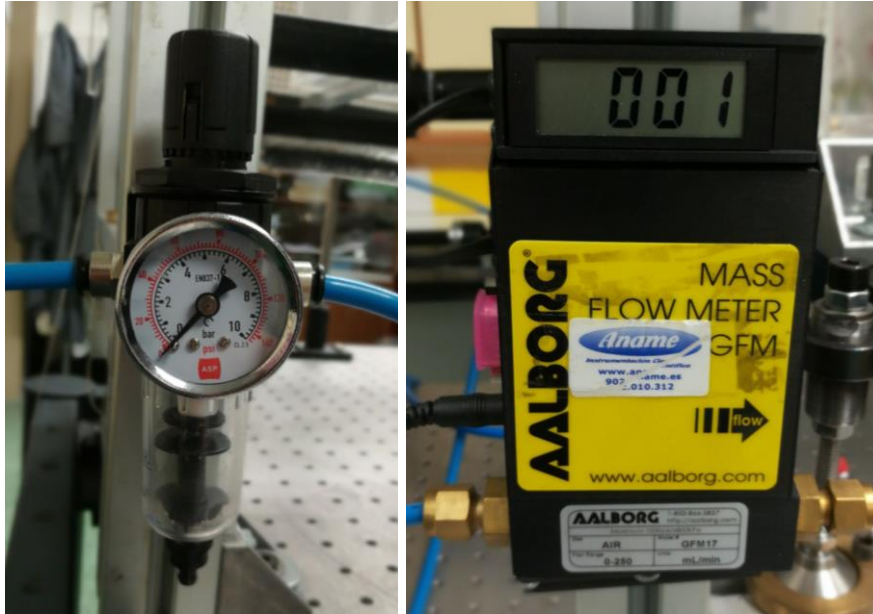


Figura 3. 4 Manómetro y caudalímetro

Cámara de alta velocidad: De la marca Photron, modelo APX-RS, capaz de capturar videos a 250000 imágenes por segundo (frames per second, fps) y que tiene una resolución máxima de 1024 x 1024 pixels, con una lente de la marca Edmund industrial optics, que consiste esencialmente en un microscopio de larga distancia focal y que proporciona una buena resolución. Como la profundidad de campo de la lente y el área a enfocar son especialmente pequeñas, se ha dotado a la cámara de un sistema posicionador micrométrico en los tres ejes que describiremos mas adelante en la metodología de obtención de resultados.



Figura 3. 5 Cámara de alta velocidad (1)



Figura 3. 6 Cámara de alta velocidad (2)

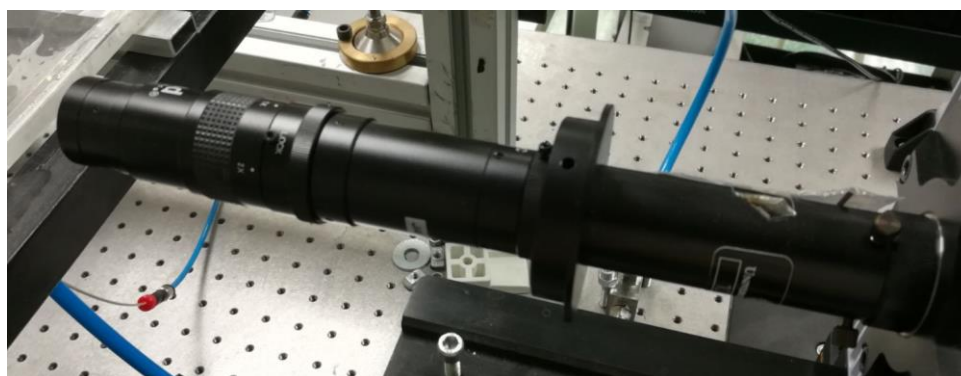


Figura 3. 7 Lente

Válvula reguladora de caudal de aire: Para controlar el caudal de entrada.

Tubo capilar: Imprescindible para introducir una pérdida de carga alta de manera que el crecimiento de la burbuja sea a caudal constante.

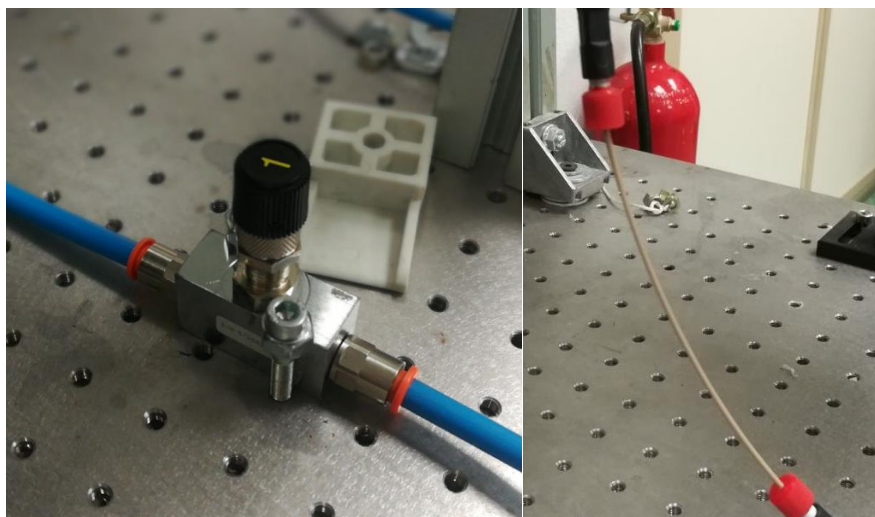


Figura 3. 8 Válvula y tubo capilar

Terminamos este apartado con una imagen de un experimento en curso, como puede apreciarse es necesaria una gran cantidad de intensidad lumínica.

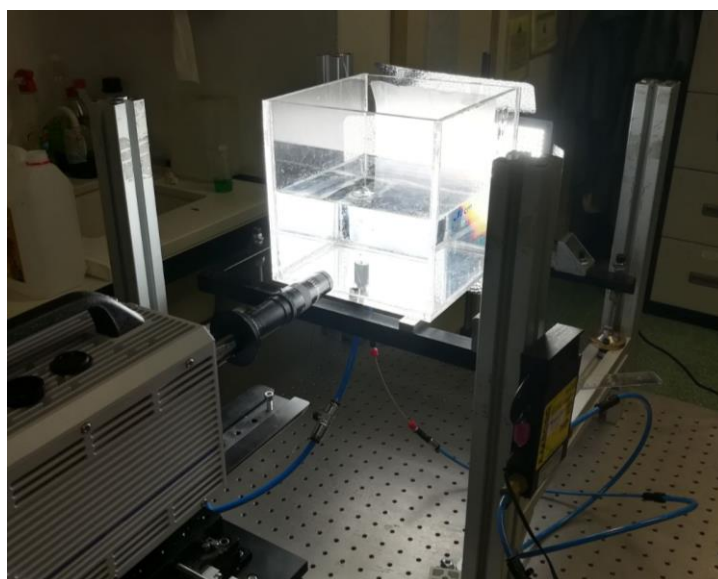


Figura 3. 9 Experimento en curso

3.2 Metodología de obtención de resultados

El primer paso, antes de comenzar con el procedimiento de medida, es comprobar que la instalación está correctamente nivelada. Posteriormente ponemos en funcionamiento el circuito de gas explicado anteriormente.

Antes de llenar el depósito de agua debemos seleccionar la tobera o el orificio que vamos a ensayar y roscarlo a la salida de la instalación de aire como vemos en la imagen 3.10.



Figura 3. 10 Salida del aire donde situamos la tobera o el orificio

Añadimos, como puede apreciarse, una arandela de goma al fondo del depósito para evitar fugas de agua.

Es importante destacar que al elemento que roscamos a la salida del aire, le añadimos un trozo de gomaespuma con forma cilíndrica (como podemos ver en la siguiente imagen) para aumentar las pérdidas de carga y asegurar que el caudal es constante. A la hora de colocarlo es imprescindible comprobar que no quede ningún hueco con un volumen comparable al de la burbuja formada, ya que puede hacer de cámara y por tanto el suministro de caudal no sería constante.



Figura 3. 11 Gomaespuma en tobera

Llenamos el depósito con agua destilada y ponemos en funcionamiento la cámara y el software de adquisición de datos.

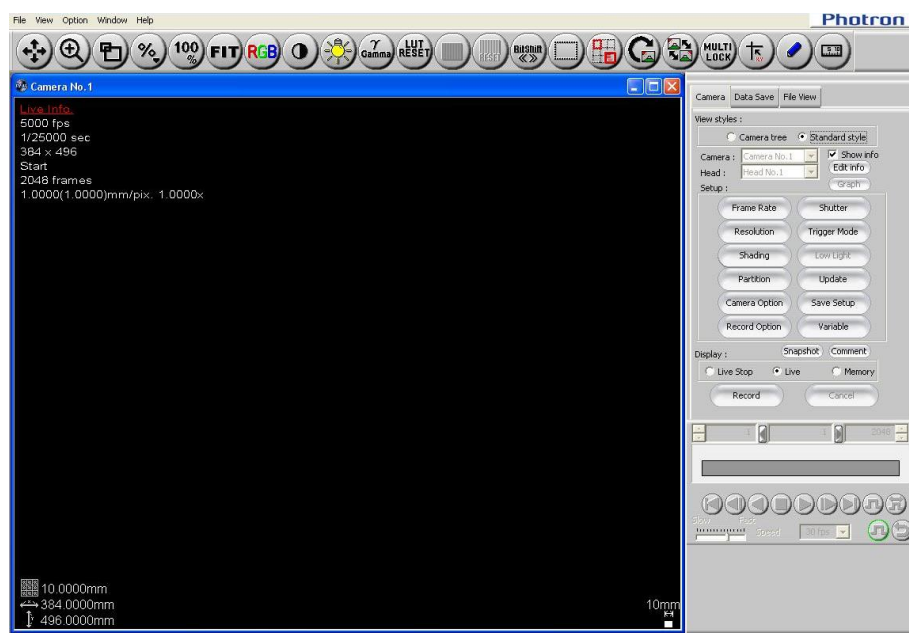


Figura 3. 12 Menú principal programa "fastcam" con el que realizamos los videos

Antes de comenzar a capturar los videos, tenemos que ajustar una serie de parámetros.

En primer lugar, debemos ajustar la intensidad de la luz que tenemos al fondo de la instalación. Una cantidad elevada de lúmenes es crucial para obtener un buen contraste blanco-negro y obtener buenos resultados en el análisis de imágenes.

Posteriormente debemos enfocar manualmente la cámara con los reguladores manuales que vemos marcados en la imagen 3.13. La distancia focal de la lente utilizada es muy concreta, de manera que es importante tener una imagen bien enfocada para sacarle el máximo rendimiento al equipo de alta precisión utilizado.

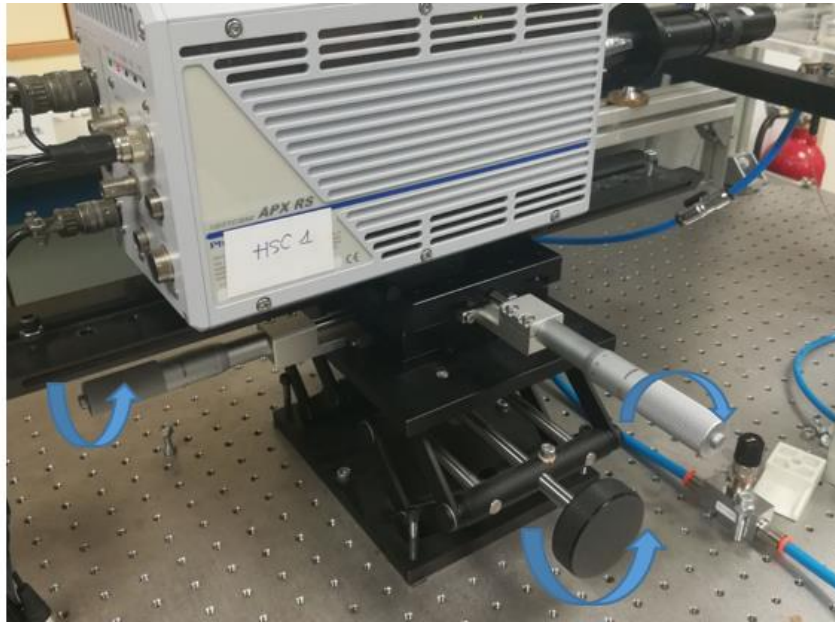


Figura 3. 13 Reguladores manuales en tres direcciones

Establecemos la resolución y los “frames por segundo” a los que vamos a grabar nuestro video y calibramos digitalmente la imagen a través del programa. Finalmente, ajustamos con la válvula reguladora el caudal al que vamos a realizar el experimento.

Vemos ahora de una manera más precisa, como se lleva a cabo el proceso de adquisición de imágenes.

Con las resoluciones habituales y grabando entre 5000 y 10000 fps, la memoria de la cámara se llena en aproximadamente un segundo, tiempo que aunque a priori puede parecer poco es suficiente para los requerimientos de nuestro experimento. Después, con el propio editor de video del programa, seleccionamos el número de frames que deseemos y guardamos el video. Utilizamos un disco duro externo para recopilar los videos, ya que éstos ocupan bastante espacio.

Antes de dar por bueno el experimento y pasar a guardar el video, comprobamos que el experimento es válido grabando otro video y midiendo el tiempo que transcurre de “pinch-off” a “pinch-off” para corroborar que el tiempo de burbujeo es el mismo.

3.3 Pruebas preliminares

Hemos llevado a cabo numerosas pruebas con diferentes materiales y recubrimientos que si bien han quedado fuera de los resultados finales, merecían ser comentados por su importancia a nivel experimental ya que nos han ayudado a entender mejor la dinámica de formación de burbujas y la relevante cantidad de tiempo de laboratorio que han supuesto.

Hemos realizado ensayos con inyectores de acero, latón y bronce. Obteniendo resultados muy parecidos entre ellos, sin observar una clara influencia en la línea de contacto.



Figura 3. 14 Algunos de los inyectores ensayados

También, hemos utilizado diferentes recubrimientos hidrofóbicos en inyectores de acero, como por ejemplo, TFCF de la marca Electrolube. Desafortunadamente no hemos apreciado un cambio significativo en la línea de contacto en contra de lo que vaticinaban algunas pruebas llevadas a cabo con gotas de agua sobre superficies con este recubrimiento.



Figura 3. 15 TFCF

3.4 Experimentos finales

Son ocho los experimentos que hemos analizado. Un orificio y dos toberas de PMMA (metacrilato), un orificio y una tobera de teflón, un orificio y una tobera de PMMA con un recubrimiento de vaselina, y también hemos analizados un orificio de PMMA con un recubrimiento denominado "Neverwet". De manera que tenemos experimentos con un ángulo estático (θ_0) por debajo de 90 grados (PMMA), con un ángulo de 90 (vaselina), y superior a 90: aproximadamente 120 (teflón) y entre 160 y 175 (Neverwet).

Hemos ensayado tres caudales diferentes de cada material y elemento: 20, 40 y 60 ml/min, en todos los casos por debajo del caudal crítico como vemos en la tabla 3.2, y dentro de cada caudal, hemos realizado dos tipos de videos, uno a 10000 fps y con 1 evento, es decir, la formación de una burbuja completa, desde el "pinch-off" de la burbuja anterior hasta el colapso de ésta. Y otro a 5000 fps y abarcando 5 eventos, lo que hacen un total de 44 videos. La resolución de todos los videos es de 512x512.



Figura 3. 16 Orificio PMMA, $D_i = 1 \text{ mm}$; Tobera PMMA, $D_i = 1 \text{ mm}$ y Tobera PMMA, $D_i = 3 \text{ mm}$



Figura 3. 17 Orificio Teflón, $D_i = 1 \text{ mm}$ y Tobera Teflón, $D_i = 1 \text{ mm}$

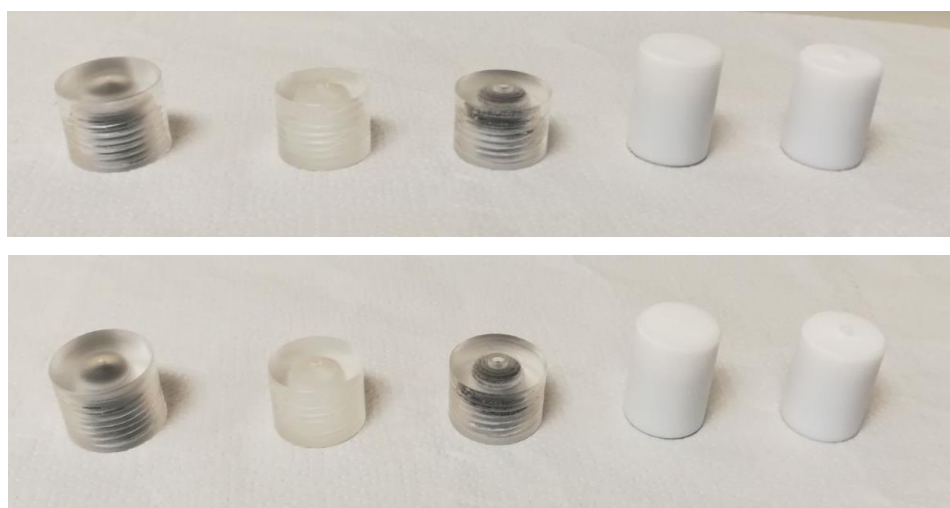


Figura 3. 18 Orificios y toberas utilizados

Inyectores	Caudal (ml/min)	Frames per second	Nº experimento
Orificio PMMA Di = 1 mm	20	10000	1
		5000	2
	40	10000	3
		5000	4
	60	10000	5
		5000	6
Tobera PMMA Di = 1 mm	20	10000	7
		5000	8
	40	10000	9
		5000	10
	60	10000	11
		5000	12
Tobera PMMA Di = 3 mm	20	10000	13
		5000	14
	40	10000	15
		5000	16
	60	10000	17
		5000	18
Orificio teflón Di=1 mm	20	10000	19
		5000	20
	40	10000	21
		5000	22
	60	10000	23
		5000	24
Tobera teflón Di = 1 mm	20	10000	25
		5000	26
	40	10000	27
		5000	28
	60	10000	29
		5000	30
Orificio PMMA Di = 1 mm + Vaselina	20	10000	31
		5000	32
	40	10000	33
		5000	34
	60	10000	35
		5000	36
Tobera PMMA Di = 1 mm + Vaselina	20	10000	37
		5000	38
	40	10000	39
		5000	40
	60	10000	41
		5000	42
Orificio PMMA + Neverwet	20	10000	43
		5000	44

Tabla 3. 1 Experimentos realizados

	<i>Inyector</i>	<i>Comportamiento línea de contacto</i>	<i>Radio interno (mm)</i>	<i>Caudal crítico "Qc" (ml/min)</i>
1	Orificio PMMA Di=1 mm	Dentro y fija	0.5	72.9
2	Tobera PMMA Di = 1 mm	Dentro y fija	0.5	72.9
3	Tobera PMMA Di=3 mm	Dentro y fija	1.5	182.2
4	Orificio teflón Di=1 mm	Fuera y fija	0.5	72.9
5	Tobera teflón Di=1 mm	Móvil y asimétrica	0.5	72.9
6	Orificio PMMA Di=1 mm + Vaselina	Móvil y asimétrica	0.5	72.9
7	Tobera PMMA Di = 1 mm + Vaselina	Móvil y asimétrica	0.5	72.9
8	Orificio PMMA Di=1 mm + Neverwet	Móvil	0.5	72.9

Tabla 3. 2 Comportamiento línea de contacto experimentos

4. Procesado de imágenes

El proceso de imágenes con Matlab es una parte imprescindible de nuestro proyecto, ya que nos permite cuantificar y representar los resultados obtenidos de las medidas de laboratorio.

Pasamos a explicar el funcionamiento de cada uno de los programas, lo haremos con un diagrama de bloques, de manera que podamos entender con claridad los diferentes pasos de la rutina.

Nuestro algoritmo se compone de cuatro bloques, "Volumen", el programa principal para calcular el volumen y otros parámetros de la burbuja; "Depura contorno", para dirimir el contorno correcto de entre todos los que Matlab detecta; "Grabit", función obtenida de www.mathworks.com para obtener las coordenadas exactas de puntos seleccionados en una imagen y "Calibrador", programa que recibe los puntos obtenidos en "Grabit" para poder establecer la relación Pixel/milímetro que introduciremos en "Volumen".

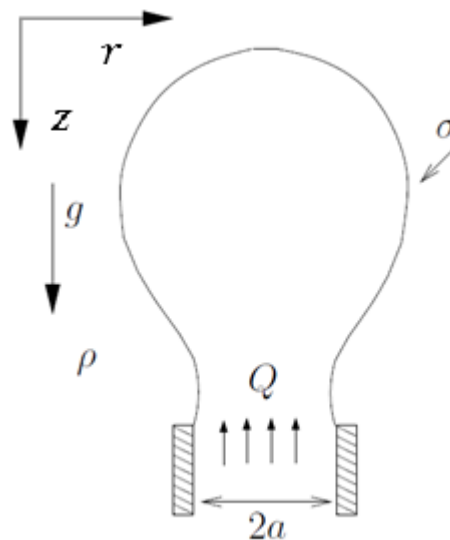
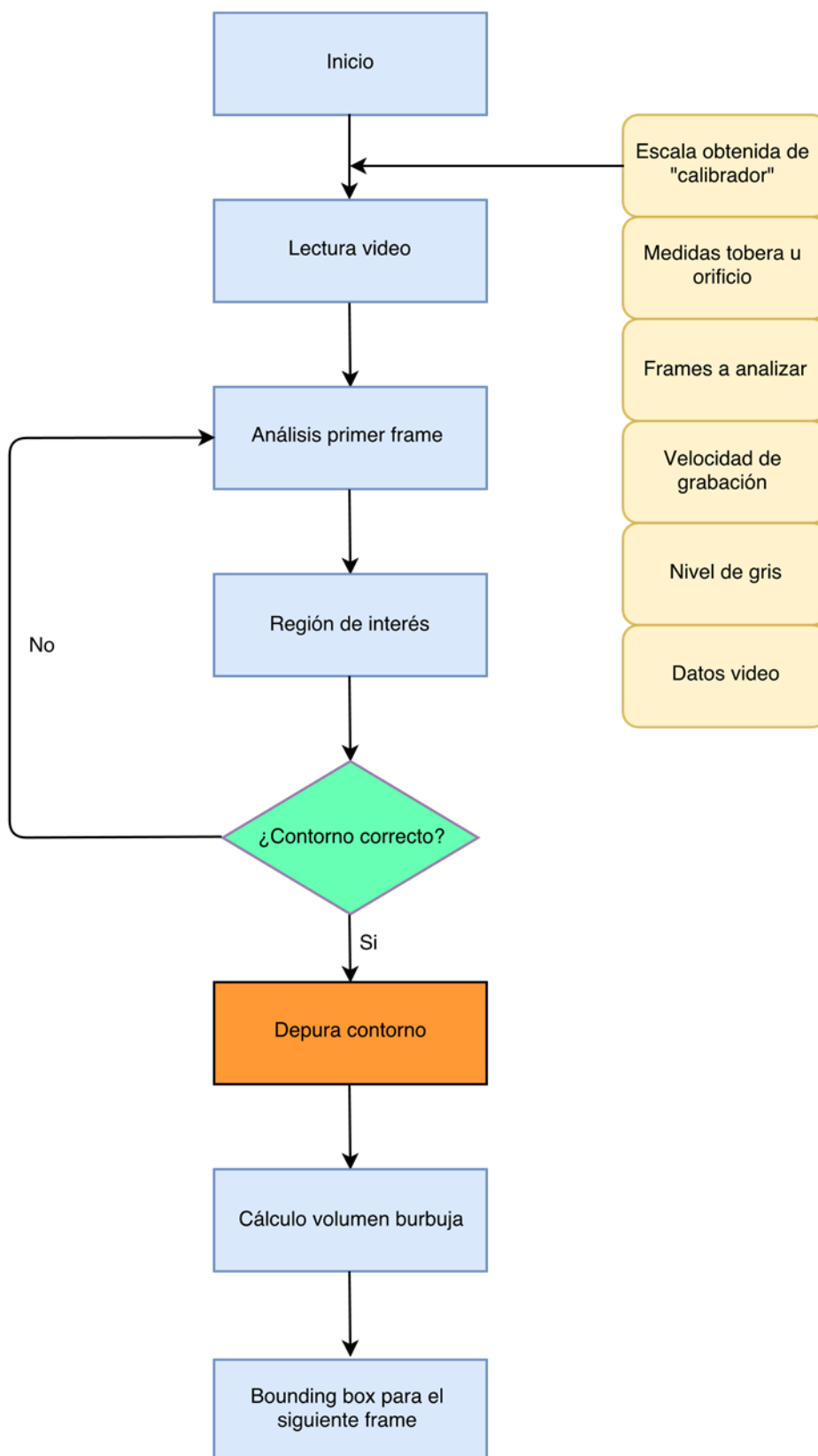
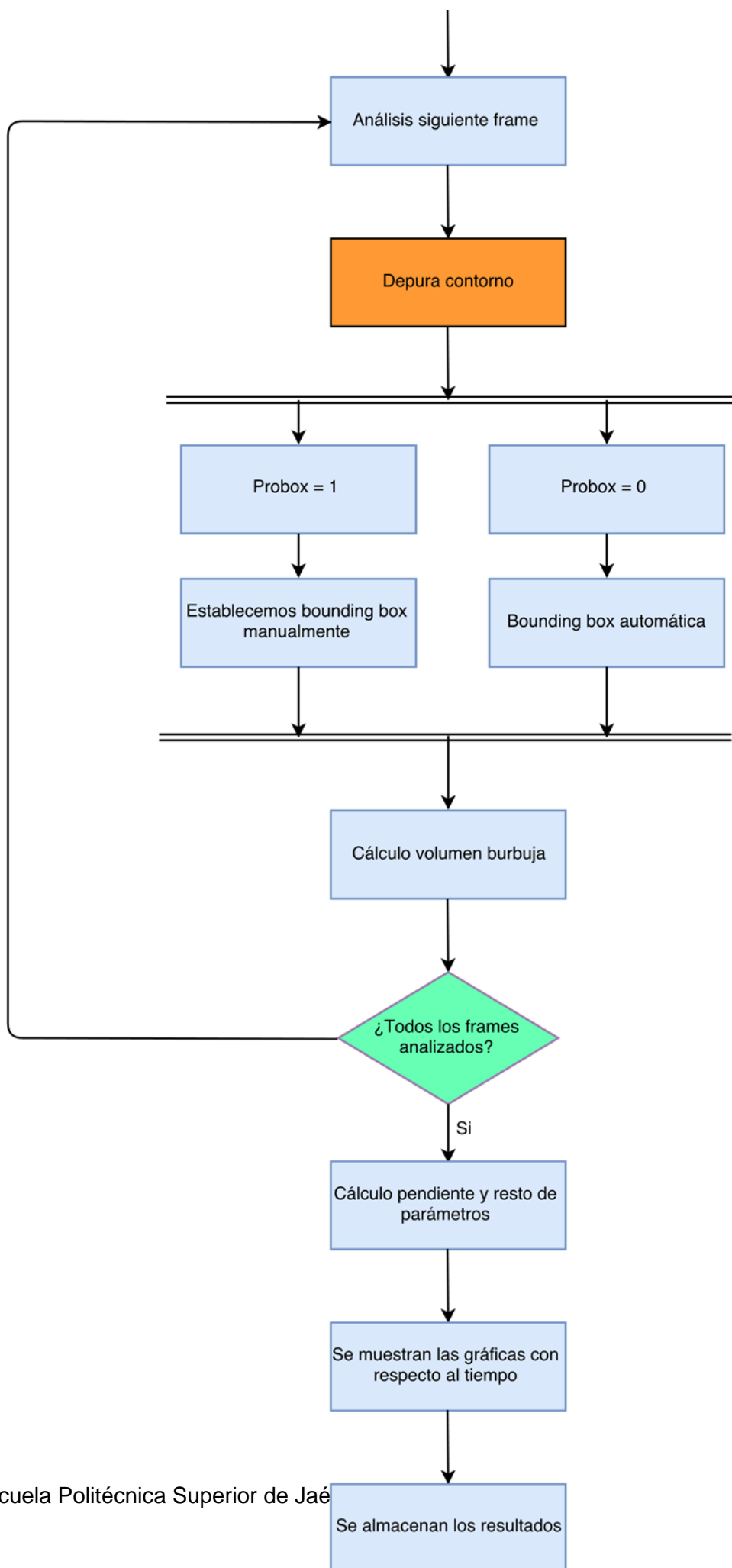


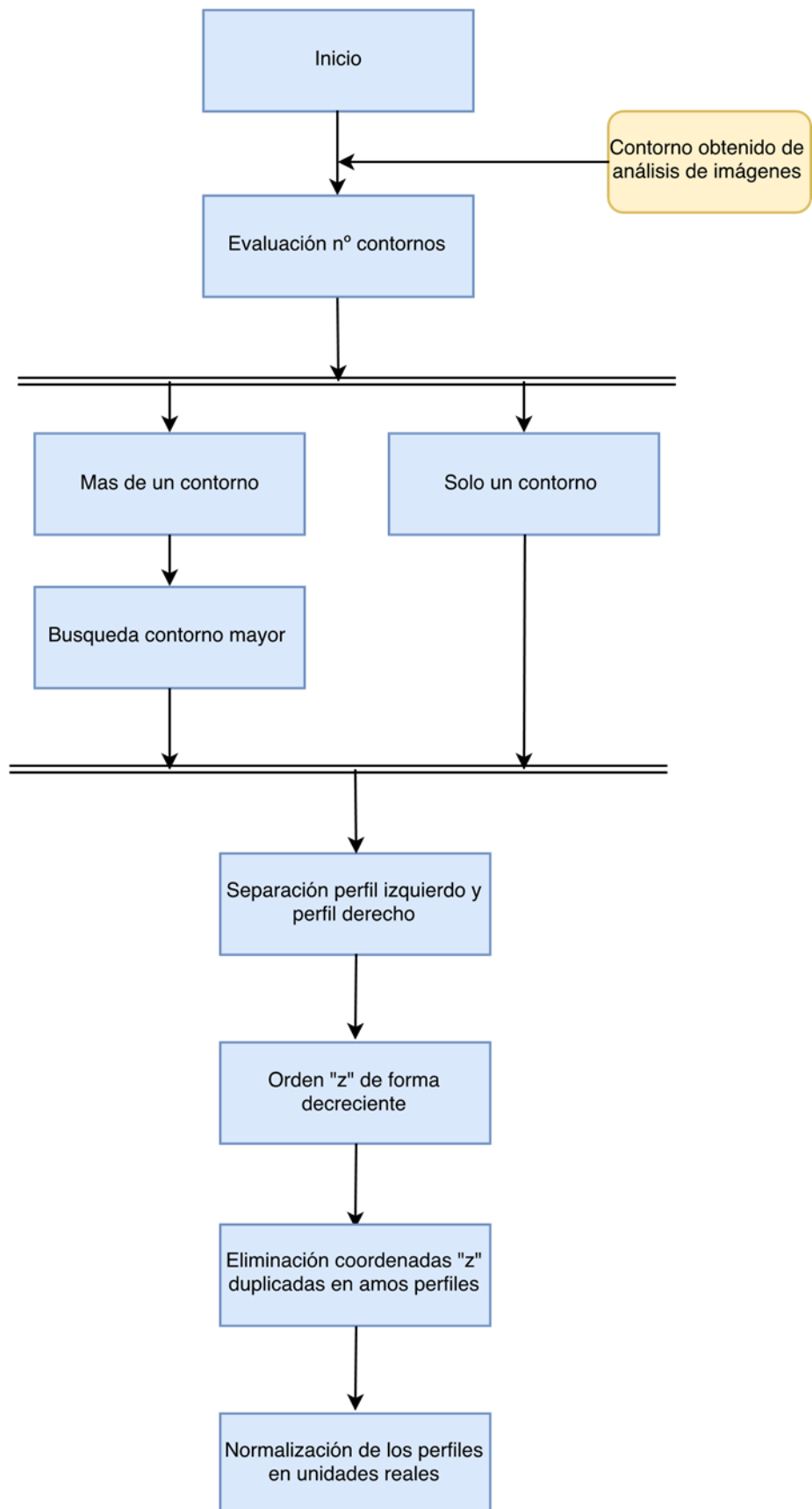
Figura 4. 1 Esquema de la burbuja con las variables relevantes y los ejes de referencia

4.1 Volumen

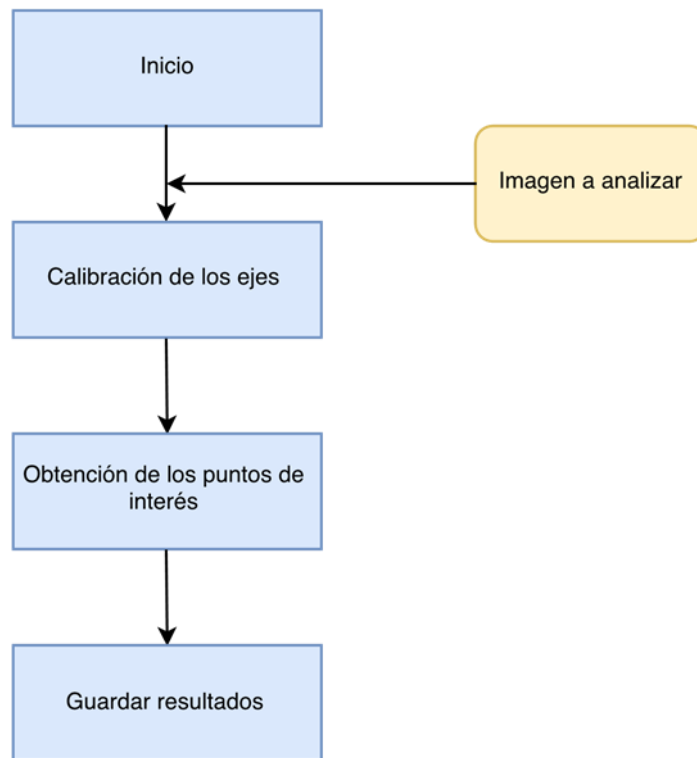




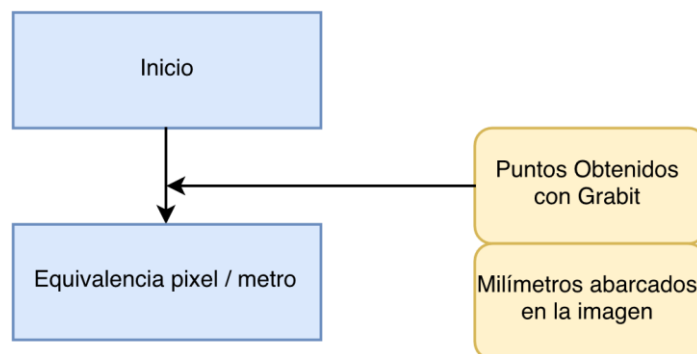
4.2 Depura Contorno



4.3 Grabit



4.4 Calibrador



5. Resultados

En este apartado presentaremos los resultados obtenidos de los diferentes experimentos. En primer lugar, vamos a mostrar el crecimiento de la burbuja de los casos más interesantes desde el punto de vista comparativo, junto con este memoria se entrega una carpeta llamada "videos suplementarios" con cuatro videos que corresponden a las imágenes de las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4.

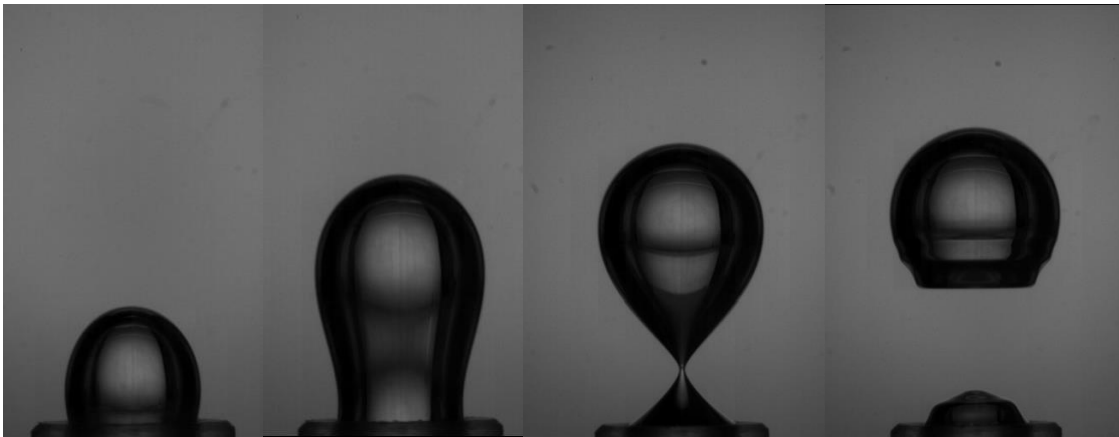


Figura 5. 1 Evolución temporal de la burbuja con tobera PMMA

En la figura 5.1 vemos el crecimiento de la burbuja con la tobera de metacrilato, como podemos observar la línea de contacto es fija durante todo el proceso de formación y además queda dentro de la tobera, de la misma manera ocurre en el caso del orificio con el mismo material.

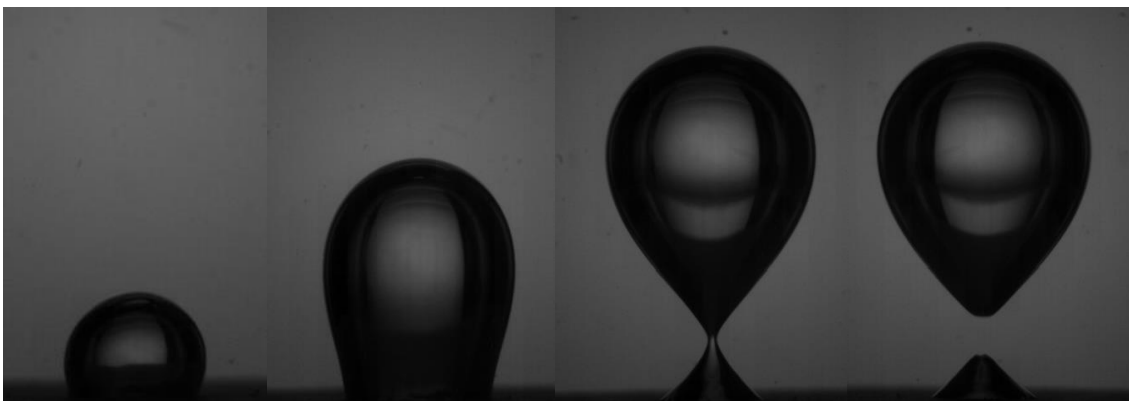


Figura 5. 2 Evolución temporal de la burbuja con orificio de teflón

En el caso del teflón (figura 5.2) podemos separar el proceso de crecimiento en tres etapas: vemos como la línea de contacto después de una etapa inicial en la que

se mueve, queda fija pero fuera del orificio mientras que la burbuja verticalmente, para retroceder por último justo antes del pinch-off.

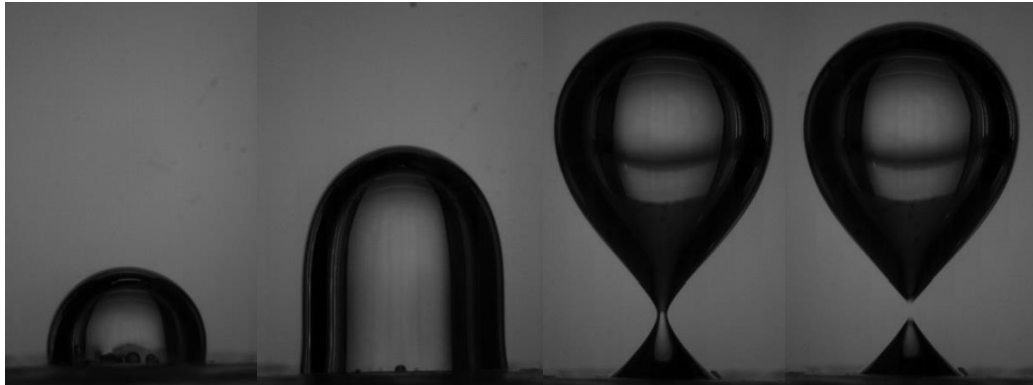


Figura 5. 3 Evolución temporal de la burbuja con orificio PMMA + vaselina

Para los experimentos con vaselina (figura 5.3), la línea de contacto es móvil durante prácticamente todo el proceso de crecimiento de la burbuja, las imágenes no difieren mucho de las del caso del teflón, sin embargo, en este caso, el movimiento de la línea móvil es mucho más continuado a lo largo de todo el crecimiento, no son tres etapas diferenciadas como en el caso anterior. Las irregularidades en la forma de la línea se deben a la aplicación de la vaselina sobre el material, ya que es muy difícil distribuirla de manera uniforme.

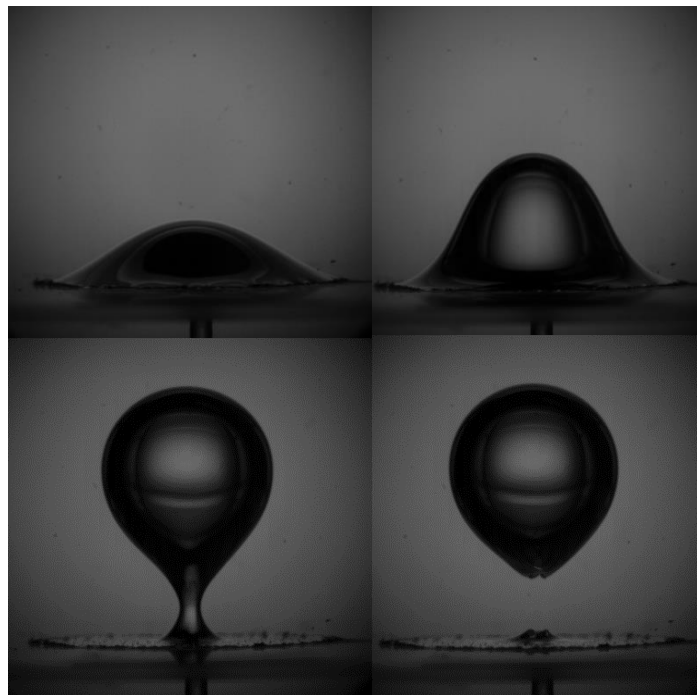


Figura 5. 4 Evolución temporal de la burbuja orificio PMMA + Neverwet

Por último mostramos el caso del orificio de PMMA con el recubrimiento "Neverwet" (figura 5.4). Utilizamos unas mascararas con forma circular para aplicar el producto únicamente en la zona deseada y poder controlar así el experimento.

Vemos que la línea de contacto es completamente móvil en los instantes iniciales de crecimiento y justo antes del pinch-off pero durante el crecimiento queda anclada en los límites del producto aplicado, lo cual nos permite controlar exactamente la línea de contacto durante el experimento.

5.1 Evolución temporal del volumen

Representamos las gráficas obtenidas del programa de Matlab, mostramos solo uno de los casos porque las gráficas obtenidas para todos los experimentos son prácticamente iguales:

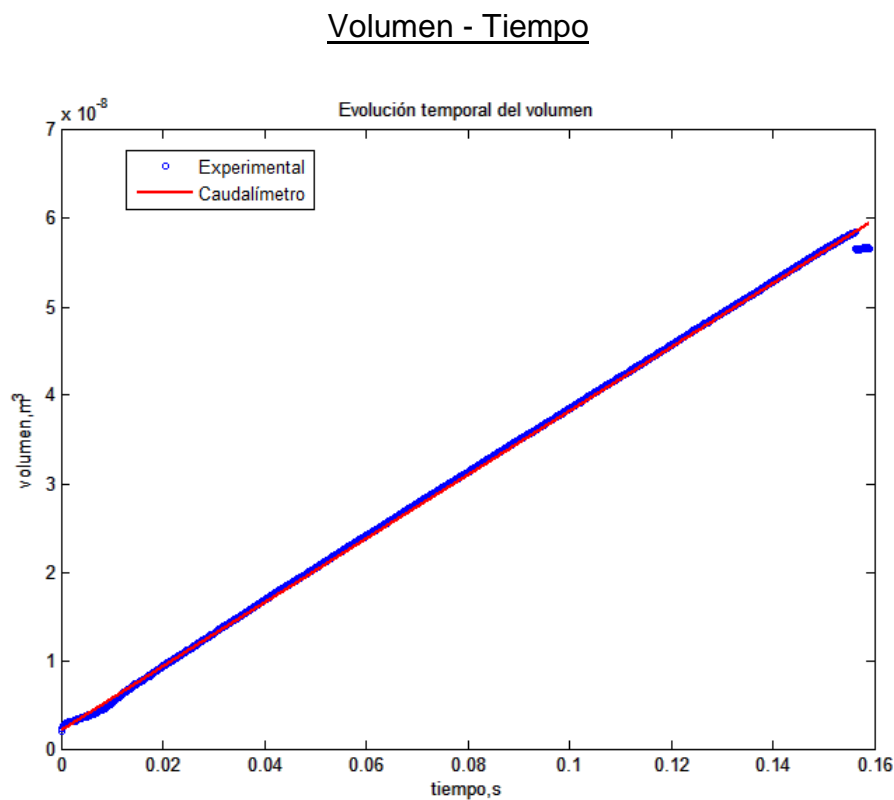


Figura 5. 5 Figura Volumen - Tiempo

Comprobamos que trabajamos en condiciones de caudal constante como buscábamos ($Q = dV/dt = constante$).

Vemos que el volumen obtenido del análisis de imágenes se ajusta perfectamente al medido con el caudalímetro. Se puede apreciar también casi al final de la gráfica los puntos que corresponden a los momentos posteriores al pinch-off.

Obtenemos de la gráfica el volumen final en los instantes previos al pinch-off, con el que compararemos el efecto de los diferentes materiales y elementos. Para ello, hacemos zoom en la gráfica a los puntos que corresponden a estos instantes previos como vemos en la siguiente imagen.

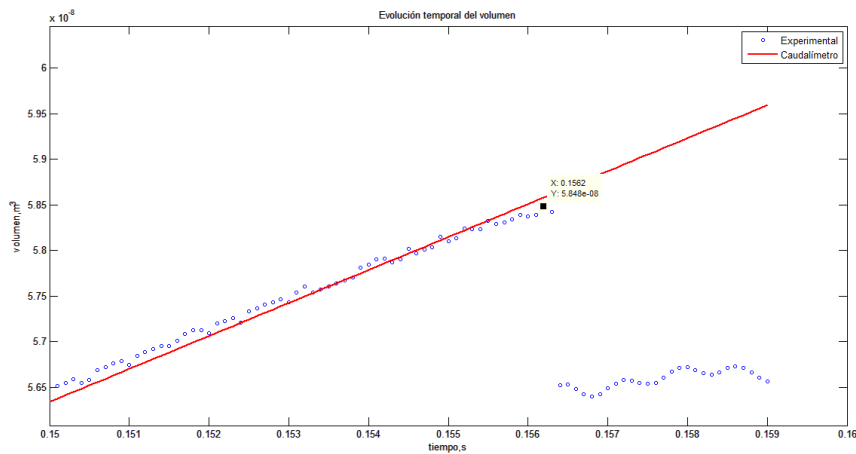


Figura 5. 6 Ampliación gráfica Volumen - Tiempo

Seleccionamos el valor manualmente en la gráfica, sería sencillo introducir en la rutina de Matlab una variable que nos guardara directamente el valor más alto de volumen, pero este valor podría pertenecer a un instante posterior al pinch-off o a algún tipo de irregularidad en el nivel de gris o en el contorno.

Coordenada Z máxima - Tiempo

Para poder interpretar la gráfica, primero es necesario definir los ejes de coordenadas.

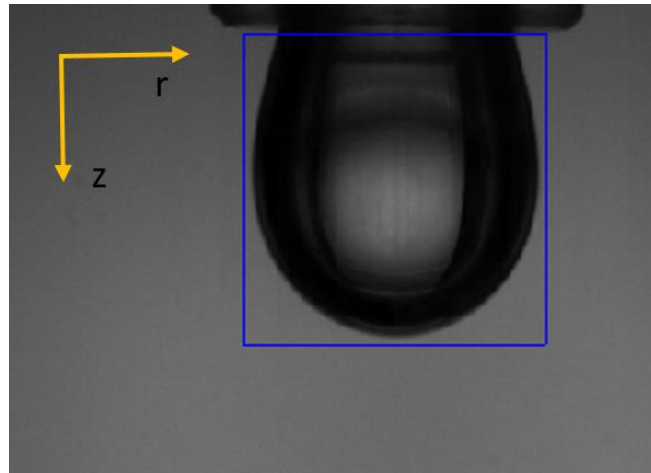


Figura 5. 7 Ejes de coordenadas

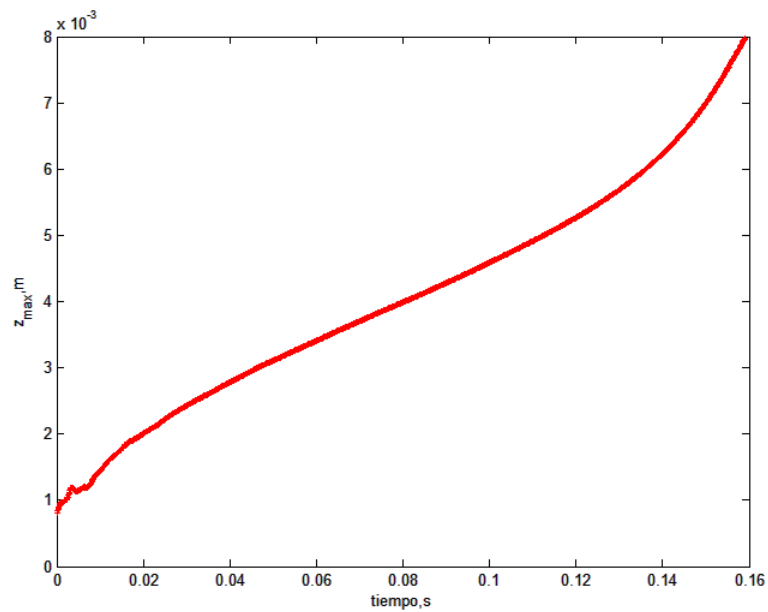


Figura 5. 8 Figura Z max - Tiempo

Esta gráfica por tanto, nos indica el valor de la punta de la burbuja durante todo el proceso de formación. Se aprecia claramente como como la línea crece rápidamente una vez que la burbuja queda liberada después del pinch-off.

Pendiente – Número de frames

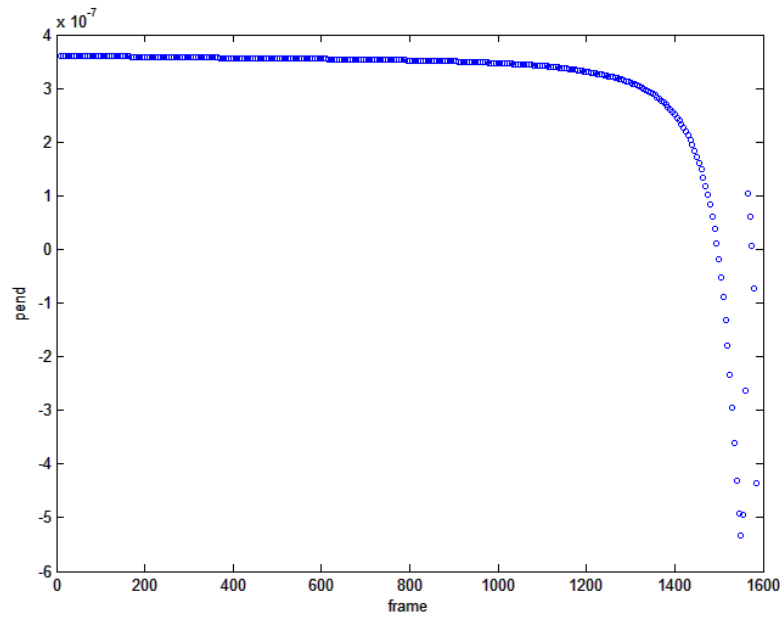


Figura 5. 9 Figura Pendiente - Frames

Comprobamos que la pendiente es constante hasta que se produce el pinch-off, lo cual es coherente con lo obtenido en la gráfica de volumen frente a tiempo.

También obtenemos una gráfica a modo de comprobación del frame seleccionado para comprobar la bondad del contorno seleccionado por el programa (línea blanca) con respecto al resto de contornos (líneas rojas).

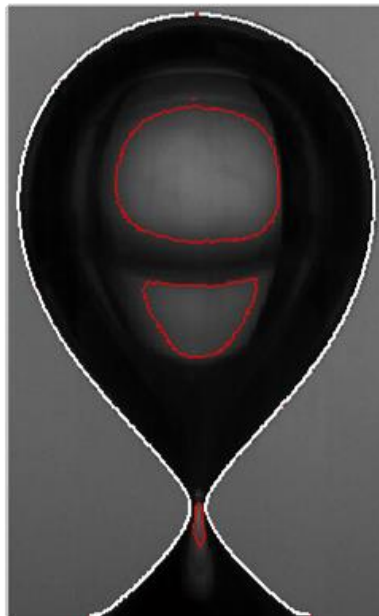


Figura 5. 10 Contorno seleccionado

Vemos ahora para cada experimento y para cada caudal los valores obtenidos.

Experimentos	Caudal (ml/ min)	Volumen (m ³)	Volumen (mm ³)
Orificio PMMA Di = 1 mm	20	$2,455 \cdot 10^{-8}$	24,55
	40	$3,297 \cdot 10^{-8}$	32,97
	60	$3,516 \cdot 10^{-8}$	35,16
Tobera PMMA Di = 1 mm	20	$4,2 \cdot 10^{-8}$	42
	40	$4,554 \cdot 10^{-8}$	45,54
	60	$5,259 \cdot 10^{-8}$	52,59
Tobera PMMA Di = 3 mm	20	$6,386 \cdot 10^{-8}$	63,86
	40	$7,126 \cdot 10^{-8}$	71,26
	60	$8,398 \cdot 10^{-8}$	83,98
Orificio teflón Di=1 mm	20	$9,201 \cdot 10^{-8}$	92,01
	40	$7,454 \cdot 10^{-8}$	74,54
	60	$4,108 \cdot 10^{-8}$	41,08
Tobera teflón Di = 1 mm	20	$5,848 \cdot 10^{-8}$	58,48
	40	$6,765 \cdot 10^{-8}$	67,65
	60	$7,557 \cdot 10^{-8}$	75,57
Orificio PMMA Di = 1 mm + Vaselina	20	$13,45 \cdot 10^{-8}$	134,5
	40	$14,03 \cdot 10^{-8}$	140,3
	60	$17,21 \cdot 10^{-8}$	172,1
Tobera PMMA Di = 1 mm + Vaselina	20	$32,43 \cdot 10^{-8}$	324,3
	40	$29,01 \cdot 10^{-8}$	290,1
	60	$29,41 \cdot 10^{-8}$	294,1
Orificio PMMA Di = 1 mm + Neverwet	20	$40,44 \cdot 10^{-8}$	404,4

Tabla 5. 1 Volúmenes obtenidos

Observamos como el volumen en general para un mismo material es algo mayor en los casos en los que utilizamos una tobera. Para el caso del orificio de teflón se obtienen resultados ilógicos en los que el volumen final disminuye a medida que aumenta el caudal, esto puede deberse al mecanizado del orificio que modifica las propiedades superficiales del material.

5.2 Frecuencia de burbujeo

Para calcular la frecuencia hemos utilizado los videos de 4-5 eventos. Llamamos evento al espacio de tiempo que transcurre entre el pinch-off de una burbuja y el pinch-off siguiente. El proceso de cálculo consta de los siguientes pasos: En primer lugar, comprobamos que entre cada evento hay un número de frames similar, es decir, que el burbujeo es constante. Después, cogemos el mayor número de eventos disponibles en el video y obtenemos la frecuencia con la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
 \text{Frecuencia} &= \frac{1}{\text{Periodo}} \\
 &= \frac{1}{\left[\frac{(\text{Frame final} - \text{Frame inicial}) / \text{fps del video}}{N^{\circ} \text{ eventos}} \right]}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Mostramos los resultados obtenidos para cada experimento y para cada caudal.

Experimentos	Caudal (ml/min)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)
Orificio PMMA Di = 1 mm	20	0,081	12,36
	40	0,053	18,96
	60	0,037	26,95
Tobera PMMA Di = 1 mm	20	0,111	8,99
	40	0,065	15,43
	60	0,046	21,60
Tobera PMMA Di = 3 mm	20	0,186	5,36
	40	0,107	9,39
	60	0,080	12,49
Orificio teflón Di=1 mm	20	0,187	5,34
	40	0,119	8,43
	60	0,044	22,96
Tobera teflón Di = 1 mm	20	0,167	6,00
	40	0,093	10,78
	60	0,076	13,11
Orificio PMMA Di = 1 mm + Vaselina	20	0,343	2,91
	40	0,183	5,47
	60	0,127	7,88
Tobera PMMA Di = 1 mm + Vaselina	20	0,149	6,73
	40	0,091	11,04
	60	0,066	15,11
Orificio PMMA Di = 1 mm + Neverwet	20	0,74	1,35

Tabla 5. 2 Frecuencias obtenidas

Comprobamos, como al aumentar el caudal obtenemos un aumento de la frecuencia de burbujeo para todos los casos.

5.3 Análisis del efecto del borde del inyector

Evaluamos las diferencias de volumen y de frecuencia para un mismo ángulo estático en los tres casos (PMMA, teflón y vaselina) cuando utilizamos un orificio o una tobera. Comparamos también las dos toberas de PMMA de diferente diámetro.

	Caudal (ml/min)	Orificio PMMA	Tobera PMMA	Variación relativa en porcentaje %
Frecuencia (Hz)	20	12,36	8,99	37,49
	40	18,96	15,43	22,88
	60	26,95	21,60	24,77
Volumen (mm³)	20	24,55	42	71,08
	40	32,97	45,54	38,13
	60	35,16	52,59	49,57

Tabla 5. 3 Comparativa PMMA

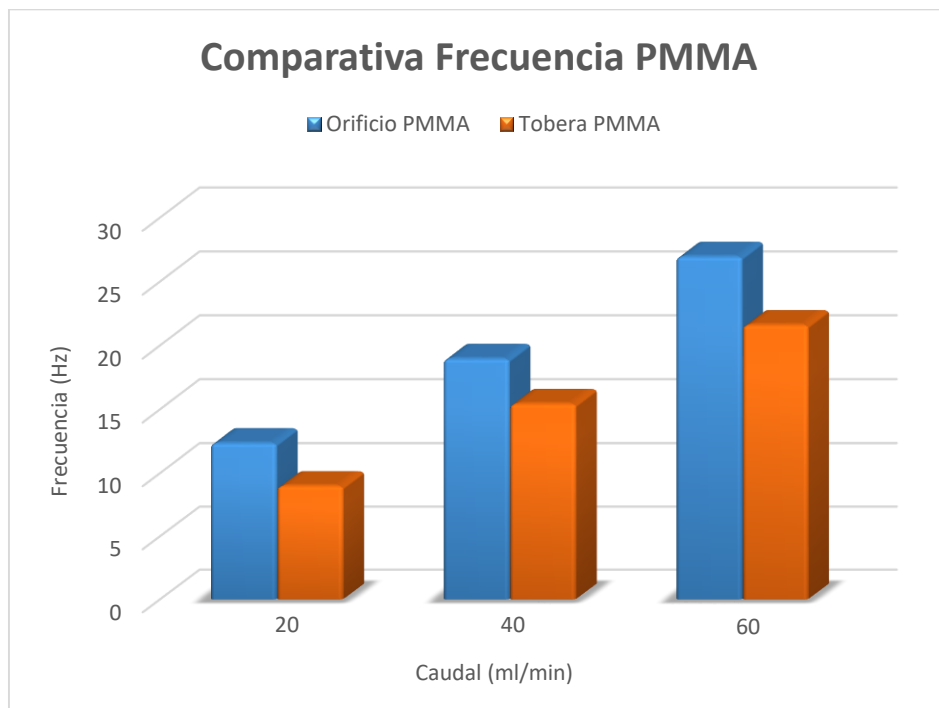


Figura 5. 11 Gráfico de barras frecuencia PMMA

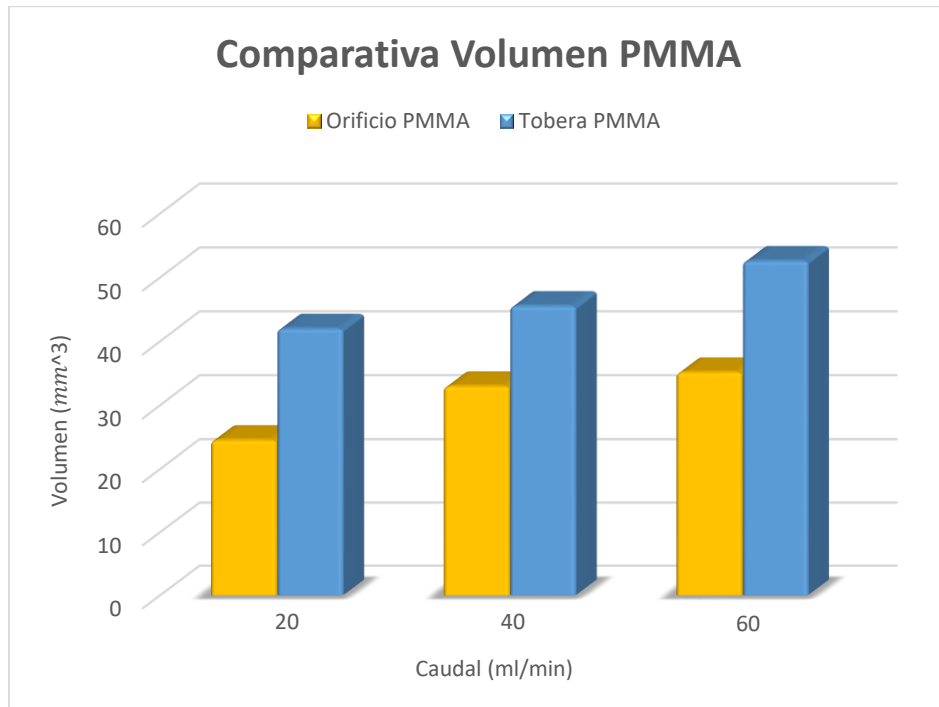


Figura 5. 12 Gráfico de barras volumen PMMA

Vemos claramente en el caso más simple, el del metacrilato, como varía el volumen de la burbuja y la frecuencia en función de que nuestro inyectemos el aire a través de un orificio o una tobera. Podemos observar como obtenemos volúmenes más elevados con la tobera, lo cual nos indica que para obtener los mismos resultados que con el orificio, su diámetro debería de ser menor.

	Caudal (ml/min)	Orificio teflón	Tobera teflón	Variación relativa en porcentaje %
Frecuencia (Hz)	20	5,34	6,00	12,36
	40	8,43	10,78	27,88
	60	22,96	13,11	75,13
Volumen (mm³)	20	92,01	58,48	57,34
	40	74,54	67,65	10,18
	60	41,08	75,57	83,96

Tabla 5. 4 Comparativa teflón

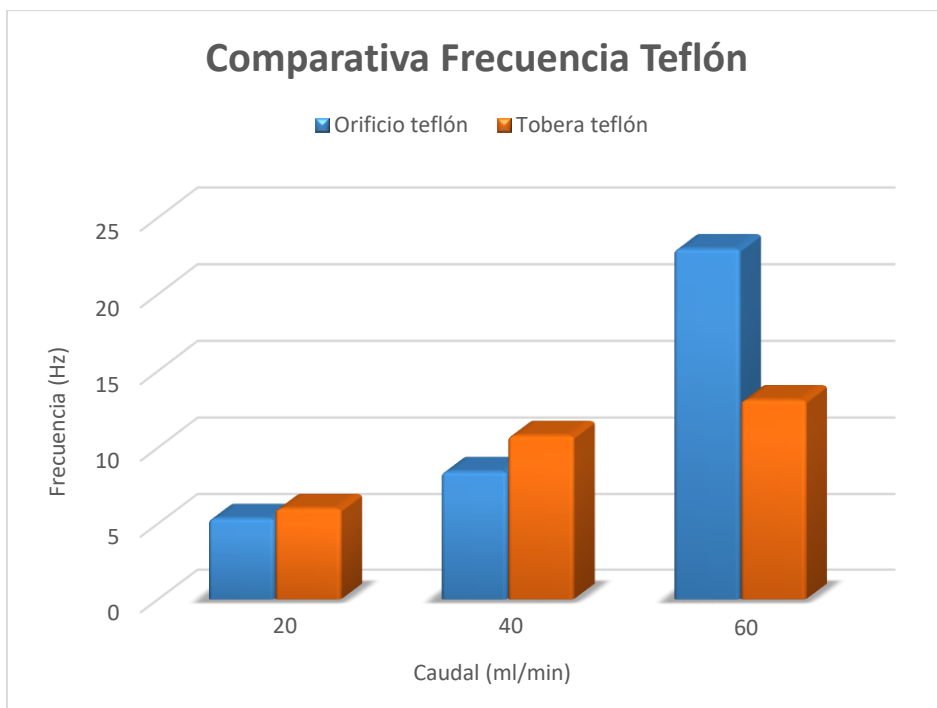


Figura 5. 13 Gráfico de barras frecuencia teflón

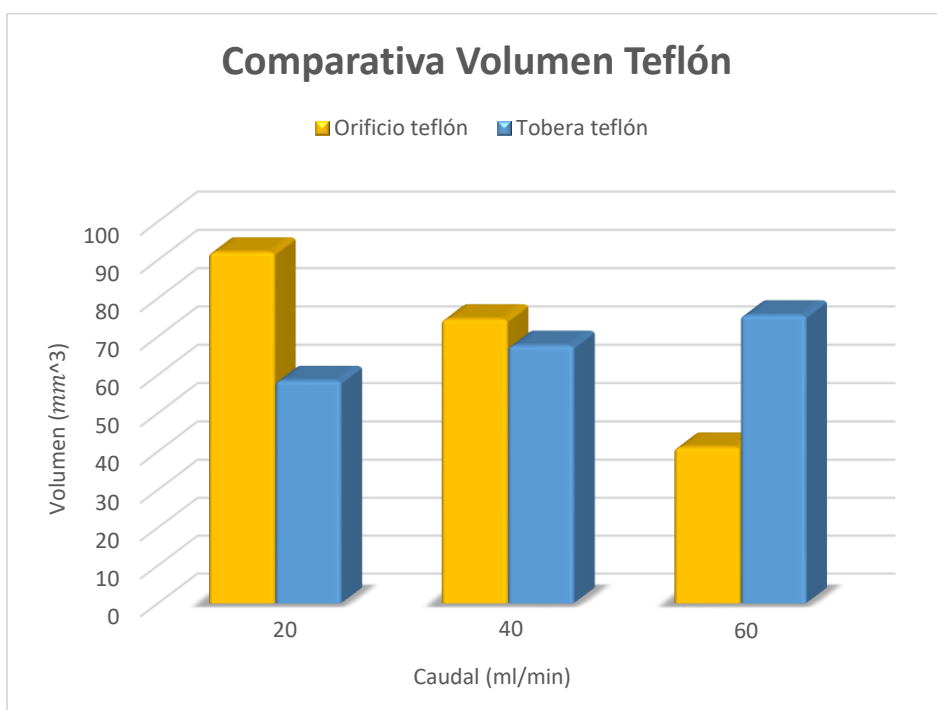


Figura 5. 14 Gráfico de barras volumen teflón

En el caso del teflón como ya hemos comentado anteriormente se obtienen resultados menos lógicos debido a problemas con el orificio de teflón. Lo cual pone de

manifiesto las dificultades de tratar el material con cualquier tipo de proceso mecánico sin alterar sus propiedades.

	Caudal (ml/min)	Orificio PMMA + vaselina	Tobera PMMA + vaselina	Variación relativa en porcentaje %
Frecuencia (Hz)	20	2,91	6,73	131,27
	40	5,47	11,04	101,83
	60	7,88	15,11	91,75
Volumen (mm³)	20	134,5	324,3	141,12
	40	140,3	290,1	106,77
	60	172,1	294,1	70,89

Tabla 5. 5 Comparativa vaselina

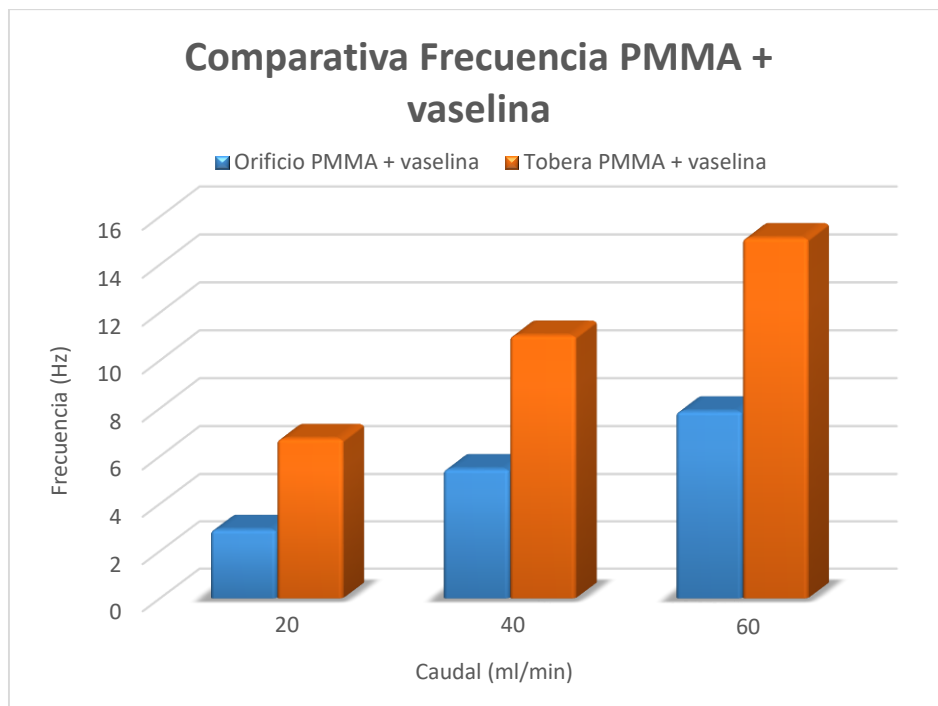


Figura 5. 15 Gráfico de barras frecuencia PMMA + vaselina

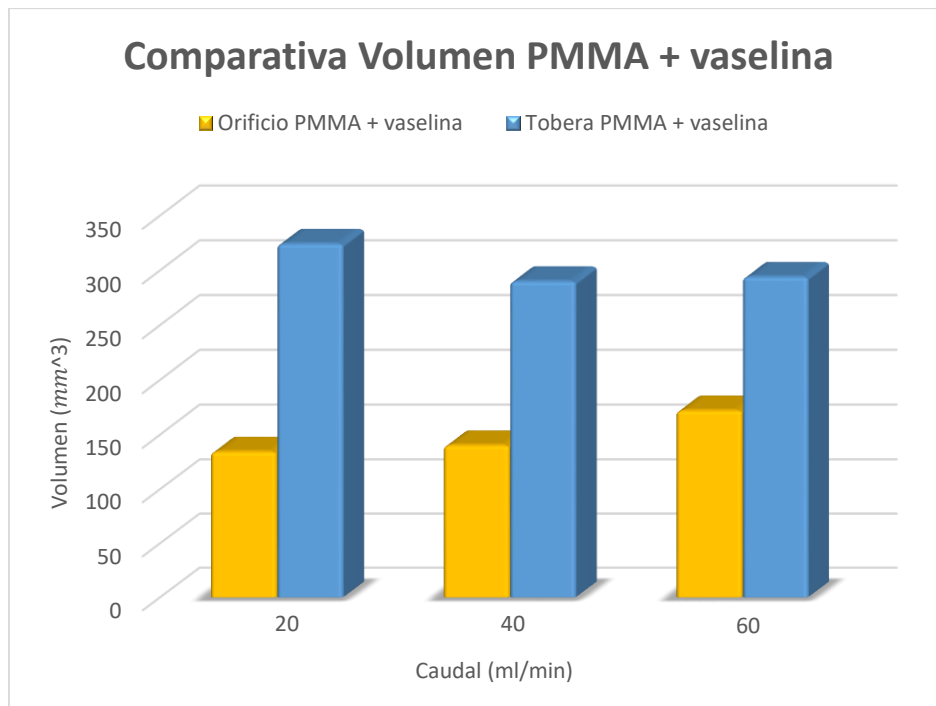


Figura 5. 16 Gráfico de barras volumen PMMA + vaselina

Aquí, vemos pocas variaciones en el volumen en el caso de la tobera con vaselina, quedando en los tres caudales ensayados próximo a 300 mm^3 , lo cual se puede deber a irregularidades inherentes a la aplicación de la vaselina, ya que la frecuencia sí que tiene una progresión coherente.

Comparamos en este apartado también las toberas de metacrilato de 1 y 3 mm de diámetro interior.

	Caudal (ml/min)	Tobera PMMA Di = 1 mm	Tobera PMMA Di = 3 mm	Variación relativa en porcentaje %
Frecuencia (Hz)	20	8,99	5,36	67,72
	40	15,43	9,39	64,32
	60	21,60	12,49	72,94
Volumen (mm³)	20	42	63,86	52,05
	40	45,54	71,26	56,48
	60	52,59	83,98	59,69

Tabla 5. 6 Comparativa diámetro tobera

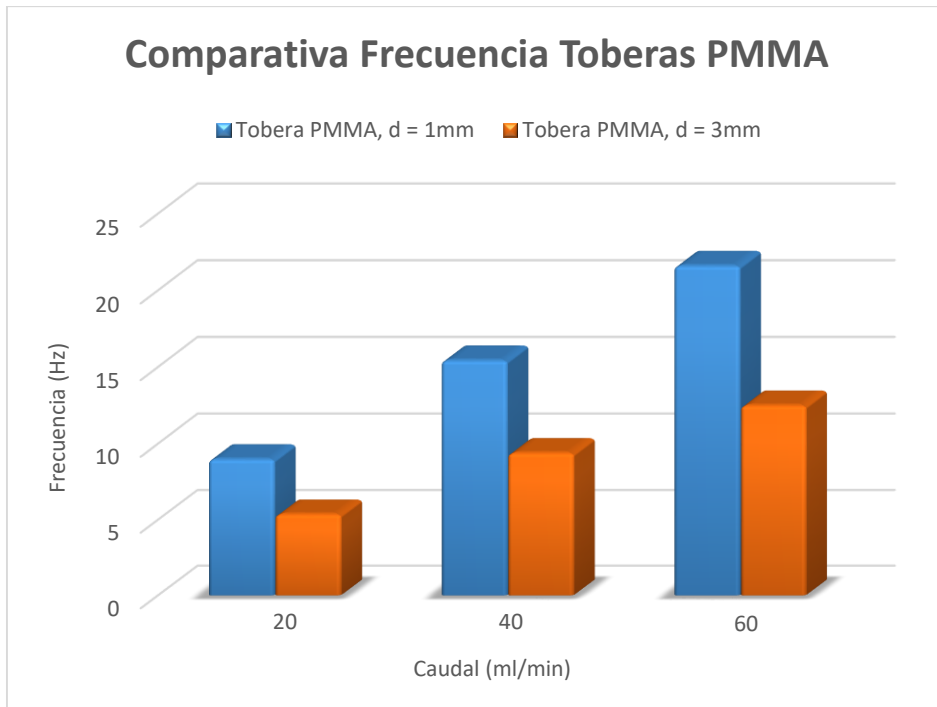


Figura 5. 17 Gráfico de barras frecuencia toberas PMMA

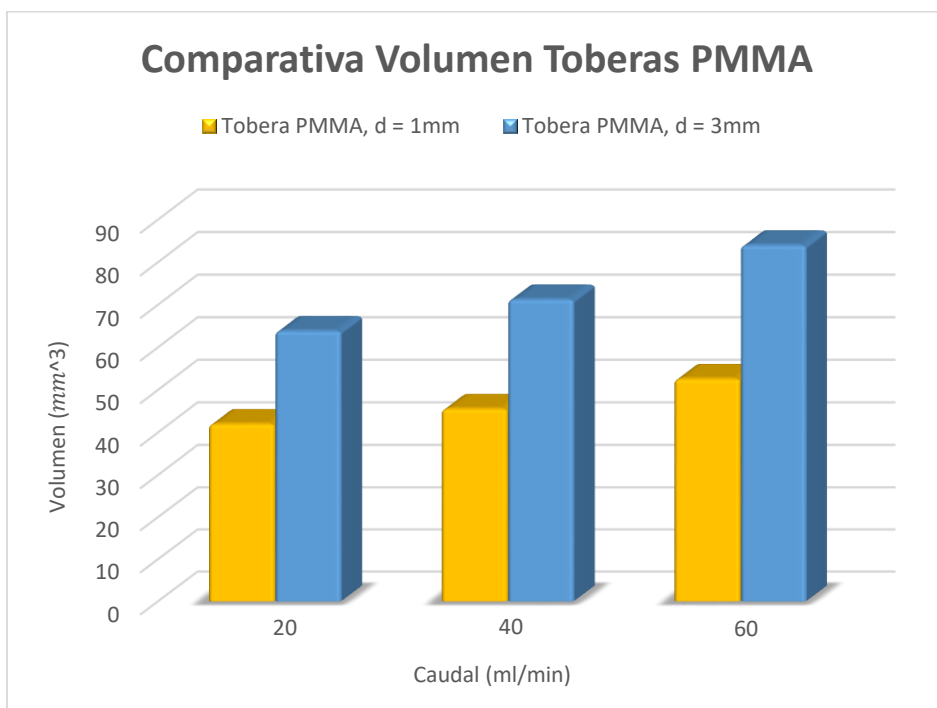


Figura 5. 18 Gráfico de barras volumen toberas PMMA

Comprobamos aquí para el metacrilato, como podemos controlar el volumen modificando el diámetro del elemento, en este caso, una diferencia de 2 mm provoca una modificación del volumen del orden de 25 mm³.

Es interesante resaltar los resultados positivos obtenidos con las toberas, ya que éstas suponen una manera completamente nueva de inyección de caudal de aire, en la mayoría de los estudios previos se trabaja exclusivamente con orificios.

5.4 Análisis del efecto de la línea de contacto fija o móvil en la dinámica de formación de la burbuja

En primer lugar, vemos el caso del orificio de metacrilato, el mismo con vaselina y Neverwet y el orificio de teflón; para comparar el efecto de ésta y su consecuente alteración de la línea de contacto y por tanto, como se ven afectados el volumen y la frecuencia.

	Caudal (ml/min)	Orificio PMMA	Orificio teflón	Orificio PMMA + Vaselina	Orificio PMMA + Neverwet
Frecuencia (Hz)	20	12,36	5,34	2,91	1,35
	40	18,96	8,43	5,47	
	60	26,95	22,96	7,88	
Volumen (mm³)	20	24,55	92,01	134,5	404,4
	40	32,97	74,54	140,3	
	60	35,16	41,08	172,1	

Tabla 5. 7 Comparativa orificios

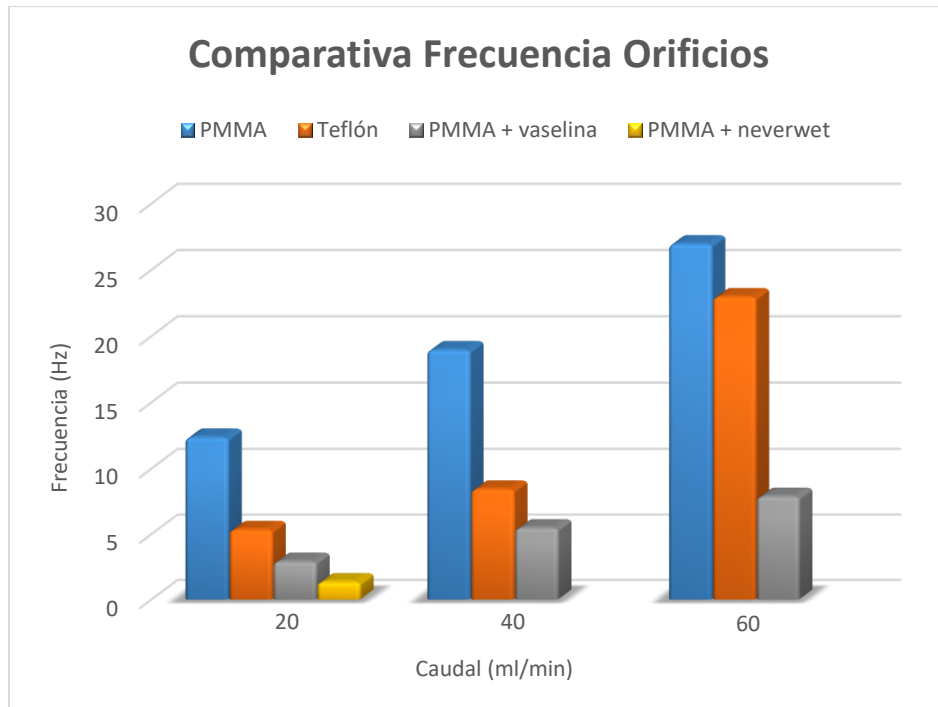


Figura 5. 19 Gráfico de barras frecuencia orificios

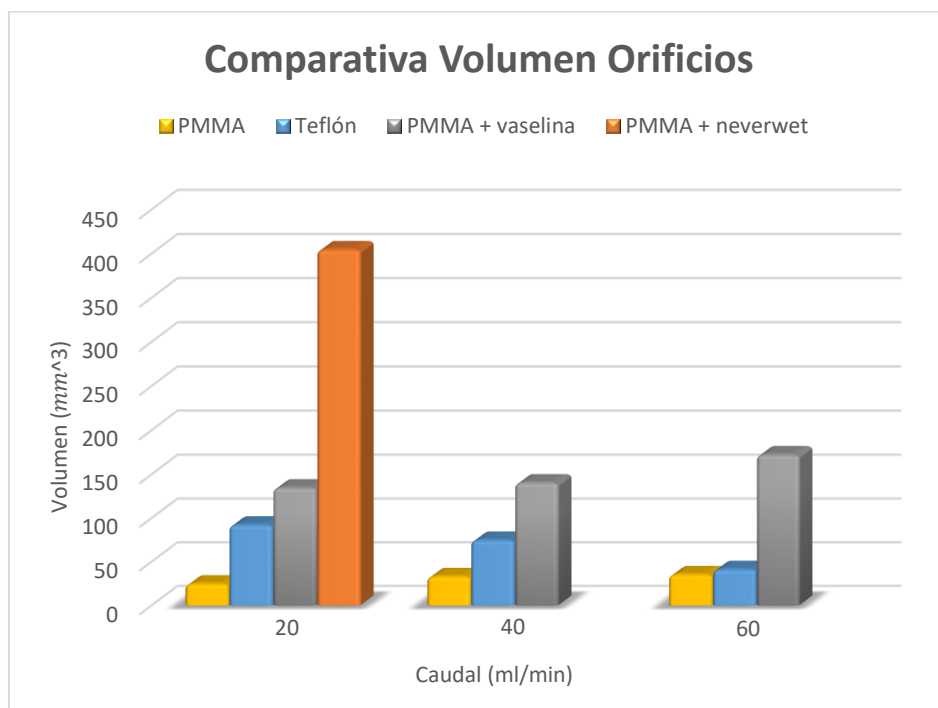


Figura 5. 20 Gráfico de barras volumen orificios

Vemos que al modificar el ángulo y la línea de contacto con la vaselina conseguimos burbujas de mayor volumen y por consiguiente, para un mismo caudal, una reducción de la frecuencia de burbujeo. En el caso del recubrimiento Neverwet, con un ángulo estático entre 160 y 175 y con una línea de contacto completamente

móvil conseguimos un volumen de más de 400 mm³, siendo este volumen el más elevado de todos los casos con el orificio de 1 mm de diámetro.

	Caudal (ml/min)	Tobera PMMA	Tobera teflón	Tobera PMMA + Vaselina
Frecuencia (Hz)	20	8,99	6,00	6,73
	40	15,43	10,78	11,04
	60	21,60	13,11	15,11
Volumen (mm³)	20	42	58,48	324,3
	40	45,54	67,65	290,1
	60	52,59	75,57	294,1

Tabla 5. 8 Comparativa toberas

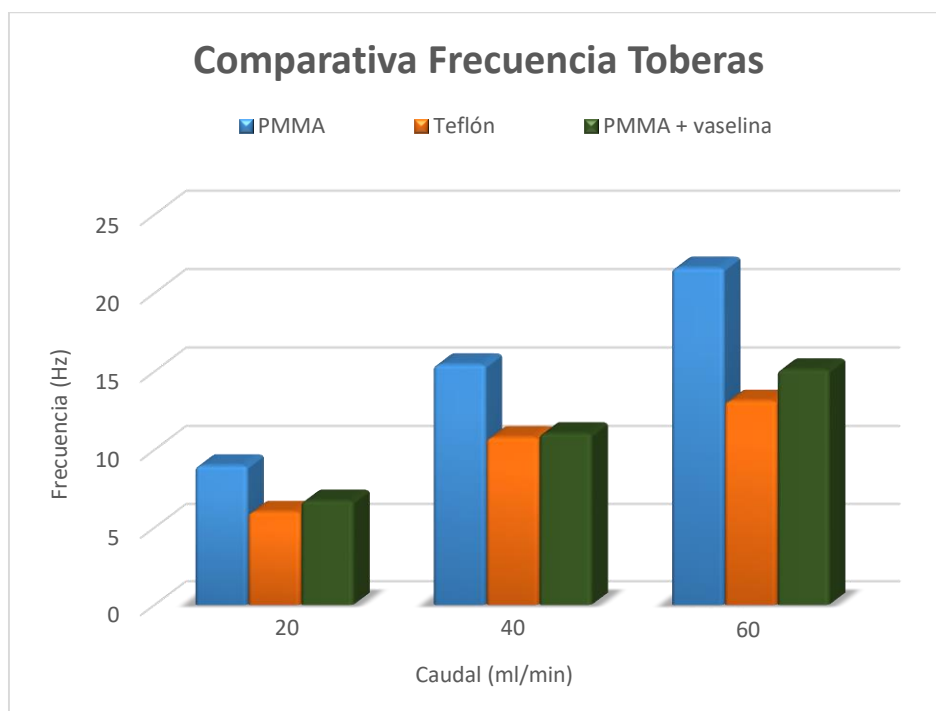


Figura 5. 21 Gráfico de barras frecuencia toberas

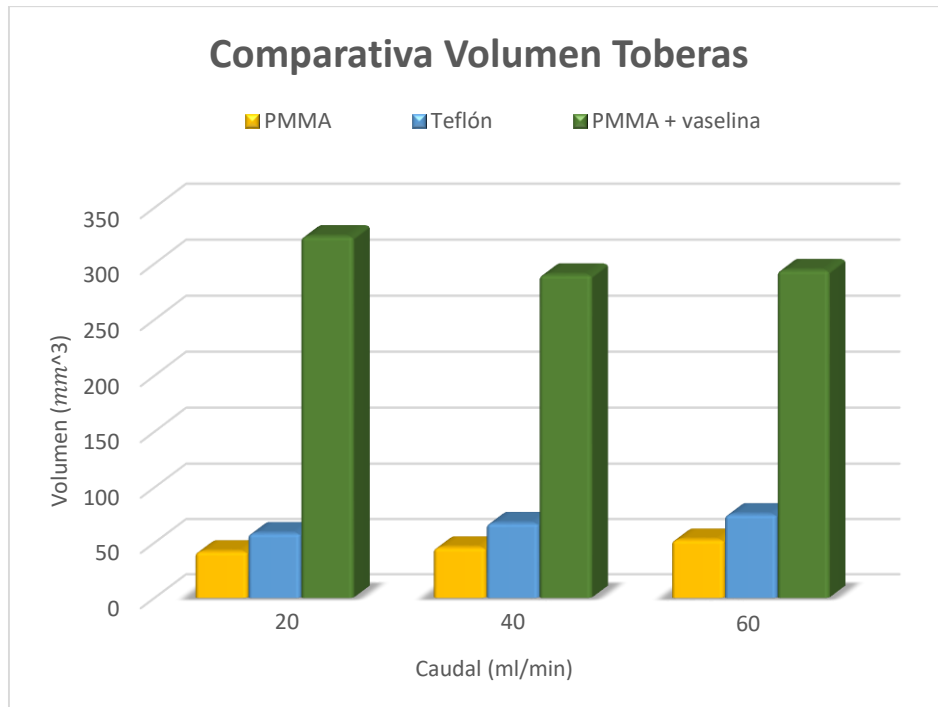


Figura 5. 22 Gráfico de barras volumen toberas

En el caso de las toberas, obtenemos volúmenes bastante similares entre PMMA y teflón, siendo considerablemente mayores los de la tobera con vaselina. Es interesante destacar las diferencias de volumen que obtenemos en relación con la frecuencia, ya que en los casos de vaselina y teflón las frecuencias son muy parecidas.

Vemos como tiene un efecto mucho más significativo en el volumen la aplicación de vaselina que el teflón, a diferencia de lo que sugieren estudios anteriores como en [7] en los que se obtienen volúmenes mayores con las superficies de teflón.

6. Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo se ha llevado a cabo una extensa revisión bibliográfica del problema de la formación de burbujas y de las diferentes investigaciones de los elementos que tienen una influencia directa en este proceso, posteriormente se han llevado a cabo 44 experimentos con diversos inyectores y materiales, en los que se ha utilizado una cámara de alta velocidad para poder captar el colapso de la burbuja que es del orden de milisegundos y se ha realizado una serie de programas con Matlab personalizados para cada experimento con el objeto de poder medir especialmente el volumen y la frecuencia, todo ello para lograr tener un conocimiento más profundo de la formación en general y de la influencia de la línea de contacto en particular.

La rutina principal de Matlab analiza el primer frame y si el contorno es correcto entra en el bucle que calcula el volumen de la burbuja en todos los instantes de tiempo y establece la región de interés del instante de tiempo siguiente. Dentro de cada paso del bucle utilizamos "Depura_contorno" para seleccionar el contorno mayor. Como hemos podido comprobar con el análisis de imágenes todos los experimentos se han realizado a caudal constante.

Dentro de los resultados, podemos afirmar tal y como se esperaba con el presente proyecto que existe una clara influencia entre la línea de contacto y el volumen de la burbuja, de hecho, vemos como en los experimentos en los que la línea de contacto es claramente móvil como en los dos casos con vaselina y especialmente el del recubrimiento "Neverwet", el volumen de la burbuja aumenta considerablemente en comparación con los casos en los que la línea de contacto queda fija.

A pesar de que el teflón es un material muy utilizado en este tipo de estudios por ser hidrofóbico, presenta una importante pérdida de propiedades al mecanizarlo, lo cual reduce su campo de acción a un nivel experimental muy básico, podemos obtener un ángulo estático mayor al del teflón aplicando "Neverwet" sobre una superficie de cualquier otro material.

Siendo la inyección mediante toberas, algo completamente novedoso en la formación de burbujas en un líquido en reposo, hemos obtenido resultados satisfactorios en cuanto al volumen y a la frecuencia, observando que ambas

aumentan y disminuyen respectivamente en relación al caso del orificio para un mismo material.

Como líneas de trabajo futuro podemos destacar las siguientes:

- Dado que el producto Neverwet ha sido descubierto recientemente como aplicación para este tipo de problemas relacionados con formación de burbujas, y debido a su capacidad para modificar la línea de contacto, se presenta como una importante línea de investigación, de hecho se sigue trabajando actualmente con este producto en el grupo de investigación del área de mecánica de fluidos de la Universidad de Jaén.
- Se podría llevar a cabo, a la vista de los casos obtenidos, un estudio numérico con una malla móvil para ensayar diferentes configuraciones, como otros caudales o ángulos estáticos mayores, y poder además anclar la línea de contacto en una zona determinada.
- La rutina de Matlab podría ser mejorada para obtener un nivel de gris adecuado de manera automática utilizando análisis de imágenes y diferentes filtros en lugar de la función "graythresh" que nos obliga a seleccionar el nivel manualmente en muchos de los experimentos realizados.
- Se podrían repetir los experimentos realizados con unas condiciones de alimentación mixtas, que son las que se suelen dar en la mayoría de los procesos industriales.

7. Bibliografía

- [1] Bari, S. D., Robinson, A. J., 2013. Experimental study of gas injected bubble growth from submerged orifices. *Experimental Thermal and Fluid Science* 44, 124-137.
- [2] Bolaños-Jiménez, R., 2011. Dynamics of bubble formation in cylindrical and planar geometries. PhDthesis, Universidad de Jaén.
- [3] Bolaños-Jiménez, R., Sevilla A., Martínez-Bazán C., and Gordillo J. M., 2008. Axisymmetric bubble collapse in a quiescent liquid pool. Part II: Experimental study. *Phys. Fluids*, 20:112104.
- [4] Byakova, A. V., Gnyloskurenko, S. V., Nakamura, T., Raychenko, O. I., 2003. Influence of wetting conditions on bubble formation at orifice in an inviscid liquid mechanism of bubble evolution. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 229, 19-32.
- [5] Cano-Lozano, J.C., Bolaños-Jiménez, R., Gutiérrez-Montes, C., Martínez-Bazán, C., 2017. On the bubble formation under mixed injection conditions from vertical needle. *International journal of multiphase flow* 97, 23-32.
- [6] Chen, Y. Liu, S., Kulenovic, R., Mertz, R., 2013. Experimental study on macroscopic contact line behaviors during bubble formation on submerged orifice and comparison with numerical simulations. *Phys. Fluids* 25, 092105.
- [7] Corchero, G., Medina, A., Higuera, F. J., 2006. Effect of wetting conditions and flow rate on bubble formation at orifices submerged in water. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 290, 41-49.
- [8] García-Moreno, F., Siegel, B., Heim, K., Meagher, A. J., Banhart, J., 2015. Sub-mm sized bubbles injected into metallic melts. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 473, 60-67.
- [9] Georgoulas, A., Koukouvini, P., Gavaises, M., Marengo, M., 2015. Numerical investigation of quasi-static bubble growth and detachment from submerged orifices in isothermal liquid pools: The effect of varying fluid properties and gravity levels. *Int. J. Multiphase Flow* 74, 59-78.

- [10] Gerlach, D. Alleborn, N., Buwa, V., Durst, F., 2007. Numerical simulation of periodic bubble formation at a submerged orifice with constant gas flow rate. *Chem.Eng. Sci.* 62, 2109-2125.
- [11] Gnyloskurenko, S., Byakova, A., Nakamura, T., Raychenko, O., 2005. Influence of wettability on bubble formation in liquid. *Journal of materials science* 40, 2437-2441.
- [12] Gnyloskurenko, S. V., Byakova, A. V., Raychenko, O. I., Nakamura, T., 2003. Influence of wetting conditions on bubble formation at orifice in an inviscid liquid. Transformation of bubble shape and size. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 218, 73-78.
- [13] Hughes, R., Handlos, A., Evans, H., Maycock, R., 1955. The formation of bubbles at simple orifices. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51, 557–563.
- [14] Martínez-Bazán, C., Tensión superficial. Apuntes de clase. Universidad de Jaén.
- [15] Oguz, H. N. and Prosperetti A., 1993. Dynamics of bubble growth and detachment from a needle. *J. Fluid Mech.*, 257:111-145.
- [16] Park, Y., Tyler, A., de Nevers, N., 1977. The chamber orifice interaction in the formation of bubbles. *Chem. Eng. Sci.* 32 (8), 907–916.
- [17] Snoeijer, J. H., Andreotti, B., 2013. Moving contact lines: scales, regimes and dynamical transitions. *Annual Review of fluid mechanics* 45, 269-292.
- [18] Thoroddsen, S.T., Etoh, T.G. and Takehara K., 2007. Experiments on bubble pinch-off. *Phys. Fluids*, 19:042101,.
- [19] Vafaei, S., Wen, D., 2010. Bubble formation on a submerged micronozzle. *J. Colloid Interface Sci.* 343, 291-297.
- [20] Yuan, J., Li, Y., Zhou, Y., 2014. Effect of contact angle on bubble formation at submerged orifices. *J. Mater. Sci.* 49, 8084-8094.

8. Anexos

8.1 Código del programa Volumen

```

%*****
% Trabajo fin de máster. Máster en Ingeniería Industrial curso 2017/2018

% Estudio experimental de la influencia de la línea de contacto en la
% dinámica de formación de burbujas

% Programa principal cálculo volumen burbuja.
%
%   Molina Álvarez, Carlos J
%*****

clear all
close all

%%%%%%%%%%%%%%
% dt=diámetro "nominal" tobera,mm
% Qa=medida caudalímetro,ml/min
%%%%%%%%%%%%%%
%Parámetros de cada video:
% %Medidas tobera
% dtr=diámetro interior real,m
% dte=diámetro exterior,m
% %Escala imagen, pix/m
% l=diámetro exterior medido en imagen,pix
% esc=l/dte;%pix/m
% f0=Primer frame del análisis
% fn=Último frame del análisis
% fps=frames per second
% nivel=Nivel de gris para hacer el contorno
% fb=frame a partir del cual establecemos bounding box manual

tensu=0.07;%N/m
densidad=10^3;

%Datos video
fps=10000;
Qa=60;
dt=1;dtr=1e-03;dte=3e-03;
centro=288;

```

```

znozzle=20;
esc=4.043312192572778e+04;

sec=1;
f0=50; %350
fn=732;

avancez=5;%incremento en z para bounding box de la siguiente imagen

tolerancia=1e-03;%para el cálculo de la pendiente del volumen vs t
chequeo=0;%Chequeo figuras
fignum=20;%Figura para chequeo
probox=0;%cuando haya problemas con la bounding box probox=1
fb=1000;%frame a partir del cual establecemos bounding box automática si
probox=1

%Radio tobera,m
a=dtr/2;

%Pasamos ahora a leer y representar un frame concreto

%Análisis sólo para el primer frame
frame=f0;
%Leemos de uno en uno
fstep=1;

ima = aviread('tob_tef_di_1_do_3_Qa_60_1_event.avi',frame) ;

%Me quedo con los datos (cdata) de lo anterior y paso a doble precisión
ima=im2double(ima.cdata);
%Le damos la vuelta
ima=flipud(ima);

%Evaluamos con graythresh el umbral de gris adecuado o le damos un valor
%determinado
%nivel=0.2;
nivel = graythresh(ima);

%Figura 1 con la imagen, para utilizarla con el ginput siguiente
imshow(ima);
sizeima=size(ima);

%Dibujar la imagen con los ejes
figure(1),clf,imagesc(ima(:,:))%Figura 1
colormap(gray),hold on
set(gcf,'Position',[10 10 700 700])
size(ima);
hold on,plot(centro*[1 1],[1 sizeima(2)],'g-')
hold on,plot([1 sizeima(2)],znozzle*[1 1],'g-')

```

```

%Región de interés sobre la imagen anterior con los ejes
[xim,yim]=ginput(2); %Matriz 2x2 formada por 2 vectores:
xim=round(xim); %coordenada r de las dos esquinas opuestas,pix
yim=round(yim); %coordenada z de las dos esquinas opuestas,pix
imag=ima(yim(1):yim(2),xim(1):xim(2));
boxul(1)=xim(1);boxul(2)=yim(1);
tamim=size(imag);

%La representamos (en la misma Figura 1), necesaria para que represente el
contorno en una figura aparte
figure(1),clf,imagesc(imag)
colormap(gray)

%Contorno (con contourc)
contorno=contourc(imag,nivel*[1 1]);
tam=size(contorno);
% Comprobación de contorno correcto
hold on,contour(imag,nivel*[1 1],'ro')
pause
close all

%Ejecutamos el programa para depurar el contorno
depura_contorno;

%Coordenada punta burbuja (pix)
zmax=max(perfil(:,2));
[zmaxd,pozmaxd]=max(perfild(:,2));
[zmaxi,pozmaxi]=max(perfili(:,2));
zpuntad=(zmaxd-znozzle)/esc;
zpuntai=(zmaxi-znozzle)/esc;
zpunta=0.5*(zpuntad+zpuntai);

%Volumen de la burbuja con trapezios con perfiles dimensionales (m^3)
vold=pi*trapz(perfildn(:,2),perfildn(:,1).^2);
voli=pi*trapz(perfilin(:,2),perfilin(:,1).^2);
volm=0.5*(vold+voli);

%Radio mínimo (pix)
[Rbmax_d,posmaxrd]=max(perfild(:,1));Rbmax_d=Rbmax_d-centro;
[Rbmax_i,posmaxri]=min(perfili(:,1));Rbmax_i=centro-Rbmax_i;
Rbmin_d=min(perfild(1:posmaxrd,1))-centro;%radio mínimo derecha
Rbmin_i=centro-max(perfili(1:posmaxri,1));%radio máximo izquierda
dist_neck=Rbmin_d+Rbmin_i;%distancia cuello

%Tiempo, s
time=fstep/fps;

%Bounding box para el siguiente frame

```

```

rmaxd=max(perfild(:,1));
rmaxi=min(perfili(:,1));
boxul=[rmaxi-5 znozzle]; %Borde superior izquierdo visto en imagen no en
coordenadas
boxul=round(boxul);
boxdr=[rmaxd+5 zmax+5]; %Borde inferior derecho visto en imagen no en
coordenadas
boxdr=round(boxdr);

```

%Borro perfiles del primer frame

```
clear perfil perfili perfild perfiln perfilin perfildn niveles contormax
```

%Análisis del resto de frames

```

conta=0;
vectorvolm(1)=volm;%m^3
vectortime(1)=time;%s
vectorzpunta(1)=zpunta;%m
diamneck(1)=dist_neck;%pix

```

```
if fn>f0
```

```

for frame=f0+1:fn
    fstep=fstep+1;

```

```
    ima=aviread('tob_tef_di_1_do_3_Qa_60_1_event.avi',frame);
```

```

    ima=im2double(ima.cdata);
    ima=flipud(ima);
    conta=frame-f0+1;%contador
    frame %para saber el frame que está analizando
    imag=ima(boxul(2):boxdr(2),boxul(1):boxdr(1));
    if chequeo%para ver si la bounding box es buena
        figure(fignum),clf,imagesc(imag)
        colormap(gray),hold on
        set(gcf,'Position',[100 100 500 500])
    end

```

% borro los datos del frame anterior

```
clear perfil perfili perfild perfiln perfilin perfildn niveles contormax
```

%Nuevo contorno

```

contorno=contourc(imag,nivel*[1 1]);
tam=size(contorno);
% Comprobación de contorno correcto
if chequeo
    figure(fignum),imagesc(imag)
    hold on,contour(imag,nivel*[1 1],'ro')
end

```

```

depura_contorno;

%Bounding box
rmaxd=max(perfild(:,1));
rmaxi=min(perfili(:,1));
boxul=[rmaxi-5 znozzle];
boxul=round(boxul);
boxdr=[rmaxd+5 zmax+5];
boxdr=round(boxdr);
if probox
    if frame <= fb
        rmaxd=max(perfild(:,1));
        rmaxi=min(perfili(:,1));
        boxul=[rmaxi-5 znozzle];
        boxul=round(boxul);
        boxdr=[rmaxd+5 zmax+avancez];
        boxdr=round(boxdr);
    else frame > fb;
        sizeima=size(ima);
        rmaxi=175;%100;
        rmaxd=420;%380;
        boxul=[rmaxi znozzle];%[180 znozzle];
        boxdr=[rmaxd 300];%[550 510];

    end
end

%La dibujamos
if chequeo
    figure(fignum+1),imshow(ima)
    hold on, set(gcf,'Position',[600 100 500 500])
    hold on, plot([boxul(1) boxdr(1)],boxul(2)*[1 1])
    hold on, plot([boxul(1) boxdr(1)],boxdr(2)*[1 1])
    hold on, plot(boxul(1)*[1 1],[boxul(2) boxdr(2)])
    hold on, plot(boxdr(1)*[1 1],[boxul(2) boxdr(2)])
%     pause
end

%Punta de la burbuja
zmax=max(perfil(:,2));
zmaxd=max(perfild(:,2));
zmaxi=max(perfili(:,2));
zpuntad=(zmaxd-znozzle)/esc;
zpuntai=(zmaxi-znozzle)/esc;
%     %adimensional
%     zpuntad=(zmaxd-znozzle)/esc/(a);
%     zpuntai=(zmaxi-znozzle)/esc/(a);
zpunta=0.5*(zpuntad+zpuntai);

```

```

%Radio mínimo
[Rbmax_d,posmaxrd]=max(perfild(:,1));Rbmax_d=Rbmax_d-centro;
[Rbmax_i,posmaxri]=min(perfili(:,1));Rbmax_i=centro-Rbmax_i;
Rbmin_d=min(perfild(1:posmaxrd,1))-centro;%radio mínimo derecha
Rbmin_i=centro-max(perfili(1:posmaxri,1));%radio máximo izquierda
dist_neck=Rbmin_d+Rbmin_i;%distancia cuello

%volumen de la burbuja con perfiles dimensionales
vold=pi*trapz(perfildn(:,2),perfildn(:,1).^2);
voli=pi*trapz(perfilin(:,2),perfilin(:,1).^2);
volm=0.5*(vold+voli);
%Vector de volúmenes medios
vectorvolm(conta)=volm;
volums=vectorvolm';%vector columna

%Tiempo y vector
time=fstep/fps;%s
vectortime(conta)=time;
tiempos=vectortime';%vector columna
vectorzpunta(conta)=zpunta;
diamneck(conta)=dist_neck;
end %for
end %if

%Elimino posibles puntos con volumen erróneo

mat=vectorvolm<vectorvolm(1)/2;%vector con unos en posiciones problemáticas
vectorvolm(find(mat==1))=[];
vectortime(find(mat==1))=[];
% vector_neck(find(mat==1))=[];
vectorzpunta(find(mat==1))=[];
diamneck(find(mat==1))=[];
volums=vectorvolm';tiempos=vectortime';

mat2=vectorvolm>vectorvolm(end)*1.2;%vector con unos en posiciones
problemáticas
vectorvolm(find(mat2==1))=[];
vectortime(find(mat2==1))=[];
% vector_neck(find(mat2==1))=[];
vectorzpunta(find(mat2==1))=[];
diamneck(find(mat==2))=[];
volums=vectorvolm';tiempos=vectortime';

%Último contorno
imag=flipud(imag);
figure,imshow(imag);tamim=size(imag);
hold on;
contour(imag,nivel*[1 1],'ro')
plot(perfili(:,1)-centro+tamim(1,2)/2,tamim(1,1)+znozzle-perfili(:,2),'w','LineWidth',2);

```

```
hold on;plot(perfild(:,1)-centro+tamim(1,2)/2,tamim(1,1)+znozzle-
perfild(:,2),'w','LineWidth',2);
```

```
%Gráfica altura burbuja frente al tiempo
```

```
figure,plot([vectortime],[vectorzpunkta'],'r','MarkerSize',3),xlabel('tiempo,s'),ylabel('z_{
max},m');
```

```
%Pendiente con mínimos cuadrados
```

```
tama=size(volums);
tamab=size(volums);
mc1=[ones(tama(1),1) tiempos]\volums;pend1=mc1(2);
tama=tama-5;
mc2=[ones(tama(1),1)
tiempos(6:tamab(1),1)]\volums(6:tamab(1),1);pend2=mc2(2);
num=5;
con=1;
while num<tamab(1)-5
    num=num+5;
    pend1=pend2;
    tama=size(ones(tama(1)-5,1));
    mc2=[ones(tama(1),1)
tiempos(1+num:tamab(1),1)]\volums(1+num:tamab(1),1);pend2=mc2(2);
    vectorpend(con)=pend2;
    vectornum(con)=num;
    con=con+1;
end
%Gráfica pendiente
```

```
figure,plot([vectornum],[vectorpend'],'bo','MarkerSize',3),xlabel('frame'),ylabel('pend')
```

```
%Nos quedamos con la pendiente que cumpla con la tolerancia
```

```
if abs((vectorpend(2)-vectorpend(1))/vectorpend(1))<tolerancia
    pendiente=vectorpend(2);
elseif abs((vectorpend(2)-vectorpend(1))/vectorpend(1))>tolerancia
    it=1;
    while abs((vectorpend(it+1)-vectorpend(it))/vectorpend(it))>tolerancia
        it=it+1;
        pendiente=vectorpend(it+1)';
    end
end
```

```
%Caudal calculado con la pendiente de mínimos cuadrados
```

```
caudalpend=pendiente*6e+07; %ml/min,
```

```
%Caudal de gas
```

```
Ua=(caudalpend/6e07)/(pi/4*dtr^2);%m3/s
```

```
%Números Bo y We
```

```
Bo=(densidad-1.3)*9.81*a^2/tensu;
```

```
We=densidad*Ua^2*a/tensu;
```

```

%Volumen Fritz
vf=(2*pi*tensu*a)/(densidad*9.81);%m^3
%Caudal critico
Qcr=pi*(16/(3*9.81^2))^(1/6)*(tensu*a/1000)^(5/6)*6e7;%ml/min

%Gráfica volumen vs tiempo
figure(50)
plot([vectortime],[vectorvolm],'bo','MarkerSize',3)
hold on, plot([vectortime],pendiente*[vectortime]+vectorvolm(1),'r-','LineWidth',2),xlabel('tiempo,s'),ylabel('volumen,m^3');
legend('Experimental','Caudalímetro')
title('Evolución temporal del volumen')

```

8.2 Código del programa Depura_contorno

```

%*****
% Trabajo fin de máster. Máster en Ingeniería Industrial curso 2017/2018

% Estudio experimental de la influencia de la línea de contacto en la
% dinámica de formación de burbujas

% Programa para depurar contornos.
%
%   Molina Álvarez, Carlos J
%*****

%Escogemos el contorno con mayor número de puntos;
%Primero hacemos una matriz (niveles) que va a conterner la posición de los niveles
en la fila 1 y el número de puntos en la fila 2
k=1;
for i=1:tam(1,2)
    if contorno(1,i)==nivel
        niveles(1,k)=i;
        niveles(2,k)=contorno(2,i);
        k=k+1;
    end
end
tamniveles=size(niveles);
%para el caso de que encuentre más de un contorno
if tamniveles(2)>1
    %Ahora buscamos el mayor número de puntos de los niveles encontrados

```

```

[maximo,pos]=max(niveles(2,:));
%Finalmente creamos una matriz (contormax) que será el contorno con mayor
número de puntos
for m=1:maximo
    contormax(1,m)=contorno(1,niveles(1,pos)+m);
    contormax(2,m)=contorno(2,niveles(1,pos)+m);
end
%Perfil con contorno máximo
perfil=[[boxul(1)-1+contormax(1,:)] [boxul(2)-1+contormax(2,:)]];
end
%para el caso de que encuentre un solo contorno
if tamniveles(2)==1
    perfil=[[boxul(1)-1+contorno(1,2:1+contorno(2,1))] [boxul(2)-
1+contorno(2,2:1+contorno(2,1))]];
end

%Separamos en izquierdo y derecho
perfil=perfil(find(perfil(:,2)>znozzle),:);%z mayor que znozzle
perfil=perfil(find(perfil(:,1)<centro),:);%r a la izquierda del centro
perfiled=perfil(find(perfil(:,1)>centro),:);%r a la derecha del centro

%Depuración del perfil

%1. Ordenamos de forma que z vaya en orden decreciente, pix
perfil=sortrows(perfil,2);
perfiled=sortrows(perfiled,2);
%2. Eliminamos z duplicadas en ambos perfiles, pix
if any(diff(perfil(:,2))==0)
    perfil([find(diff(perfil(:,2))==0)],:)=[];
end
if any(diff(perfiled(:,2))==0)
    perfiled([find(diff(perfiled(:,2))==0)],:)=[];
end

% Perfiles Normalizados y en unidades reales, m
perfiln(:,1)=(centro-perfil(:,1))/esc;
perfiln(:,2)=(perfil(:,2)-znozzle)/esc;
perfiledn(:,1)=abs(centro-perfiled(:,1))/esc;
perfiledn(:,2)=(perfiled(:,2)-znozzle)/esc;
perfiledn(:,1)=abs(centro-perfiled(:,1))/esc;
perfiledn(:,2)=(perfiled(:,2)-znozzle)/esc;

```

8.3 Código del programa Calibrador

```

%*****
% Trabajo fin de máster. Máster en Ingeniería Industrial curso 2017/2018

% Estudio experimental de la influencia de la línea de contacto en la
% dinámica de formación de burbujas

% Programa para determinar lo que mide un pixel en magnitud real, con los puntos
%obtenidos con la función grabit.
%
%   Molina Álvarez, Carlos J
%*****

load('Data001.mat')

puntos = Data001;
plot(puntos(1,1),puntos(1,2),'og',puntos(2,1),puntos(2,2),'ob')
axis([0 512 0 512])

dist_x = puntos(2,1)- puntos(1,1);
dist_y = puntos(2,2)- puntos(1,2);

d = sqrt((dist_x)^2 + (dist_y)^2);

mm = input('milímetros abarcados en la imagen ');

pixel_metro = p/1e-03 ; %cantidad de pixeles que hay en 1 m

```