



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

MODIFICACIÓN DE LA LÍNEA DE CONTACTO PARA LA GENERACIÓN CONTROLADA DE BURBUJAS

Alumno: Jose Carlos Muñoz Hervás

Tutores: M^a Rocío Bolaños Jiménez

Carlos Martínez Bazán

Dpto: Ingeniería mecánica y minera



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Departamento de Ingeniería mecánica y minera

Doña M^a Rocío Bolaños Jiménez y Don Carlos Martínez Bazán, tutores del Trabajo Fin de Grado titulado: Modificación de la línea de contacto para la generación controlada de burbujas, que presenta Jose Carlos Muñoz Hervás, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2019

El alumno:

Los tutores:

Jose Carlos Muñoz Hervás

M^a Rocío Bolaños Jiménez

Carlos Martínez Bazán

Índice

1. Introducción	15
1.1. Motivación	15
1.2. Objetivos.....	19
1.3. Antecedentes o estado del arte.....	19
2. Descripción del problema	24
2.1. Tensión superficial.....	24
2.1.1. Línea y ángulo de contacto	26
2.2. Flujo de aire	27
2.3. Tipos de superficies de orificios.....	29
2.4. Formación de burbujas.....	31
2.5. Esquema del problema	37
2.6. Procesado de imágenes	37
3. Trabajo experimental.....	40
3.1. Instalación experimental.....	40
3.2. Procedimiento de medida.....	49
4. Procesado de imágenes	52
4.1. Códigos detección burbuja completa.....	59
4.1.1. Completa general	59
4.1.2. Completa detección burbuja.....	60
4.1.3. Completa parámetros	62

4.1.4.	Completa movimiento del borde	62
4.1.5.	Completa gráficas	63
4.1.6.	Completa guardar	63
4.1.7.	Completa corrección	64
4.1.8.	Completa comparación	65
4.2.	Códigos detección borde de la línea de contacto	66
4.2.1.	Detalle general	66
4.2.2.	Detalle detección	67
4.2.3.	Detalle detección parámetros	68
4.2.4.	Detección caja	68
4.2.5.	Detección diferencia	68
4.2.6.	Detalle calibración radio	69
4.2.7.	Detalle comparación	70
4.2.8.	Detalle cálculos	71
4.2.9.	Detalle parámetros	72
5.	Resultados	73
5.1.	Burbuja completa	74
5.1.1.	Ajuste del contorno	74
5.1.2.	Volumen de la burbuja	77
5.1.3.	Centroide de la burbuja	91
5.1.4.	Altura máxima de la burbuja	92
5.1.5.	Velocidad de la altura máxima de la burbuja	93

5.1.6.	Radio equivalente	94
5.1.7.	Diámetro de la base de la burbuja.....	95
5.1.8.	Comparación entre superficies	97
5.2.	Borde de la burbuja en la base.....	103
5.2.1.	Contorno detectado	106
5.2.2.	Ángulo.....	108
5.2.3.	Radio máximo (radio en la base).....	110
5.2.4.	Ángulo suavizado	113
5.2.5.	Radio máximo suavizado	116
5.2.6.	Velocidad del radio máximo con y sin suavizado	118
5.2.7.	Zona de movimiento en el radio máximo suavizado	119
5.2.8.	Comparación entre superficies del inicio del movimiento	121
6.	Conclusiones y trabajo futuro	127
7.	Bibliografía	132
8.	Anexos	134
8.1.	Códigos para el análisis de los vídeos de la burbuja completa.....	134
8.1.1.	Completa_general	134
8.1.2.	Completa_deteccion_burbuja.....	139
8.1.3.	Completa_parametros	149
8.1.4.	Completa_mov_borde	153
8.1.5.	Completa_graficas.....	160
8.1.6.	Completa_guardar	165

8.1.7.	Completa_correccion.....	166
8.1.8.	Completa_comparacion.....	167
8.2.	Códigos para el análisis de los vídeos de detalle del borde de la burbuja. ...	171
8.2.1.	Detalle_general.....	171
8.2.2.	Detalle_deteccion	173
8.2.3.	Detalle_deteccion_parametros.....	182
8.2.4.	Deteccion_caja	186
8.2.5.	Deteccion_dif	189
8.2.6.	Detalle_calib_radio	193
8.2.7.	Detalle_comparacion	195
8.2.8.	Detalle_calculos.....	205
8.2.9.	Detalle_parametros	209

Índice figuras

Figura 1. Separación de un chorro en gotas, [1] FIG. 4.....	15
Figura 2. Oxigenación de acuario de corales [24], a la izquierda; Microburbujeadores para aireación de biorreactores [23], a la derecha.	17
Figura 3. Espuma de aluminio, [5] Figura 1.	18
Figura 4. Etapas en la formación de una burbuja. Buena mojabilidad, arriba; Mala mojabilidad, abajo. [7] Fig. 4.....	20
Figura 5. Esquema tensión superficial en la superficie de separación, A. [14] Fig 6.1.....	25
Figura 6. Esquema línea y ángulo de contacto. [13] Fig. 1.4	26
Figura 7. Ángulo de contacto buena mojabilidad (izquierda), mala mojabilidad (derecha) del líquido.....	27
Figura 8. Sistema coflujo y flujo cruzado (de izquierda a derecha). [16] Figure 3	29
Figura 9. Burbuja en una superficie hidrofílica e hidrofóbica (de izquierda a derecha), con diferentes escalas. [17] Fig. 3 y 4	31
Figura 10. Proceso de formación de una burbuja sobre una superficie hidrofóbica, completo. [Obtenida de R. Bolaños Jiménez].....	32
Figura 11. Burbuja en el periodo de nucleación, imagen tomada en el laboratorio...33	
Figura 12. Burbuja en el periodo de crecimiento por debajo del valor crítico, imagen tomada en el laboratorio.	33
Figura 13. Forma de una burbuja en crecimiento crítico teniendo en cuenta todas sus partes y para buena mojabilidad (izquierda) y mala mojabilidad (derecha). [7] Fig. 2.....	34
Figura 14. Burbuja en el periodo de crecimiento crítico, imagen tomada en el laboratorio.....	35

Figura 15. Burbuja en el periodo de formación del cuello y desprendimiento, imagen tomada en el laboratorio.	36
Figura 16. Esquema con todos los parámetros a estudiar.	37
Figura 17. Esquema introductorio de la instalación. [15] Fig. 2.1	40
Figura 18. Instalación experimental, parte aire comprimido.	42
Figura 19. Instalación experimental, parte aire comprimido, válvula.....	43
Figura 20. Disco de metacrilato con la máscara.....	44
Figura 21. Disco orificio con superficie de Neverwet realizada.....	45
Figura 22. Urna y disco orificio (izquierda), detalle disco metacrilato (derecha)	45
Figura 23. Iluminación	47
Figura 24. Sistema de grabación (izquierda y derecha) y sistema de control.....	48
Figura 25. Regla micrométrica.....	51
Figura 26. Contorno detectado de las primeras imágenes.	54
Figura 27. Contornos sin depurar (a,c,e) y contornos modificados (b,d,f).....	55
Figura 28. Imagen de detalle con contorno del borde detectado.	57
Figura 29. Ampliación del ajuste del contorno a la entrefase.....	57
Figura 30. Evolución temporal de una burbuja, sobre sobre una superficie de diámetro 8 mm.	75
Figura 31. Evolución temporal de una burbuja, sobre sobre una superficie de diámetro 10 mm.	76
Figura 32. Evolución temporal de una burbuja, sobre sobre una superficie de diámetro 16 mm.	76

Figura 33. Evolución temporal de una burbuja, sobre una superficie de diámetro 20 mm.	77
Figura 34. Imágenes grabadas de detalle. Zona que se muestra ampliada en la Figura 35.	106
Figura 35. Puntos detectados e interpolaciones realizadas en varias etapas. (Diámetro 10 mm).....	106
Figura 36. Datos del ángulo de contacto de equilibrio proporcionado por el fabricante, Neverwet (izquierda). Imagen proporcionada por TEP235, para la medición del ángulo de contacto de una gota de agua sobre Neverwet.	115
Figura 37. Experimentos realizados en el Grupo TEP235 con geometrías triangulares y rectangulares. [Obtenidas de R. Bolaños Jiménez y M. Rubio Rubio].....	131

Índice de gráficas

Gráfica 1. Diferencia relativa al crear un código de cálculo de volumen por integración y no usar <i>trapz</i> , diámetro 8 mm.	78
Gráfica 2. Volumen de la burbuja calculado por la izquierda y derecha, diámetro 8 mm... ..	78
Gráfica 3. Volumen de la burbuja vs tiempo y ajuste lineal, diámetro 8 mm.....	79
Gráfica 4. Diferencia relativa al crear un código de cálculo de volumen por integración y no usar <i>trapz</i> , diámetro 10 mm.	82
Gráfica 5. Volumen de la burbuja calculado por la izquierda y derecha, diámetro 10 mm.	82
Gráfica 6. Volumen de la burbuja vs tiempo y ajuste lineal, diámetro 10 mm.....	83
Gráfica 7. Diferencia relativa al crear un código de cálculo de volumen por integración y no usar <i>trapz</i> , diámetro 16 mm.	85
Gráfica 8. Volumen de la burbuja calculado por la izquierda y derecha, diámetro 16 mm.	85
Gráfica 9. Volumen de la burbuja vs tiempo y ajuste lineal, diámetro 16 mm.....	86
Gráfica 10. Diferencia relativa al crear un código de cálculo de volumen por integración y no usar <i>trapz</i> , diámetro 20 mm.	88
Gráfica 11. Volumen de la burbuja calculado por la izquierda y derecha, diámetro 20 mm.	88
Gráfica 12. Volumen de la burbuja vs tiempo y ajuste lineal, diámetro 20 mm.....	89
Gráfica 13. Movimiento del centroide de la burbuja vs tiempo, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).....	91
Gráfica 14. Movimiento del centroide de la burbuja vs tiempo, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).....	92

Gráfica 15. Altura máxima de la burbuja vs tiempo, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).	92
Gráfica 16. Altura máxima de la burbuja vs tiempo, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).....	93
Gráfica 17. Velocidad de la altura máxima de la burbuja, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).....	94
Gráfica 18. Velocidad de la altura máxima de la burbuja, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).....	94
Gráfica 19. Radio equivalente de la burbuja asumiendo esferoidización, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).	95
Gráfica 20. Radio equivalente de la burbuja asumiendo esferoidización, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).	95
Gráfica 21. Dinámica de la línea de contacto (impuesta manualmente), diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).	96
Gráfica 22. Dinámica de la línea de contacto (impuesta manualmente), diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).	96
Gráfica 23. Diámetros medios y su desviación con barras de error.	97
Gráfica 24. Volúmenes medios y su desviación con barras de error.....	98
Gráfica 25. Radios equivalentes medios y desviaciones con barras de error.	99
Gráfica 26. Alturas máximas medias y desviaciones típicas.....	99
Gráfica 27. Coordenadas Y del centroide medias y desviaciones típicas.	100
Gráfica 28. Ángulos con las distintas interpolaciones, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b)....	108
Gráfica 29. Ángulos con las distintas interpolaciones, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).....	109
Gráfica 30. Radio máximo (en la base) para las distintas interpolaciones, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).	111

Gráfica 31. Radio máximo (en la base) para las distintas interpolaciones, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).	112
Gráfica 32. Ángulo de la interpolación lineal total y suavizado, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).	113
Gráfica 33. Ángulo de la interpolación lineal total y suavizado, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).	114
Gráfica 34. Radio máximo (en la base) de la interpolación lineal total y suavizado, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).	116
Gráfica 35. Radio máximo (en la base) de la interpolación lineal total y suavizado, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).	117
Gráfica 36. Velocidad del radio máximo suavizado, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).	119
Gráfica 37. Velocidad del radio máximo suavizado, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).	119
Gráfica 38. Radio máximo suavizado y zona de movimiento de retroceso, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).	120
Gráfica 39. Radio máximo suavizado y zona de movimiento de retroceso, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).	121
Gráfica 40. Diferencias relativas entre el radio de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 8 mm.	122
Gráfica 41. Diferencias relativas entre el radio de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 10 mm.	122
Gráfica 42. Diferencias relativas entre el radio de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 16 mm.	123
Gráfica 43. Diferencias relativas entre el radio de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 20 mm.	123

Gráfica 44. Diferencias relativas entre el tiempo de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 8 mm.....	124
Gráfica 45. Diferencias relativas entre el tiempo de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 10 mm.....	124
Gráfica 46. Diferencias relativas entre el tiempo de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 16 mm.....	125
Gráfica 47. Diferencias relativas entre el tiempo de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 20 mm.....	125

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen experimentación realizada.	48
Tabla 2. Comparación volumen final y volumen de Fritz, para diámetro 8 mm.....	79
Tabla 3. Comparación caudal medido con el caudalímetro y con el análisis. Ajuste a la regresión lineal, para diámetro 8 mm.....	80
Tabla 4. Comparación diámetro de la base de la burbuja, diámetro real de la superficie y diámetro equivalente de la burbuja final, para diámetro 8 mm.	81
Tabla 5. Tiempo de llenado, diámetro 8 mm.	81
Tabla 6. Comparación volumen final y volumen de Fritz, para diámetro 10 mm.....	83
Tabla 7. Comparación caudal medido con el caudalímetro y con el análisis. Ajuste a la regresión lineal, para diámetro 10 mm.....	83
Tabla 8. Comparación diámetro de la base de la burbuja, diámetro real de la superficie y diámetro equivalente de la burbuja final, para diámetro 10 mm.	84
Tabla 9. Tiempo de llenado, diámetro 10 mm.	84
Tabla 10. Comparación volumen final y volumen de Fritz, para diámetro 16 mm.....	86
Tabla 11. Comparación caudal medido con el caudalímetro y con el análisis. Ajuste a la regresión lineal, para diámetro 16 mm.....	86
Tabla 12. Comparación diámetro de la base de la burbuja, diámetro real de la superficie y diámetro equivalente de la burbuja final, para diámetro 16 mm.....	87
Tabla 13. Tiempo de llenado, diámetro 16 mm.	87
Tabla 14. Comparación volumen final y volumen de Fritz, para diámetro 20 mm.....	89
Tabla 15. Comparación caudal medido con el caudalímetro y con el análisis. Ajuste a la regresión lineal, para diámetro 20 mm.....	89
Tabla 16. Comparación diámetro de la base de la burbuja, diámetro real de la superficie y diámetro equivalente de la burbuja final, para diámetro 20 mm.....	90

Tabla 17. Tiempo de llenado, diámetro 20 mm.	90
Tabla 18. Comparación diámetro superficie y de la base de la burbuja medios y sus desviaciones típicas.	101
Tabla 19. Comparación radio equivalente, altura máxima y coordenada Y del centroide medias y sus desviaciones típicas.	101
Tabla 20. Comparación volumen, volumen de Fritz nominal y volumen de Fritz real medios y desviaciones típicas.	102
Tabla 21. Comparación entre la desviación típica y el error cometido.	103
Tabla 22. Valores medios y desviaciones típicas del radio y tiempo de inicio de movimiento.	126

1. Introducción

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio de la formación de burbujas sobre superficies hidrofóbicas. En este tipo de superficies el tamaño de la burbuja resultante es muy superior al de la formada en una tobera o aguja de uso en laboratorios o industria. Además, de ser muy diferentes algunos de los parámetros que rigen el proceso de formación de las burbujas, tales como el ángulo de contacto de la triple interfase (sólido-líquido-gas), la superficie periférica o el diámetro de la superficie de contacto entre el gas de la burbuja y el sólido donde se encuentra.

En superficies hidrofóbicas los parámetros, ángulo y superficie de contacto, así como la variación de los mismos a lo largo del tiempo, son claves en el proceso de formación, desprendimiento y volumen final de la burbuja. Aunque en el siguiente estudio se tiene un especial interés en superficies hidrofóbicas, los parámetros anteriormente indicados, también influyen en las burbujas formadas en superficies hidrofílicas o neutras.

1.1. Motivación

El estudio de los procesos que intervienen en la formación de burbujas y sobre todo su control, se torna cada día más importante. Debido a que se están descubriendo numerosas utilidades y es un campo en el que la investigación ha realizado pocos avances, centrándose más en el estudio de las gotas de agua; tal es el estudio de Eggers [1]. En este estudio se demuestra mediante experimentos y simulación numérica, la importancia de la tensión superficial en la separación de un flujo libre en gotas, como ocurre en la Figura 1.

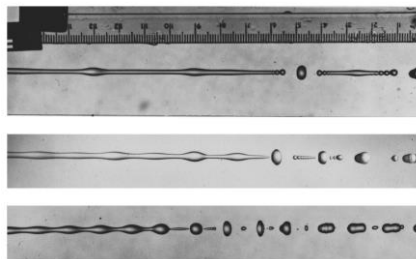


Figura 1. Separación de un chorro en gotas, [1] FIG. 4.

Las aplicaciones, anteriormente mencionadas, son tan diversas que abarcan desde la industria de gestión de residuos, hasta la alimenticia, pasando por la simulación de la naturaleza en acuarios. En los acuarios de corales (Figura 2) se usan microburbujas para simular la oxigenación que se produce cuando rompen las olas en los arrecifes de coral, así como para limpiar el agua, ya que las burbujas aparte de oxidar los residuos orgánicos, los transportan a la superficie. Esta última propiedad de las burbujas, se debe a que están formadas a través de la inyección de aire (21 % de oxígeno), siendo su densidad menor que la del agua, lo que permite que asciendan según el principio de Arquímedes (balance entre empuje y peso o rozamiento de la burbuja), el desprendimiento se produce según el volumen de Fritz (balance entre flotabilidad y tensión superficial).

$$\rho_S g V_S = \rho_f g V_{des}$$

$$V_F = \frac{2\pi\sigma a}{\rho g}$$

Siendo:

ρ_S	Densidad del sólido, en este caso aire del burbuja
g	Gravedad
V_S	Volumen del sólido, en este caso de la burbuja
ρ_f	Densidad del fluido
V_{des}	Volumen desplazado
σ	Tensión superficial
a	Radio del inyector

Esto es lo que se usa en otra de las aplicaciones, oxigenación de biorreactores (Figura 2), proceso en el que se suministra aire a alta presión con compresor, para favorecer la agitación de los residuos, así como su oxidación, dando lugar a la fermentación. Además, se usan microburbujeadores que proporcionan burbujas de menor tamaño, lo que aumenta el área de contacto con el líquido, por tanto, la transferencia de oxígeno [2].

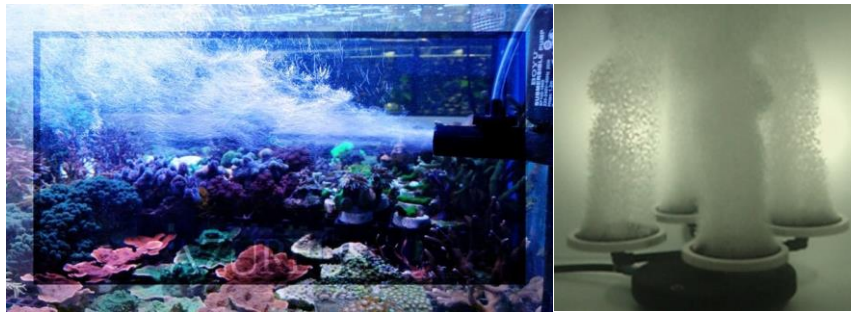


Figura 2. Oxigenación de acuario de corales [24], a la izquierda; Microburbujeadores para aireación de biorreactores [23], a la derecha.

Continuando con las aplicaciones, la industria de las bebidas gaseosas, en las que se disuelve CO_2 , al mismo tiempo que se rellena el interior del recipiente con gas a alta presión evitando que el CO_2 disuelto, escape. Una vez se abre el recipiente, el gas sale del líquido en forma de burbujas gracias a la nucleación que se produce en las impurezas o rugosidades del recipiente [3].

En procesos más ingenieriles, las burbujas se usan para la purificación de minerales por flotación, técnica llamada hidrometalurgia. En la que después de moler el mineral, mediante la flotación, proceso equivalente al descrito en los acuarios y biorreactores, se separa la ganga (desechos) del mineral enriquecido [4], otro ejemplo puede ser el uso de las burbujas para favorecer la transferencia de masa y calor.

Puede prestarse a confusión, el por qué se investiga un método para conseguir la formación de burbujas de mayor volumen, cuando en todas las aplicaciones anteriores se exige un mínimo tamaño a las burbujas, para que exista una mayor área de contacto. La explicación es clara y sencilla, en la investigación realizada, se trata la influencia del ángulo y dinámica de la línea de contacto en la formación de cualquier burbuja, aunque nuestros experimentos, por lo novedoso, se realizan sobre superficie hidrofóbica, problema que es doblemente poco estudiado. Gracias a este tipo de superficies, los parámetros básicos de la formación de la burbuja, como los indicados anteriormente, se pueden visualizar de forma más fácil. Por tanto, este tipo de grandes burbujas son interesantes a nivel académico en la investigación básica. Además, en la actualidad están apareciendo nuevos materiales ingenieriles que requieren del uso de burbujas de gran tamaño.

Por ejemplo, existe un nuevo material ligero, las espumas metálicas [5]. Son metales porosos desarrollados en los últimos años, y se fabrican mediante la combinación de gas en forma de burbujas y metal, siendo la proporción de gas de entre un 50 y 90 % de la estructura completa. Por esta combinación tan peculiar consiguen combinar propiedades de materiales ligeros, como una baja densidad, con la alta rigidez de los metales. Esto da lugar a piezas ultraligeras, pero de una alta resistencia mecánica, útiles, además, para tanto aislamiento térmico, como acústico. El principal material desarrollado son las espumas de aluminio, que se muestran en la Figura 3.

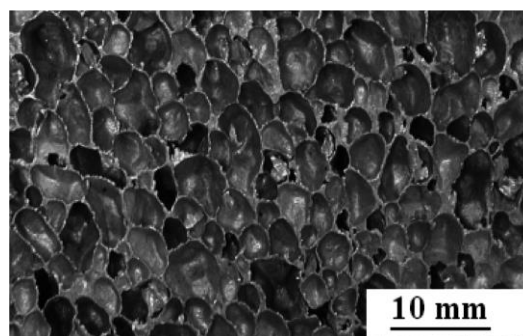


Figura 3. Espuma de aluminio, [5] Figura 1.

Unas nociones básicas del proceso de fabricación. Se realiza la fundición del metal y cuando se encuentra en estado líquido se inyecta gas en su interior, debido a la tendencia a la ascensión de las burbujas, se añaden aditivos al metal fundido como las partículas cerámicas que aumentan la viscosidad del mismo, dificultando la ascensión de las burbujas, al menos hasta su solidificación. En la actualidad, la espuma de aluminio está siendo utilizada en la industria de la automoción, aeroespacial, ferroviaria, naval, etc. [5].

Por último, G. Corchero [6] hace referencia a una solución en la inyección de gas en metales fundidos, para formar burbujas de cierto tamaño, que sería muy útil para la fabricación de las espumas anteriormente mencionadas, de hecho, se habla de un uso actual. Las toberas usadas se cubren de un sólido refractario, al que el metal fundido moja parcialmente, superficie hidrofóbica, provocando que las burbujas tengan un tamaño del doble al esperado, si se usase una superficie con buena mojabilidad.

1.2. Objetivos

Como se expuso en la propuesta del Trabajo Fin de Grado, el objetivo principal de este proyecto es el “estudio experimental y teórico de la influencia de la línea de contacto en la dinámica de formación de burbujas”. Esto quiere decir que se va a intentar explicar cómo afecta la variación de la entrefase, ya sea la zona superficial de la burbuja con una doble entrefase líquido-gas o la parte inferior donde existe una triple entrefase líquido-gas-sólido, en la formación y desprendimiento de burbujas, en el interior de un líquido en condiciones de reposo. Para abordar este gran problema, se divide en objetivos asequibles en la consecución del Trabajo:

- Influencia global de la mojabilidad del sólido (superficie hidrofílica $\theta < 90^\circ$, neutra $\theta = 90^\circ$ o hidrofóbica $\theta > 90^\circ$) en el proceso de generación de burbujas.
- Determinación experimental del radio máximo de la línea de contacto entre sólido-líquido-gas y su variación temporal, comparándolo con el de la superficie hidrofóbica y su influencia en el volumen final.
- Determinación experimental del ángulo de contacto en la triple entrefase y su variación temporal, e influencia en el volumen final, para el caso de una superficie hidrofóbica, como se ha dicho antes con ángulo de contacto de equilibrio o estático superior a 90° .

Se puede adelantar, aunque en posteriores apartados se desarrolla, la metodología que se va a emplear. Básicamente, se realizarán experimentos invocando las condiciones mencionadas en los objetivos, se recogerán los datos mediante cámaras de alta velocidad y se analizarán con códigos ad-hoc (específicamente realizados para este proyecto) en Matlab ©.

1.3. Antecedentes o estado del arte.

Aunque como se ha explicado en los apartados anteriores, el uso de la burbujas está muy extendido, el proceso de su formación está muy lejos de comprenderse. Esto se debe a que la mayoría de estudios no tienen en cuenta la dinámica de la línea de contacto, están basados, exclusivamente, en control del caudal, diámetro del inyector y condiciones de reposo del líquido exterior. Por otro lado, los ensayos teóricos no son

comparables, en su mayoría, con los experimentos, debido a que se asumen demasiadas condiciones idealizadas de geometría, aún más sabiendo que no se conoce la dinámica de la interfase. A continuación, se estudiarán algunos autores que realizaron avances en este ámbito y que corroboraron lo puntualizado al inicio.

S.V. Gnyloskurenko et al. [7] en su artículo de investigación, realizó ensayos experimentales, obteniendo correlaciones empíricas para describir el efecto de la superficie en la formación de una burbuja en líquido en reposo. Para distintos ángulos de contacto de la interfase, es decir, para diferentes condiciones de mojabilidad.

En el artículo se hace hincapié en conceptos muy claros y diferenciados de otros estudios, como son las etapas en la formación de la burbuja y la histéresis del ángulo de contacto. Las etapas en la formación se dividen en nucleación, por debajo del tamaño crítico, tamaño crítico y formación del cuello, se puede observar en la Figura 4. La histéresis del ángulo está provocada por el desplazamiento forzado de la interfase al inyectarse un flujo de aire.

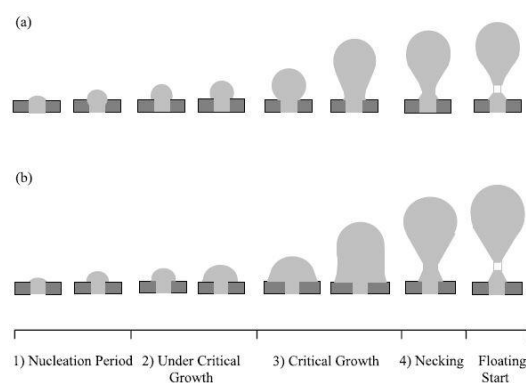


Figura 4. Etapas en la formación de una burbuja. Buena mojabilidad, arriba; Mala mojabilidad, abajo. [7] Fig. 4

Tradicionalmente, el volumen final venía dado por el volumen de Fritz, es decir, por un balance entre la fuerza de flotación y la tensión superficial que mantiene adherida la burbuja, al orificio. Pero S.V. Gnyloskurenko et al. [7] demuestra que en condiciones de reposo el volumen final depende, principalmente, del ángulo de contacto y no de las anteriores fuerzas; se corrobora que cuanto mayor es el ángulo de contacto, mayor es el volumen de la burbuja final.

Otra de las claves del estudio y que lo diferencia de los estudios teóricos realizados, es que bajo condiciones hidrofóbicas las burbujas dejan de ser esféricas (asumido en los estudios teóricos), debido a la deformación y aumento de la burbuja alrededor del orificio (una vez más se ve la influencia de la línea de contacto). Para aumentar la precisión de las mediciones, la burbuja se divide en zonas de geometría regular, de arriba hacia abajo, segmento esférico, zona esférica, cilindro y cono truncado.

A.V. Byakova et al. [8] continúa este estudio reafirmando en las cuestiones planteadas en el anterior artículo, en el que participa [7], pero centrándose en la búsqueda de una correlación entre el volumen de la burbuja y el caudal de aire, que se demuestre empíricamente válida, para flujos bajos, ya que existen ecuaciones que predicen dicho volumen, tales como: $V = NQ^{6/5}g^{-3/5}$, donde el factor N se modifica según el autor, desde un único valor [9] hasta valores diferenciados dependientes de la etapa de la formación que se estudie [10], ofreciendo un valor muy similar al real pero para rangos altos de caudal. Como ya se ha mencionado, cuando se tienen rangos bajos aparecen las discrepancias entre los estudios teóricos y experimentales [7]. Se concluye que a bajos flujos, el comportamiento de la burbuja durante su formación se puede explicar mediante la realización de un balance de fuerzas (flotabilidad, componente vertical de la tensión superficial como fuerza adhesiva al disco, presión hidrostática y presión del aire) en cada etapa y el equilibrio de la interfase. Se obtiene una correlación válida para numerosos caudales de aire, derivada de la ecuación de Davidson y Amick [11]:

$$V = K_o D^n (Q^2 g^{-1})^m$$

V Volumen de la burbuja

g Gravedad

Q Caudal

D Máximo diámetro de periferia de la burbuja en la base

K_o, m, n Variables obtenidas experimentalmente.

Por otro lado, G. Corchero et al. [6] realiza el mismo tipo de experimentos, pero centrándose en la búsqueda de condiciones de flujo totalmente constante, con el uso

de capilares, y en conseguir correlaciones empíricas que relacionen el caudal con el volumen en el desprendimiento. Las variaciones en el caudal suelen deberse a la sobrepresión que se produce en la burbuja y que se transmite al flujo inyectado. Dicha sobrepresión es debida a que el radio de la burbuja desciende desde un valor máximo, al inicio, hasta casi ser del orden del orificio, y a continuación, vuelve a crecer. Como se indica, para solucionar esto se introduce un capilar, que impone una caída de presión o pérdida de carga del orden de la sobrepresión.

Para afirmar que se consigue un flujo constante, basta con calcular el volumen de la burbuja a lo largo del tiempo y ver si se ajusta a una recta, es decir, tendrá una pendiente constante que será el caudal.

A diferencia de S.V. Gnyloskurenko et al. [7], en este artículo se distinguen tres etapas en la formación: en la primera, etapa corta, la burbuja es circular; en la segunda etapa, etapa más larga, la burbuja se aproxima a un cilindro cerrado con un casquete esférico; por último, la tercera etapa, etapa corta, el cilindro anterior es del orden del radio de la burbuja. Además, en la etapa inicial, la línea de contacto avanza lejos del orificio y en la última, retrocede hasta cerca del orificio.

Resulta interesante las extrapolaciones del número de Bond y volumen de Fritz para el caso de superficies hidrofóbicas. En ellas, debido a que el radio de la línea de contacto está lejos del orificio, se debe utilizar esta dimensión en vez del radio del orificio. Pero se obtienen valores del número de Bond muy grandes, esto indica que la burbuja no tiene forma esférica.

$$B_o = \frac{\rho g a'^2}{\sigma} \quad V_F = \frac{2\pi\sigma a'}{\rho g}$$

V_F Volumen de Fritz B_o Número adimensional, Bond

a' Radio de la línea de contacto

Como se explicará en posteriores apartados, estas aproximaciones sustituyendo, simplemente el radio del orificio por el radio de la línea de contacto, no son muy precisas. Experimentalmente, se observa que, en cualquier tamaño de superficie hidrofóbica, los valores del volumen final y volumen de Fritz difieren.

En último lugar, en esta recopilación de información de lo hasta ahora estudiado sobre el trabajo desarrollado durante este año, en la realización del Trabajo de fin de grado; se hace referencia a las simulaciones numéricas. En este ámbito, Yuming Chen et al. [12] coincide con los anteriores artículos en que la formación de la burbuja depende del movimiento de la línea de contacto de la triple entrefase, siendo este parámetro y el ángulo de contacto de retroceso, las variables que se necesitan como entrada. Concretando en la simulación numérica, se incide en la importancia de establecer unas condiciones de contorno apropiadas para una buena predicción de la generación de burbujas. Se establecen dos modelos para la línea de contacto. El primero de ellos es dependiente de la velocidad de dicha línea y el segundo basado en las oscilaciones, aunque el segundo modelo, llamado Modelo B, es el que mejor se ajusta a la realidad en simulaciones macroscópicas. Las condiciones de baja mojabilidad se tienen en cuenta mediante los cambios en el máximo diámetro de la línea de contacto.

Para facilitar las simulaciones, se estudian modelos en dos dimensiones considerando simetría axial. Se llega a la conclusión de que, debido a la fuerte dependencia entre el diámetro de la burbuja y el ángulo de contacto, las simulaciones no se aproximan a los valores reales de forma significativa. Por tanto, es necesario realizar estudios experimentales de calidad, que provean de condiciones de contorno realistas a las simulaciones numéricas.

Como puede deducirse de todo lo expuesto en los artículos mencionados, y como se adelantó en la introducción a este apartado, es necesario realizar estudios experimentales de calidad y en profundidad, sobre el movimiento de la línea de contacto y cómo afecta a los parámetros fundamentales de la burbuja, sobre todo en el caso de una superficie con baja mojabilidad, donde juega un papel fundamental. Por ello, se realizó la investigación que se encuadra en este proyecto.

2. Descripción del problema

En el siguiente apartado se realizará una descripción detallada del problema que nos atañe, no solo centrándose en las características del problema sobre el que se han realizado los experimentos y procesado, sino una descripción de la investigación de formación de burbujas.

Se comienza con una breve descripción de la propiedad física, tensión superficial, que es el parámetro, junto con la fuerza de flotabilidad, que determina cómo ocurrirá la formación de la burbuja [8].

En cuanto al proceso de formación de burbujas, se comienza con los posibles flujos de suministro de aire que se pueden utilizar tanto en los laboratorios de investigación, como en los procesos reales de la industria. Uno de los parámetros más importantes es la superficie del orificio y su mojabilidad, porque de ello dependerá el tamaño de la burbuja final y su comportamiento durante la generación, éste será el siguiente apartado, a continuación, se abordará el proceso de formación de burbujas, que como se indicó depende de numerosos parámetros y consta de varias etapas dependiendo del autor [6,7]. En cuanto a la generación de burbujas, por último, se realiza un esquema de los parámetros que intervienen en la formación.

Aparte, se realizará una introducción a los artículos e investigaciones realizadas sobre procesado de imágenes.

2.1. Tensión superficial

La tensión superficial es la energía superficial (energía por unidad de área) que existe en la interfase de dos líquidos o medios distintos [13]. Esta área tendrá una cierta magnitud, A , y se necesita una cantidad de energía, σdA , para aumentar dicha superficie una cantidad, dA , siendo la tensión superficial, σ . Recibe el nombre de tensión superficial porque en cualquier línea contenida en la superficie de separación (circunferencia), existe una fuerza por unidad de longitud, σ , perpendicular a la línea y tangente a dicha superficie. Por lo que, si se desplaza la fuerza, una longitud, dx , al mismo tiempo que aumenta la línea, dl , se obtiene un trabajo, se esquematiza en la Figura 5:

$$\sigma dl dx = \sigma dA$$

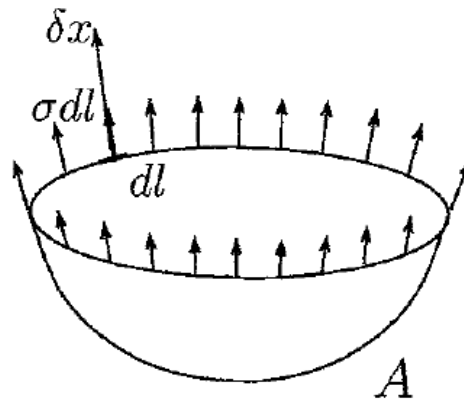


Figura 5. Esquema tensión superficial en la superficie de separación, A. [14] Fig 6.1

La tensión superficial es clave en la formación de una burbuja [13], porque gracias a la intervención de la misma o más bien de su valor positivo, la burbuja puede estar contenida en el agua en reposo y no diluirse en la misma. Esto no siempre ocurre, ya que para el caso de tensión superficial negativa los fluidos intervinientes serán miscibles y no se formará burbuja. Esta miscibilidad o no, dependerá de la forma en que el sistema alcance el equilibrio a través de minimizar su energía, según la segunda ley de la termodinámica. La mezcla de los dos fluidos ocurre cuando para minimizar la energía, la superficie de separación entre ambos tiende a ampliarse, sin embargo, dos líquidos no serán miscibles si se adopta el área mínima. Por ello se asume que una burbuja tiene forma esférica, ya que es la geometría de menor superficie para un mismo volumen.

Se puede demostrar, haciendo equilibrio de fuerzas en la dirección normal a la superficie entrefase, que la tensión superficial hace que dicha entrefase soporte las fuerzas a las que está sometida, sin que la burbuja se rompa [14]. Se realiza el equilibrio en la dirección normal, porque en la dirección tangencial solo se plantea en caso de fluido en movimiento, un fluido no puede resistir un esfuerzo tangencial.

Hay que tener en cuenta, ya que nuestro ámbito es la investigación y se necesitan valores muy precisos, que la tensión superficial es muy dependiente de la temperatura del medio exterior.

Destacar que, para el caso de superficie hidrofóbica, las burbujas no son totalmente esféricas. Esto se debe a que, aunque la superficie mínima, para minimizar la energía es una esfera, se deben tener en cuenta otras energías como la energía cinética o la energía potencial debida a la gravedad, que aumentan su importancia cuando la burbuja es grande. Por ejemplo, en nuestro experimento, aunque no se centra en ello, se obtienen números de Bond de gran magnitud.

Otros dos parámetros relacionados con la tensión superficial, que son importantes (fundamentales en el caso de superficie hidrofóbica) para el proceso de formación de una burbuja, son la línea y ángulo de contacto.

2.1.1. Línea y ángulo de contacto

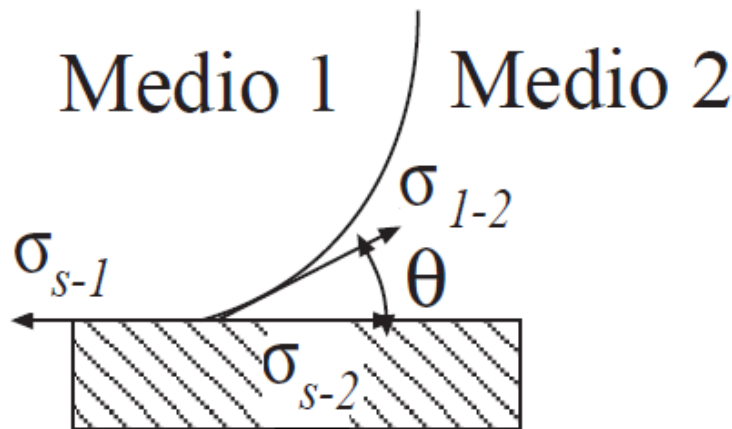


Figura 6. Esquema línea y ángulo de contacto. [13] Fig. 1.4

La línea de contacto es la representación bidimensional de la superficie entrefase, es decir, la intersección del medio 1 y 2, como se ve en la Figura 6; y que limita, además, con el sólido. Por ello, se le llama la triple entrefase (sólido, líquido y gas) [7]. Analizando el reposo en cada momento, la línea de contacto debe estar en equilibrio, y ya que la tensión superficial es una fuerza por unidad de longitud, el equilibrio se realiza con esta fuerza. Debido a la existencia de la superficie sólida, que no se puede deformar, el equilibrio de fuerzas se realiza en la dirección tangencial [13].

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

El ángulo de contacto depende de la superficie del sólido y de los otros dos medios, siendo distinto para el agua, aire o mercurio en el Medio 2 y para una superficie hidrofóbica, hidrofílica o neutral, se extenderá en el apartado 2.3, aunque se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Ángulo de contacto buena mojabilidad (izquierda), mala mojabilidad (derecha) del líquido.

2.2. Flujo de aire

El siguiente aspecto importante en cuanto a la formación de burbujas, son las condiciones del flujo de aire inyectado. Como se introdujo al inicio, muchos autores centran sus estudios en establecer unas condiciones de flujo realmente constante [6]. Concretamente, lo más usual es realizar investigaciones con un flujo a caudal constante, sin embargo, existen otras posibilidades como son flujos a presión constante y caudal variable o flujos mixtos.

En la investigación normalmente se asume que el flujo de aire inyectado es constante, aunque en realidad no lo es, al menos no totalmente. Esto se debe a que, durante el proceso de formación y desprendimiento de la burbuja, su radio descende desde grandes valores, hasta ser de entorno el tamaño del orificio y con una nueva burbuja vuelve a crecer, estos cambios en el volumen producen una sobrepresión, que se transmite por el circuito de inyección haciendo que el caudal varíe. Haciendo un inciso, esto se puede observar fácilmente en el laboratorio con un caudalímetro, fijándonos en que el caudal se mantiene constante durante el crecimiento de la burbuja y en el momento del desprendimiento y generación de la nueva burbuja se produce una oscilación. Estas oscilaciones debidas a los cambios de presión se pueden reducir a su mínima expresión, introduciendo un tubo capilar, justo antes de la entrada al sistema de inyección. Este capilar introduce pérdidas de carga primarias de una magnitud mucho mayor que los cambios de presión.

Se puede comprobar, que el tubo capilar está manteniendo el flujo constante cuando se represente la curva del volumen frente al tiempo y se ajuste a un comportamiento lineal, siendo la pendiente el caudal.

Aparte de controlar si el flujo es constante o no, se debe dirimir si se necesitan rangos altos o bajos de caudal, ya que la formación de la burbuja es muy dependiente de su magnitud, fundamentalmente porque grandes flujos de caudal, dan lugar a que el volumen final de la burbuja dependa del balance entre la flotabilidad y la fuerza de inercia, siendo prácticamente independiente del radio del orificio. En contraposición, en bajos rangos de caudal, el volumen de la burbuja final depende de la fuerza de flotación y la tensión superficial en el orificio. Existen aproximaciones que definen dicho volumen para los dos tipos de flujos, rangos altos con la fórmula de Davidson y Amick [11] y rango bajos con el volumen de Fritz, siendo una aproximación que se ajusta a la realidad en condiciones cuasiestáticas [15], aunque en [8] se incide en que la tensión superficial debe ser en su componente vertical, teniendo en cuenta el ángulo de contacto.

Debido a la necesidad industrial de generación de gran cantidad de burbujas, se usan flujos por encima del valor crítico, que provocan la pérdida de predicción del tamaño de las burbujas, dando lugar a la coalescencia de las mismas cerca del inyector, es decir, las burbujas se unen entre sí, dando lugar a grandes masas de aire. Siendo esto contrario al propósito de formar microburbujas.

Para solucionar estos problemas surgen otros tipos de flujos como: coflujo, generación de turbulencias o flujo cruzado, se esquematizan en la Figura 8.

Se generan turbulencias en un flujo laminar, provocando la aparición de una tensión cortante turbulenta, que produce un proceso de fragmentación o desprendimiento de la capa límite, dando lugar a partes cada vez más pequeñas. Hasta que la tensión turbulenta es del orden de la tensión superficial de la burbuja. Aunque este método es muy complejo, porque no se conocen profundamente las condiciones de un flujo turbulento.

Por otro lado, existe el sistema coflujo, [15], que consiste en inyectar un gas en el interior de un flujo líquido en la misma dirección. Esto nos permite grandes caudales

de gas sin que se provoque la coalescencia de las burbujas y la pérdida de homogeneidad.

Por último, el flujo cruzado, [16], el método más utilizado para generar microburbujas. Consiste en que el gas es inyectado perpendicular al canal por donde circula el líquido. Normalmente, para controlar las condiciones y tamaño de la burbuja se suelen usar flujos a bajo número de Reynolds y en forma de chorro o gotas/burbujas. En este tipo de flujos es la presión aguas arriba la que provoca el desprendimiento. Sin embargo, la rotura también se puede producir porque la burbuja llegue a ocupar todo el canal del líquido, lo que sucede cuando el tensor de esfuerzos viscosos no es suficientemente grande; otra forma de desprendimiento puede ocurrir, cuando la parte superior de la burbuja es llevada por el líquido hasta la esquina que forma la zona de inyección de gas con el canal del líquido.

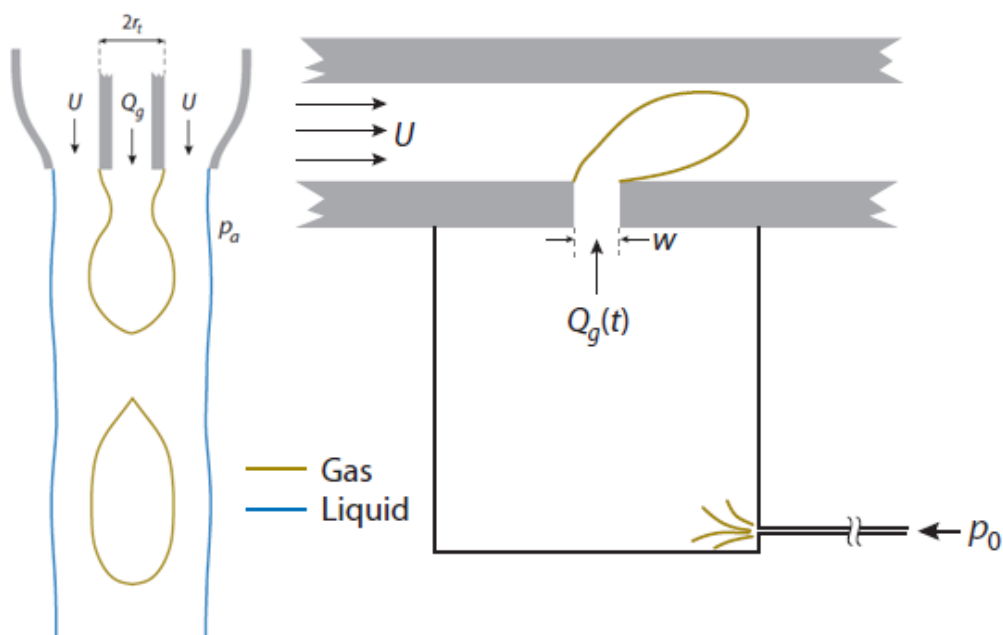


Figura 8. Sistema coflujo y flujo cruzado (de izquierda a derecha). [16] Figure 3

2.3. Tipos de superficies de orificios

Como ya se ha citado en más de una ocasión en estas páginas, existen tres tipos de superficies en un orificio, que dependen de la capacidad del líquido para mojar o no dicha superficie, pueden ser superficies hidrofílicas, neutras o hidrofóbicas. Estos tipos se dirimen con el ángulo de contacto, siendo una superficie con mala mojabilidad

si el ángulo de contacto es superior a 90° , neutra si es igual a 90° y buena si es inferior a 90° .

Este ángulo, es el ángulo de contacto de equilibrio, es decir, aquel que delimita la etapa de crecimiento por debajo del tamaño crítico y el tamaño crítico, según [7].

En la mayoría de artículos dedicados al estudio de generación y crecimiento de burbujas se obvia como parámetro influyente en la formación de la burbuja, sin embargo, el tamaño de la burbuja tanto en volumen, como en superficie, se incrementa si se usa una superficie hidrofóbica. Esto se debe a que la superficie de la interfase no se encuentra confinada en el orificio, sino que puede avanzar más allá del mismo, hasta alcanzar el diámetro de la superficie de baja mojabilidad, teniendo en cuenta que existe cierto límite. Por ejemplo, en el producto Neverwet es de unos 16 o 18 mm (diámetro en el pie de la burbuja), aunque la superficie tenga 20 mm de diámetro. El movimiento de los límites de la burbuja, desde el orificio hasta el final de la superficie, provoca que sean parámetros fundamentales el movimiento de la línea de contacto y la histéresis del ángulo de contacto.

En condiciones de baja mojabilidad, como es el caso que se está investigando, las burbujas dejan de tener una geometría esférica, debido a la deformación que sufre la misma durante su amplificación alrededor del orificio. Como ya se indicó, este es uno de los problemas, que conllevan la imposibilidad para realizar analogías entre los modelos teóricos y experimentales.

En el apartado 1.3, se introdujo que se puede hacer uso de las ecuaciones, número de Bond y volumen de Fritz, válidas para pequeños flujos y superficie hidrofílica, para el caso de una superficie hidrofóbica, sustituyendo el radio del orificio por el radio máximo de la línea de contacto. Resultados que nos pueden servir de aproximación, pero nunca para establecer algún tipo de error relativo o comparación, ya que no se obtienen valores realistas. Esto se debe a que el movimiento de la línea de contacto no se encuentra controlado, a diferencia de lo que ocurre en una tobera o aguja, esta característica se puede ver en la Figura 9.

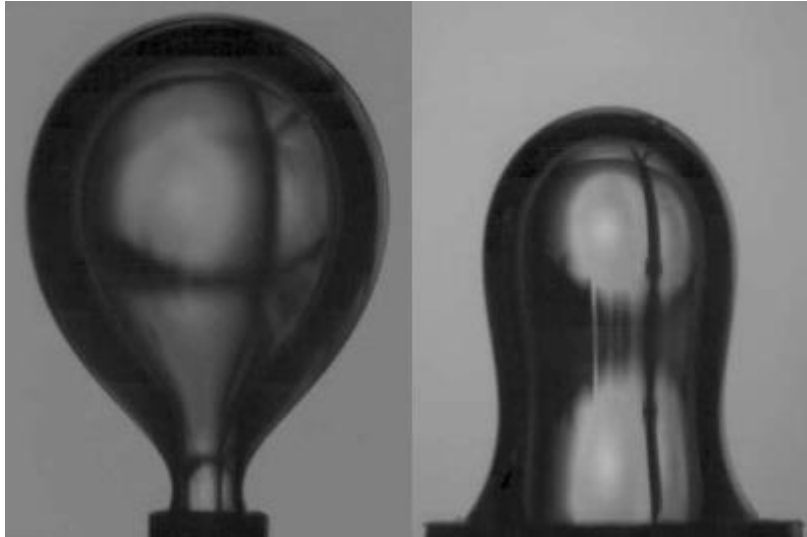


Figura 9. Burbuja en una superficie hidrofílica e hidrofóbica (de izquierda a derecha), con diferentes escalas. [17] Fig. 3 y 4

A pesar de estas diferencias entre los tipos de superficie las etapas de formación de la burbuja son independientes de la mojabilidad.

2.4. Formación de burbujas

Desde el inicio de la investigación que culmina en este Trabajo fin de grado, se ha podido comprobar que existen pocos estudios en este ámbito y numerosas diferencias entre los existentes. Esto conlleva que la unificación de un criterio haya sido de tremenda dificultad.

El principio sería diferenciar las etapas en el proceso de burbujeo o formación de la burbuja. Se podrían distinguir de forma general dos etapas, una primera etapa de generación y crecimiento de la burbuja y la segunda, que comienza con la formación del cuello hasta el desprendimiento. A continuación, se presenta la Figura 10 en la que se muestra el ciclo completo de la formación de una burbuja de forma general, incluyendo las dos etapas anteriormente citadas. Posteriormente, en el desarrollo de cada etapa se incluirá una imagen representativa de la burbuja en ese estado.

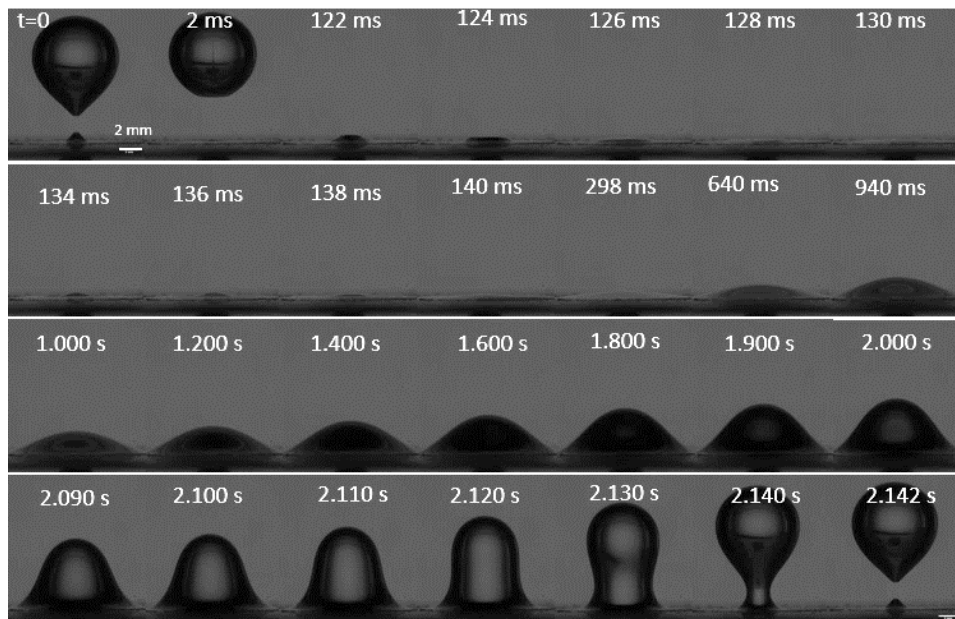


Figura 10. Proceso de formación de una burbuja sobre una superficie hidrofóbica, completo. [Obtenida de R. Bolaños Jiménez]

La primera etapa consiste en una expansión radial y axial de la burbuja alrededor del orificio, permaneciendo anclada al labio del mismo para el caso de buena mojabilidad de la superficie y produciéndose un avance radial en la parte inferior, en el caso de mala mojabilidad. Al final de la etapa se produce el estrechamiento de la periferia de la burbuja, que derivará en el cuello, y el retroceso de la línea de contacto, desde los límites de la superficie hasta cerca del orificio.

Se puede desglosar en varias subetapas según [7] y la Figura 4. Entre ellas, el periodo de nucleación, formación por debajo del crecimiento crítico y crecimiento crítico.

➤ Etapa de nucleación

Una vez se ha desprendido la burbuja anterior, se puede asegurar que una cierta cantidad de aire queda anclada al inyector o a la superficie hidrofóbica. Este aire se expande radial y axialmente hasta formar un segmento esférico, que pasa a ser una hemiesfera. En esta etapa la forma de la burbuja es independiente de la superficie del orificio.

El ángulo de contacto, suplementario al estudiado en la Figura 6, va disminuyendo hasta alcanzar los 90°, sea cual sea el tipo de superficie.

Aunque la forma de la burbuja se mantiene estable, la relación entre la superficie y el volumen disminuye rápidamente al inicio y luego suavemente, debido al inicio del llenado de la burbuja.

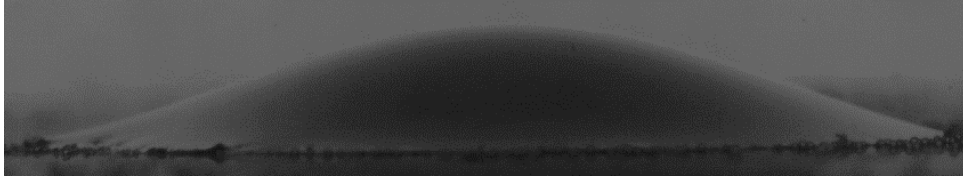


Figura 11. Burbuja en el periodo de nucleación, imagen tomada en el laboratorio.

➤ Crecimiento por debajo del valor crítico

En esta etapa, la burbuja se expande considerablemente, comparando con la etapa de nucleación, el proceso comienza a ser más rápido. Para buena mojabilidad, la burbuja se encuentra anclada en el orificio y solo podrá desplazarse a lo largo de la anchura del mismo, además, en este caso la burbuja mantiene su forma esférica con centro en el orificio. Para baja mojabilidad, la base de la burbuja se va alejando del orificio, recorriendo la superficie hidrofóbica proyectada, en cuanto a la forma, se mantiene como segmento esférico en la parte superior y apareciendo cierta forma cilíndrica en la unión con la base.

Durante esta etapa el ángulo varía (hidrofílica, disminuye e hidrofóbica, aumenta) hasta alcanzar el ángulo de contacto de equilibrio que depende del material de la superficie.

La relación entre la superficie y el volumen sigue disminuyendo, ya que la burbuja continúa llenándose de aire, aumentando su volumen.

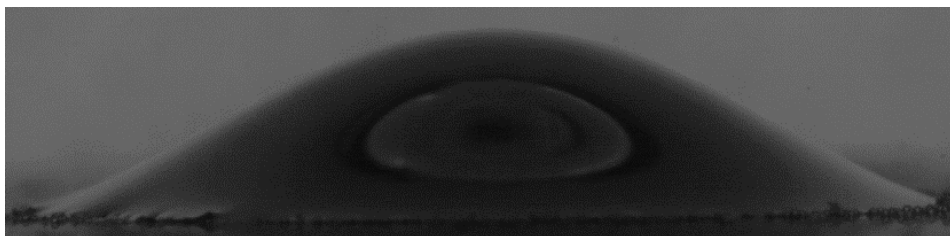


Figura 12. Burbuja en el periodo de crecimiento por debajo del valor crítico, imagen tomada en el laboratorio.

➤ Crecimiento crítico

En esta última subetapa, de la primera etapa de formación de la burbuja, el proceso es mucho más rápido. La burbuja se alarga, axialmente, y expande, radialmente, por tanto, en este punto la burbuja va ascendiendo rápidamente.

La burbuja toma la siguiente forma:

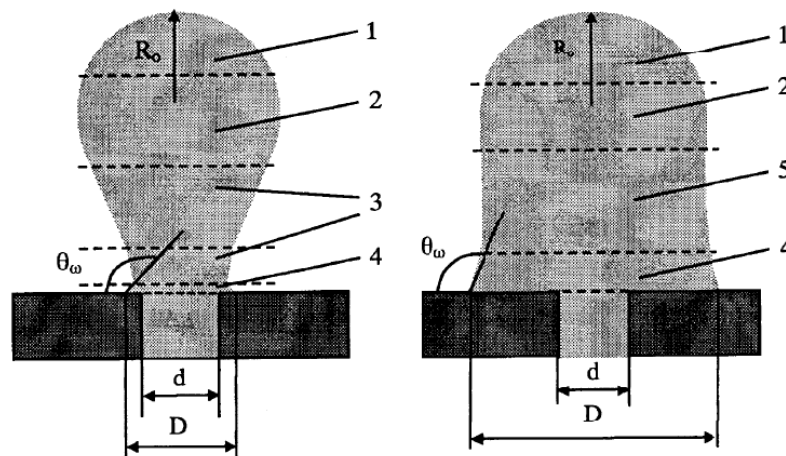


Figura 13. Forma de una burbuja en crecimiento crítico teniendo en cuenta todas sus partes y para buena mojabilidad (izquierda) y mala mojabilidad (derecha). [7] Fig. 2.

Como se puede ver en la Figura 13, aquí no existe ningún tipo de suposición en la forma de la burbuja, lo que hace que los resultados teóricos y experimentales difieran. Se realiza una separación en geometrías regulares [7].

1. Segmento esférico.
2. Zona esférica (un poco menos precisa para superficie hidrofóbica)
3. Cono truncado con el estrechamiento hacia abajo.
4. Cono truncado con el estrechamiento hacia arriba.
5. Zona cilíndrica (solo en superficie hidrofóbica).

Esta subetapa recibe el nombre de crecimiento crítico porque los parámetros geométricos, volumen y área de la interfase de la burbuja, alcanzan su valor máximo. En esta etapa, la relación entre la superficie y el volumen alcanza su valor mínimo, ya que este volumen se puede, incluso considerar una buena aproximación del volumen final de la burbuja tras el desprendimiento.

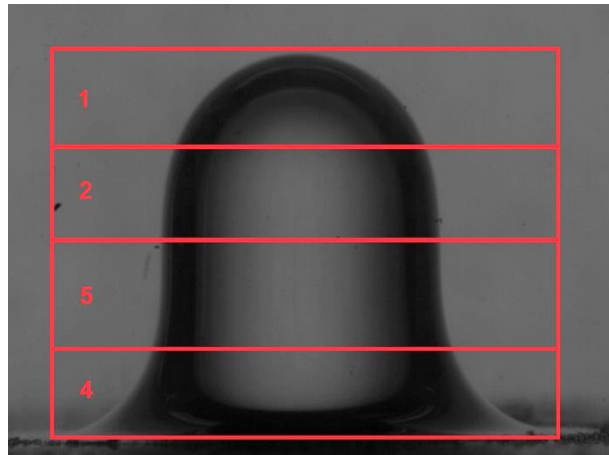


Figura 14. Burbuja en el periodo de crecimiento crítico, imagen tomada en el laboratorio.

En esta etapa, el ángulo de contacto se incrementa hasta alcanzar el valor máximo al final de la etapa.

La segunda etapa es la formación del cuello y posterior desprendimiento. Estos dos sucesos ocurren de forma muy rápida, en cuestión de milisegundos y se deben a que la fuerza de flotación, debido al aumento del volumen de aire y su densidad menor que la del agua, supera a la tensión superficial y se produce el desequilibrio en las fuerzas.

En la zona media de la burbuja, se producen un apéndice hacia abajo, en la parte superior y un apéndice hacia arriba, en la superior, debidos al rápido ascenso de la parte superior de la burbuja. La forma cilíndrica intermedia resultante, es el cuello.

Independientemente de la mojabilidad de la superficie, el diámetro del cuello es más pequeño que el de la burbuja en su parte superior, desde que se forma hasta la rotura. Sin embargo, comparándolo con el orificio, en la parte inicial de su formación es siempre mayor que el orificio y en el tiempo antes de la rotura, se hace más pequeño que dicho orificio, sin llegar a ser cero en el desprendimiento o “pinch-off”.

Aunque se sabe que para bajos flujos de caudal, la tensión superficial es la que equilibra la fuerza de flotación, en el proceso de desprendimiento se debe tener en cuenta la inercia del líquido, ya que es un proceso rápido. Además, las condiciones en que se produce el desprendimiento, por ejemplo, si es asimétrico o simétrico, dependen en gran medida de la situación inicial y de los parámetros que influyen en el problema, por tanto, no existe una solución universal al mismo.

El estudio de cómo se produce el desprendimiento de la burbuja, es un campo de investigación en el que se están realizando numerosos avances, estableciendo ecuaciones que definan el proceso. Ecuaciones, ya estudiadas para el caso del colapso de gotas, por ejemplo: la variación del radio del cuello en función del tiempo hasta el desprendimiento, adimensionalizado. Esta variación se asume dependiente en forma de ley potencial [15].

$$r \propto \tau^\alpha$$

Donde el coeficiente, α , en el caso de desprendimiento asimétrico es un tercio y en el caso simétrico no es constante, varía con el tiempo.

Durante el proceso de formación del cuello, como se produce un rápido alargamiento, la base de la burbuja se desliza desde su diámetro máximo hasta zonas cercanas al orificio. Esto ocurre para una superficie hidrofóbica.

A lo largo de esta etapa se producen las mayores diferencias entre una superficie hidrofílica y una hidrofóbica. En la primera, el volumen se mantiene constante prácticamente desde el final de la subetapa de crecimiento crítico, aunque en el desprendimiento debido a la esferoidización aumenta, y en la segunda el volumen decrece desde esta subetapa, debido a que, al tener una mayor superficie como orificio simulado, hay una mayor cantidad de pérdida de aire, en la burbuja, que permanece como una membrana en dicha superficie.

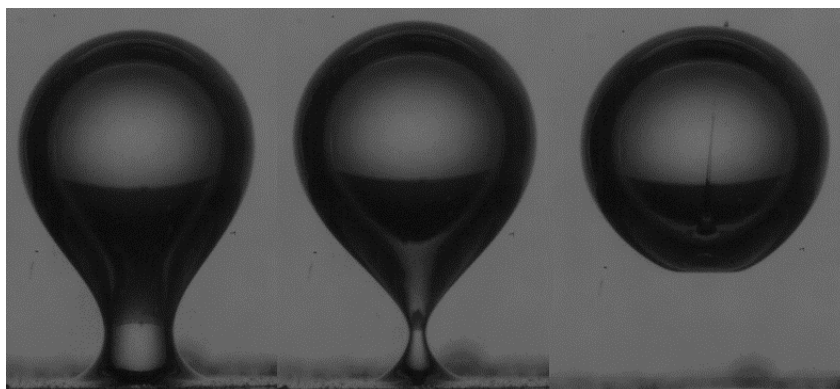


Figura 15. Burbuja en el periodo de formación del cuello y desprendimiento, imagen tomada en el laboratorio.

Todo el proceso de formación de la burbuja, como se ha destacado en todo momento, está dominado por la histéresis del ángulo de contacto. Se produce por el

desplazamiento forzado de la interfase a causa del aire inyectado, que no permite al ángulo alcanzar su valor estable, al que siempre tiende por un proceso de relajación [7], que es el ángulo de contacto de equilibrio.

2.5. Esquema del problema

En este apartado simplemente se realizará un dibujo esquemático, sobre la imagen de una burbuja real capturada en el laboratorio durante la realización de la investigación, en el que se incluirán los parámetros fundamentales estudiados, Figura 16. Se destacan la altura máxima, el diámetro de la burbuja, la posición del centroide, el ángulo de contacto, el diámetro de la base de la burbuja y el diámetro de la superficie hidrofóbica (rociada con Neverwet).

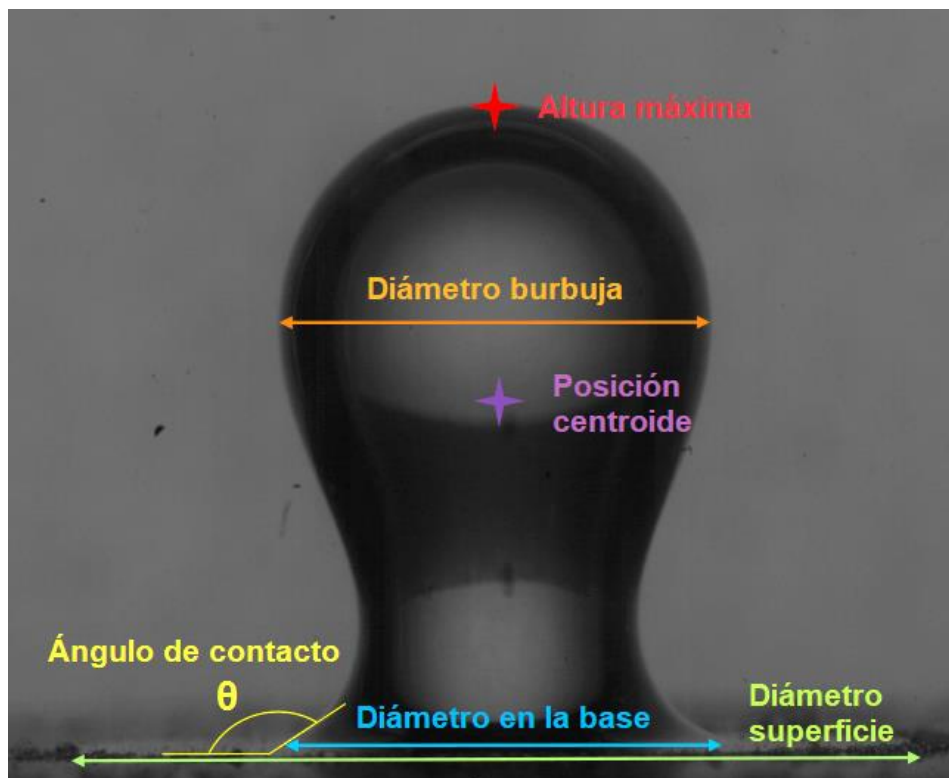


Figura 16. Esquema con todos los parámetros a estudiar.

2.6. Procesado de imágenes

En el desarrollo del trabajo, se ha tenido que calcular el volumen como resultado fundamental a obtener de la imágenes grabadas con las cámaras de alta velocidad. La obtención de información a partir de imágenes es una técnica llamada procesado de imágenes que, aunque muy usada, es de gran dificultad. Esto se debe a que la

umbralización de la imagen se debe realizar ad-hoc, según la necesidades de la investigación y lo que se quiera detectar de la imagen.

Sin embargo, Nobuyuki Otsu [18] desarrolla un método que no necesita supervisión ni parámetros iniciales, es decir, se realiza la segmentación de la imagen de forma automática. La segmentación consiste en diferenciar las distintas zonas o niveles de color en una imagen y así poder detectar los objetos o regiones de interés.

La umbralización se realiza por el criterio de discriminación, intentando la máxima diferenciación entre los niveles de grises. Es de vital importancia seleccionar una umbralización correcta de los niveles de grises, para detectar los objetos de la imagen frente al fondo de la misma. En el caso más ideal, el histograma de la imagen estará formado por valles y picos bien diferenciados, que señalizaran los límites del objeto, pero en la realidad en los histogramas, los valles aparecen con gran cantidad de ruido y los picos no son de igual magnitud.

Se desarrolla un método [18], que utiliza la información de los píxeles contiguos para modificar el histograma y aumentar la diferenciación entre los niveles de grises. Además, en este tipo de métodos se usa la derivación entre los distintos niveles de grises para detectar máximos y mínimos, sin embargo, en este método se usa la integración del histograma para una visión más global.

Se debe destacar que la función de Matlab encargada de la segmentación de imágenes de forma automática, está basada en el método de Nobuyuki O. [18] y permite realizar la detección de la burbuja frente al fondo, mediante el establecimiento de un umbral automático. Se realiza una gran diferenciación en los niveles de grises, permitiendo la binarización de la imagen y que las funciones de detección de contorno den como resultado una forma totalmente ajustada a la burbuja.

En estudios más recientes [19], se desarrollan métodos de detección de burbujas para casos de aplicación, como por ejemplo la detección de burbujas en un flujo. Se destaca que este tipo de técnicas, como la que se desarrolla en este Trabajo, tienen gran importancia, porque se necesita una base de datos, que provea de información utilizable en modelos de análisis de flujos en doble fase, y por supuesto de condiciones iniciales y de contorno para la Fluidodinámica computacional (CFD).

La medición de burbujas tiene dos métodos, intrusivo y no intrusivo. El método intrusivo requiere contacto directo entre la burbuja y el sensor de medición, lo que provoca la perturbación de la misma. Por otro lado, el método no intrusivo, como el procesamiento de imágenes, no requiere el contacto directo y, además, posibilita una mayor resolución temporal. Gracias a la implementación de cámaras de alta velocidad, la técnica de procesamiento de imágenes se ha desarrollado enormemente.

Como en el caso que se investiga en [19], durante la realización del Trabajo, se tuvieron problemas derivados de la retroiluminación necesaria con las cámaras de alta velocidad, que provocan que el contorno de burbuja sea oscuro y el centro brillante. Esto da lugar a que, en ocasiones, sea difícil dirimir el contorno y se tenga que realizar una reconstrucción de los límites de la burbuja. Se puede adelantar que, esta técnica ha sido utilizada, en el procesamiento de imágenes realizado, en los bordes de la base de la burbuja.

Aunque la investigación realizada por Jiming W. et al. [20] está muy basada en los estudios de Yucheng F. et al. [19], se puede extraer información importante sobre la segmentación de burbujas deformadas, que no poseen forma esférica ni elipsoidal. De hecho, se desarrolla un método para la medida de la superficie de la interfase y volumen de burbujas altamente deformadas, mediante la división de la misma en partes y su posterior integración. A pesar de la bondad del método y su comprobación con datos sintéticos, se destaca que, para conseguir un método totalmente realista, se necesitaría el uso de dos cámaras de alta velocidad de forma perpendicular y así no tener que suponer simetría axial.

Toda la información recopilada ha sido de gran ayuda para el desarrollo de un método de procesamiento de las propias imágenes, ad-hoc, que permite obtener numerosos resultados de gran utilidad y minimizando el error en la detección.

3. Trabajo experimental

Para el estudio del proceso de formación de burbujas, se hace uso de la siguiente instalación experimental, realizada exclusivamente para esta investigación. Además, se explicará el proceso de obtención de imágenes, así como, los problemas que se han ido abordando y las soluciones adoptadas.

Teniendo en cuenta, que la investigación de formación de burbujas se ha realizado en algunos artículos ya mencionados [6,7,15,17], la instalación es muy similar a la realizada por estos autores y que se ha demostrado útil, para estudiar el problema en cuestión.

3.1. Instalación experimental

La instalación experimental está basada en una parte de suministro de aire comprimido, el sistema de inyección, la urna o depósito de agua y el sistema de grabación. A continuación, se pormenorizan estos aspectos, detallando cada una de las partes en que está compuesto y se introducirá una imagen real de la instalación.

Para no tener que ir imaginando toda la instalación, se propone un esquema ilustrativo, en la Figura 17.

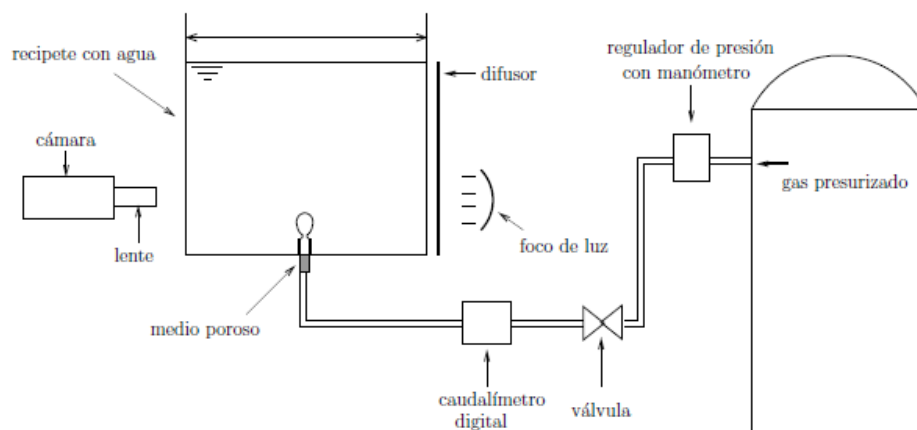


Figura 17. Esquema introductorio de la instalación. [15] Fig. 2.1

El sistema de aire comprimido comienza con la instalación general de aire comprimido de la Universidad de Jaén, en el edificio de la Escuela Politécnica Superior, a la que se puede realizar el conexionado a través de numerosas válvulas

de suministro, situadas en el laboratorio del grupo de investigación TEP235. Para llegar a las distintas estaciones que están desarrollando investigaciones, se usan tubos legris de poliuretano, de distinto diámetro, y diferentes tipos de conexiones (lineales para estrechamientos, tipo T o válvulas de cierre para controlar qué instalación recibe el suministro de aire comprimido).

Antes de cada mesa de trabajo, se sitúa un manómetro para controlar la presión necesaria en dicha estación, en nuestro caso, el manómetro nos permitía conocer si la instalación tenía suministro de aire. Esto nos servía para evitar verter agua en la inyección y que, al no tener suministro, el agua entrase en el sistema. No era utilizado para medir la presión, ya que nuestro experimento se centra en condiciones de flujo constante y no de presión constante.

Por tanto, para conseguir, en este punto visualizar, el caudal de suministro de aire comprimido, se instaló un caudalímetro de la marca Aalborg, modelo GFM17, para aire y con un rango de medición de entre 0 y 100 ml/min. El caudalímetro se encuentra calibrado y con una buena sensibilidad, ya que nos indicaba las variaciones de caudal producidas por la sobrepresión en la burbuja, lo que sirvió para detectar uno de los fallos en la instalación y que se comentará después.

Antes del caudalímetro, se sitúa la válvula de bola, de regulación de caudal. Dicha válvula tiene un amplio rango de ajuste, aunque debido al uso de capilares, la regulación es una tarea complicada, pequeñas rotaciones en la válvula provocan grandes cambios en el caudal, pero de forma muy tardía. Por ello, primero se realizaban pequeños ajustes en la válvula y, a continuación, se debía esperar hasta que el efecto se manifestase.

Una vez se traspasa el caudalímetro, el último elemento de la instalación de aire comprimido es el tubo capilar. Cabe destacar, que es el elemento más importante de la instalación porque posibilita las condiciones cuasi-estacionarias y de flujo constante. Debido a su gran importancia, es muy usado en la investigación y, por tanto, difícil de obtener. Teniendo en cuenta esta dificultad, es comprensible que inicialmente solo se tuviera, en el laboratorio, un tubo capilar canónico, aunque posteriormente se consiguió un segundo capilar y la experimentación mejoró considerablemente. En el inicio al no tener acceso a un tubo capilar, se tuvo que realizar una solución que

permitiese iniciar la experimentación. Basándonos en el estudio de Corchero et al. [6], para conseguir un flujo constante se necesitaba un capilar o tubo de muy pequeño diámetro ($< 1 \text{ mm}$) y una gran longitud, aunque si es un capilar específicamente diseñado para esta función, también se tiene en cuenta la baja elasticidad de las paredes, para que no se produzcan cámaras de aire (por ello se fabrican de acero inoxidable). Es gracias a esto, por lo que Corchero et al. necesitan una longitud muy inferior a la calculada. Por tanto, si solo se tenían tubos de alimentación de una línea normal, pero de muy pequeño diámetro, se necesitaba una gran longitud. En las imágenes que se expondrán a continuación, se puede ver esta solución provisional. Aunque la solución proporcionó muy buenos resultados, la integración del capilar supuso un paso adelante en el establecimiento de condiciones estáticas.

Al mismo tiempo que mejoraba la instalación, debido a su propiedad para crear una gran pérdida de carga en una menor longitud, provocó la aparición de fugas en su conexionado con el caudalímetro. Esta fuga pudo ser detectada gracias al caudalímetro, ya que por más que se abría la válvula reguladora, el caudal no aumentaba, aun teniendo una red de suministro suficiente. Todo este problema puede servir para asegurar que el tubo capilar cumple plenamente su función. La fuga fue rápidamente solucionada sustituyendo una pieza de unión.

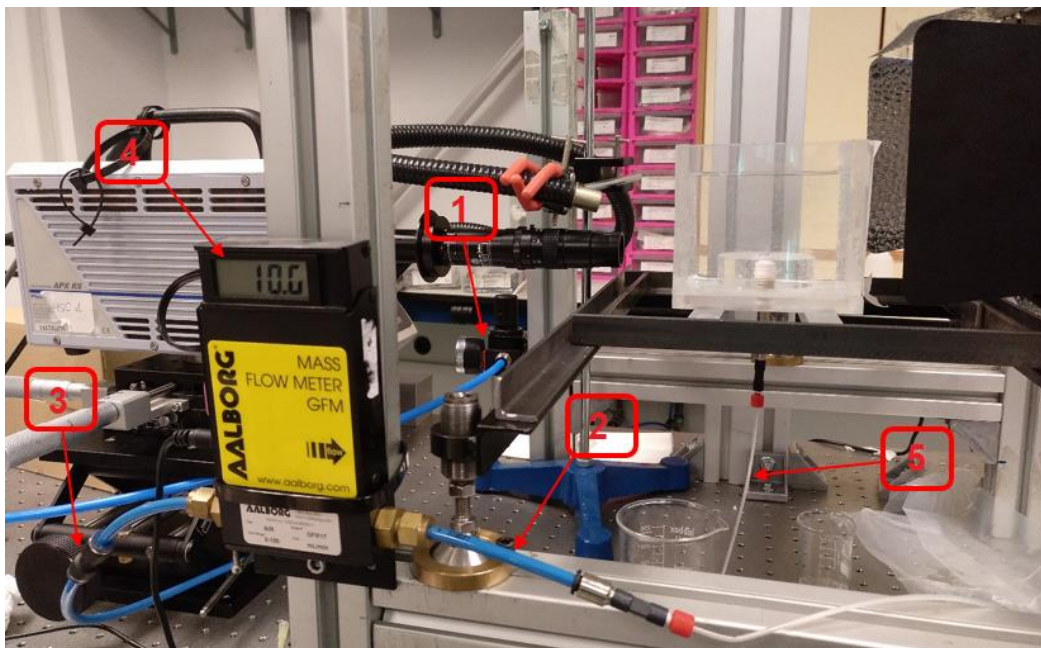


Figura 18. Instalación experimental, parte aire comprimido.

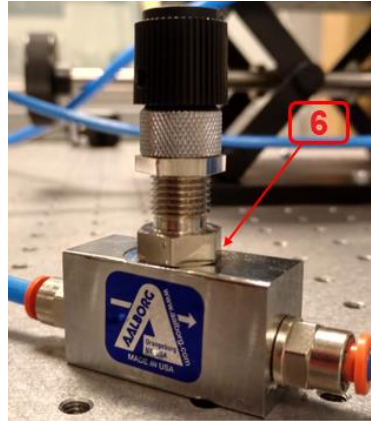


Figura 19. Instalación experimental, parte aire comprimido, válvula

En las Figuras 18 y 19, se puede ver la instalación de aire comprimido descrita en los párrafos anteriores y con los siguientes elementos:

1. Manómetro.
2. Tubo legris de poliuretano.
3. Conexión (cambio de diámetro).
4. Caudalímetro.
5. Tubo capilar provisional.
6. Válvula reguladora de caudal

Para crear la burbuja, se utilizan una serie de discos de metacrilato como inyector. En este caso, lo importante no es el diámetro del orificio, que es de aproximadamente 1 mm, sino la superficie hidrofóbica que se ha creado con el producto Neverwet. El proceso para generar la superficie es algo tedioso, por lo que su realización se debe planificar con mucha antelación a la realización de los ensayos, al menos con un día de antelación, en el mejor caso.

Además, antes de realizar la superficie, se debe construir la máscara. Se trata de una hoja de papel con un círculo perforado, del diámetro que se requiere. Dicha hoja, también es de forma circular y del diámetro del disco de metacrilato, se puede observar en la Figura 20. Previamente, para obtener el agujero circular, se realiza un diseño en AutoCAD con distintas circunferencias de las superficies a ensayar, a continuación, con un sacabocados del diámetro correcto, se realiza el agujero.

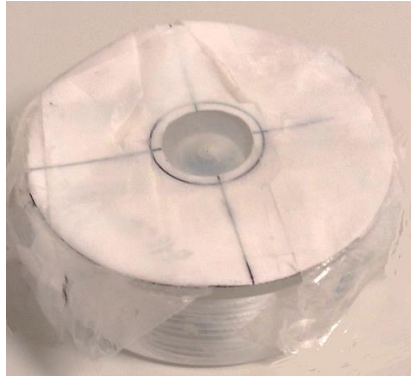


Figura 20. Disco de metacrilato con la máscara.

La realización de la superficie de Neverwet consta de varias etapas consecutivas. En primer lugar, se debe agitar, durante más de 1 min, el bote de spray número uno (contiene el producto), a continuación, se realiza un espolvoreado sobre la superficie cubierta con la máscara, a unos 20 cm de distancia, realizando dos pasadas en forma de cruz. Se deja secar durante 30 min, y se realizan los dos primeros pasos de nuevo. Una vez más se deja secar 30 min, se coge el segundo bote y se agita, también, durante 1 min. Cuando esté agitado, se rocía sobre la superficie, este segundo bote es un protector o laca. Se debe dejar secar durante al menos 8 min y, después, se realiza una segunda capa. Para que el producto tenga el cien por cien de su efectividad, se debe dejar reposar durante un día.

Al día siguiente, se debe retirar la máscara delicadamente, ya que el producto puede quedar adherido al papel. En este momento, se comprobará si el producto ha sido bien utilizado o se ha cometido algún tipo de error, en cuyo caso la superficie no será totalmente circular, debiendo repetir de nuevo todo el procedimiento. Se puede usar un nuevo disco o limpiar el anterior con acetona. A modo de prueba, para comprobar que el producto cumpla su función, se pueden verter algunas gotas de agua sobre la superficie con una pipeta, deberían ser repelidas. La forma final correcta se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Disco orificio con superficie de Neverwet realizada.

En último lugar, en cuanto al desarrollo de la urna y discos, quedaría acabado con la urna o depósito, donde se encuentra el orificio sumergido. Se trata de una urna de metacrilato totalmente transparente, para que no existan interferencias con las imágenes grabadas. Además, la urna debe tener aproximadamente diez veces el tamaño de la burbuja que se formará. Esta aproximación para el tamaño, se realiza con la finalidad de que el agua en su interior tenga condiciones de reposo y no influya en el crecimiento de la burbuja.

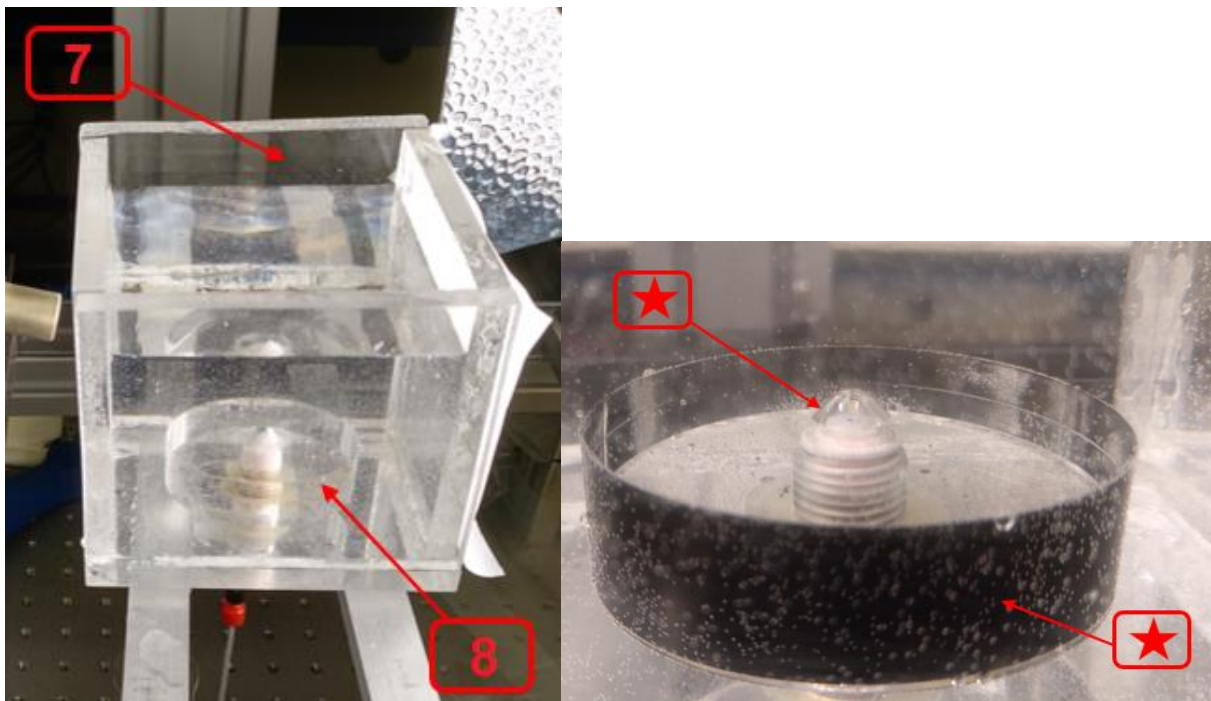


Figura 22. Urna y disco orificio (izquierda), detalle disco metacrilato (derecha)

En la Figura 22, se puede ver la instalación de agua y la generación de burbujas:

7. Urna de metacrilato 20 x 20 cm.
8. Disco orificio de metacrilato con superficie hidrofóbica de Neverwet.

Antes de pasar a desarrollar los dispositivos necesarios para la grabación, se destacarán algunos detalles no mencionados con anterioridad. En primer lugar, como se puede ver en la Figura 22, derecha, se instala cinta aislante negra alrededor del disco de metacrilato. Esta cinta se coloca porque, debido a que los discos son transparentes, durante la grabación y posterior procesamiento de las imágenes era muy difícil distinguir el límite inferior o base de la burbuja, gracias a este elemento esa zona era más oscura y fácil de distinguir. En segundo lugar, se puede destacar, también en la Figura 22, derecha, como se forma una burbuja en una superficie hidrofóbica. Se visualiza como la misma no está anclada al orificio (que puede verse a través de la burbuja debido a su transparencia), sino en los límites de la superficie hidrofóbica.

A continuación, se desarrollarán los elementos necesarios para la grabación de la investigación realizada.

Debido a que el proceso de formación de burbujas es muy rápido, aunque se tenga un caudal muy bajo, sobre todo en la parte final o desprendimiento, que sucede en cuestión de milisegundos; es necesaria la grabación del proceso con una cámara de alta velocidad. En el laboratorio, se hizo uso de una cámara de alta velocidad de la marca Photron y modelo APX-RS. Esta cámara es capaz de grabar a más de 3000 fps (imágenes por segundo/frame per second) a máxima resolución, es decir, 1024 x 1024 píxeles. La velocidad máxima de grabación es de 250000 fps, aunque a menos resolución. Se debe tener en cuenta, que cuanto mayor sea la velocidad de grabación, la luminosidad debe aumentar. Para conseguir la iluminación adecuada, se utilizan una pantalla led de la marca Yongnuo Digital con 36 W. Esta lámpara tiene potencia ajustable, mediante un mando a distancia o con una rueda en la parte trasera, indicando el nivel en el que se encuentra desde 1 a 99.

Como la lámpara está formada por numerosos led, cuando se realiza la grabación con un gran zoom (como es nuestro caso), estos leds distorsionan la imagen, viéndose como numerosos puntitos. Para evitar esta interferencia en la

imagen, se coloca en la cara trasera de la urna (el fondo de la imagen), una hoja de papel vegetal, que nos servirá como filtro para la iluminación.

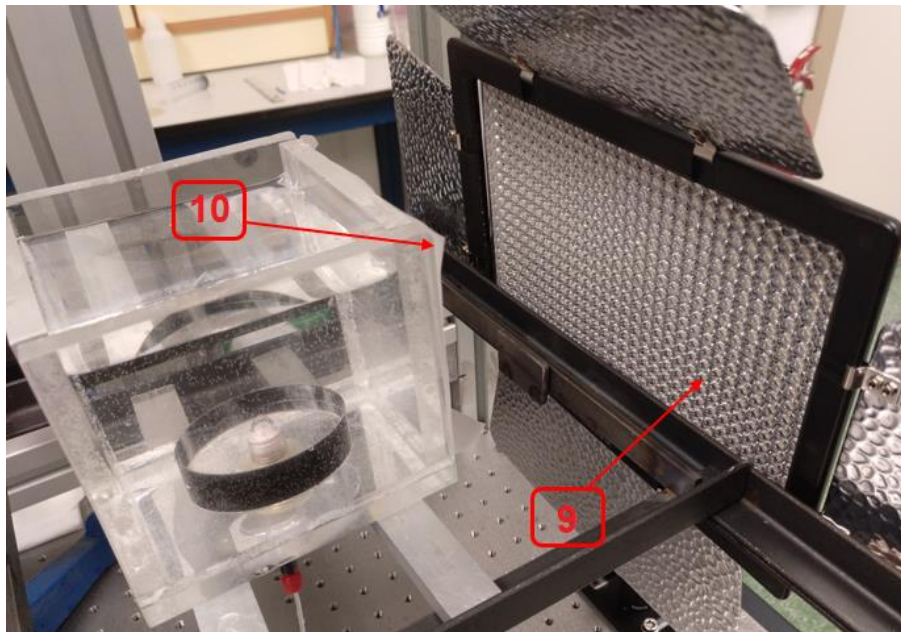


Figura 23. Iluminación

En la Figura 23, se observan los elementos necesarios para una buena iluminación:

- 9. Pantalla led con concentradores de luz.
- 10. Filtro para la iluminación de papel vegetal.

La visualización de las grabaciones de la cámara, se realiza a través de un ordenador de sobremesa en el que está instalado el programa de control de la cámara, el cual aparte de permitir realizar la grabación, posibilita ajustar numerosos parámetros, como luminosidad y velocidad de grabación, que se explicarán en el proceso de medida.

Para realizar una correcta grabación, aparte de necesitar un buen dispositivo, se necesitan unas lentes que se ajusten a nuestras necesidades. Concretamente, en este experimento se necesitan dos tipos de lentes, una de ellas, una lente Sigma de 105 mm usada normalmente en cámaras réflex. Por otro lado, se detecta un problema en las imágenes, en el momento de realizar el procesamiento de las mismas. Consistente en que con el zoom que permitía el objetivo de 105 mm y debido a la rugosidad que

provoca la superficie de Neverwet, resultaba imposible detectar el contorno de la burbuja en su base o bordes inferiores y, por ello, el ángulo de contacto. Por tanto, se decide usar una segunda lente microscópica de larga distancia focal, es decir, se trata de una óptica que permite altos niveles de zoom, de órdenes micrométricos, pero sin necesidad de estar cerca del objeto en cuestión, ya que la urna tiene cierto tamaño.

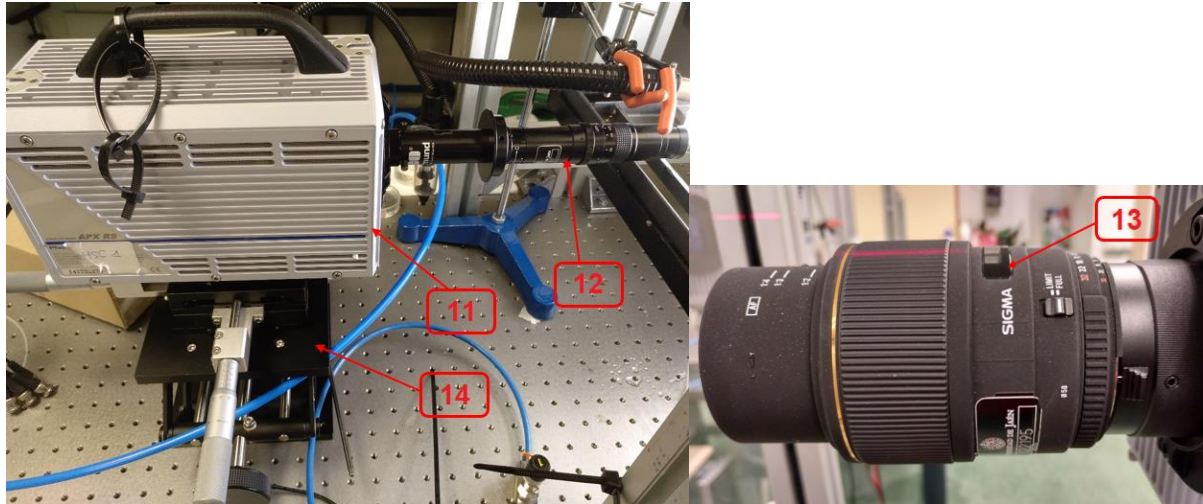


Figura 24. Sistema de grabación (izquierda y derecha) y sistema de control.

En la Figura 24, se puede ver el sistema de grabación usado y un conjunto de posicionadores micrométricos, que nos servían tanto para colocar la cámara y poder ver la burbuja, como para poder enfocar.

- 11. Cámara de alta velocidad.
- 12. Lente microscópica de larga distancia focal.
- 13. Lente 105 mm.
- 14. Posicionadores micrométricos.

Para resumir los experimentos realizados que han resultado válidos se incluyen la Tabla 1.

Superficie	Burbuja completa	Detalle borde
8 mm	4 casos	4 casos
10 mm	4 casos	4 casos
16 mm	4 casos	7 casos
20 mm	4 casos	6 casos

Tabla 1. Resumen experimentación realizada.

Realizado el desarrollo y enumeración de cada uno de los elementos de la instalación, se pasa a explicar el procedimiento seguido durante la experimentación.

3.2. Procedimiento de medida

Se explicarán los pasos seguidos en la consecución de la experimentación.

En primer lugar, se abre la válvula de aire comprimido, comprobando que en el manómetro hay presión. A continuación, se rellena el disco orificio con esponjas, para que no existan cámaras de aire, que provoquen retenciones y rápidas descargas de aire. Una vez preparado el orificio, se enrosca en la urna. Habiendo revisado, anteriormente, que existe presión de aire, se comienza a rellenar la urna con agua, al mismo tiempo se comprobará que la superficie hidrofóbica está teniendo efecto. Si no está teniendo el efecto esperado o no tiene la forma circular correcta, se vaciará la urna y se realizará de nuevo el proceso de generación de la superficie hidrofóbica.

Verificada la hidrofobia de la superficie, se enciende el caudalímetro y mediante la válvula de regulación de bola, se ajusta el flujo al rango requerido, en concreto, se demuestra que se recogen mejores resultados para bajos caudales, entre 1 y 5 ml/min.

Como ya se explicó en el elemento en cuestión, la regulación se debe hacer lentamente, porque los efectos tardan en manifestarse en el caudalímetro.

A continuación, se enciende la lámpara led y la cámara, abriendo el correspondiente programa, se comenzará la visualización de las imágenes en tiempo real. En este momento se debe ajustar el zoom y el enfoque mediante la lente. Con el programa se ajustará la velocidad de grabación, el nivel de shutter (cantidad de luminosidad captada por la cámara), el cual también se puede ajustar con el diafragma de la lente, y la resolución (siempre se usó 1024 x 1024 píxeles). Se debe tener en cuenta que, cada vez que se realicen cambios en la velocidad de grabación, se debe reajustar el resto de parámetros porque se restablecen a los automáticos.

En el caso de este proyecto, se realizaron grabaciones entre 250 y 1000 imágenes por segundo. La velocidad se debe escoger teniendo en cuenta que, en relación al caudal usado, el proceso de generación sea grabado al completo. Este es

un problema que hay que controlar, porque la memoria de la cámara es limitada y no se pueden grabar vídeos el tiempo que se desee.

Una vez escogida la velocidad, se debe realizar un vídeo de prueba y comprobar que la burbuja se graba completamente o, al menos, la parte que es posible analizar. Esto último se realiza en los videos de detalle, para poder grabar a mayor velocidad y tener mayor resolución en la zona que comienza el retroceso de la línea de contacto, como se ha dicho no se puede grabar un número ilimitado de imágenes. Realmente, realizando este método la única información perdida es el tiempo de llenado, que sí es recogido en los vídeos de grabación de la burbuja completa, ya que las imágenes no grabadas, de los momentos iniciales de llenado, no pueden ser analizadas por los códigos.

En último lugar, se deben guardar los vídeos teniendo en cuenta que, al contener un gran número de imágenes a una alta resolución, van a ser muy pesados. Por ello, para aumentar la eficiencia del proceso, se debe organizar para realizar otras tareas simultáneamente.

Algo que se debe tener en cuenta, es que en Matlab el tratamiento de las imágenes es mediante píxeles, por lo que se debe establecer alguna relación con la realidad, a través de una escala. Esta escala tiene que relacionar píxeles con milímetros para que las mediciones realizadas sobre la imagen, tengan una correspondencia en unidades cuantificables. La relación se consigue realizando la grabación de una regla, al menos una imagen, en las mismas condiciones en que se ha grabado el vídeo de la burbuja, es decir, se debe tener el mismo zoom, enfoque y la cámara nunca se puede desplazar longitudinalmente en la dirección de la urna durante el proceso. Es posible mover la cámara verticalmente, en este caso ha sido necesario, porque debido al zoom tan grande es inevitable subir la cámara para poder visualizar la graduación de la misma.

Se usaron dos reglas, como es de esperar, debido a los dos tipos de vídeos grabados con lentes diferentes. En los vídeos en los que se visualiza la burbuja completa, se utiliza una regla convencional situada en un soporte, se debe tener en cuenta que, al colocar el soporte para que la regla se encuentre en el mismo plano de enfoque que la burbuja, no se dañe la superficie de Neverwet. Al estar sumergida es

menos duradera y resistente. Sin embargo, en los vídeos de grabación del detalle del borde de la burbuja se usa una regla micrométrica, para tener una mayor resolución. Esta regla, aparte de para establecer la escala, también es muy útil para enfocar la lente microscópica, trabajo que es de gran dificultad por la precisión o zoom tan grande que se realiza.



Figura 25. Regla micrométrica.

Al ser una regla micrométrica, en la Figura 25 no se puede distinguir la graduación, pero sí se observa como la regla va de 0 a 10 mm, es decir, mide hasta 1 cm y 50 μm como mínimo.

Es muy importante que, al realizar la escala mediante Matlab, señalizando una distancia entre dos puntos en píxeles, y dándole su valor en milímetros según marque la regla, se escojan dos puntos en la misma, lo más separados posible. Ya que, cuanto mayor sea la distancia, menor es el error relativo cometido. Este fue un fallo cometido durante el procesado de las imágenes, que posteriormente se tuvo que subsanar.

4. Procesado de imágenes

El apartado de procesado de imágenes se va a desarrollar según el trabajo realizado. Introduciendo la investigación llevada a cabo sobre la detección de contornos en imágenes mediante Matlab, las diferentes pruebas realizadas, los problemas que han ido surgiendo y que han derivado en la diferenciación de dos grandes tipos de códigos con sus respectivos subcódigos. Por último, la esquematización del trabajo que realizan los códigos, mediante diagramas de bloques.

En primer lugar, para poder procesar los vídeos se deben convertir en imágenes, ya que se va a usar el lenguaje de programación Matlab y éste solo lee imágenes, para obtener o representar información sobre las mismas. Para tal efecto, se diseñó un programa que convertía vídeos en imágenes, buscando cada frame o imagen en el vídeo y guardándolas como imágenes en formato *.tif* con una numeración, que nos servirá para acceder a ellas desde el resto de códigos. Para generar el código se tuvieron que buscar, las funciones de Matlab que leían vídeos y las que leían imágenes internas del vídeo; así como las funciones que guardan las imágenes con un nombre y formato determinado.

Como el código de guardado de imágenes, todos los códigos han tenido que ser realizados desde cero y, específicamente desarrollados para resolver, adecuadamente, el problema en cuestión, es decir, son códigos ad-hoc.

El principal y primer objetivo del análisis de imágenes, es la detección del contorno de la burbuja, para poder realizar cálculos. En cuanto a este objetivo, existen numerosas funciones de detección de contornos y posterior ajuste del mismo. En realidad, todas estas numerosas funciones son útiles cuando las formas de los objetos son de geometría regular y el contraste de dichos objetos con el fondo es muy grande (colores fuertes). Sin embargo, las imágenes recopiladas están formadas por tonos de grises, que en determinadas partes y momentos de la formación de la burbujas están muy diferenciados, pero en otras zonas son muy parecidos. Esto provoca que, simplemente aplicando una función de detección de contorno, no se tenga ningún efecto.

Por tanto, lo primero a realizar serán modificaciones en la imagen para poder usar dichas funciones. Se hace uso de una función de Matlab, llamada *Image Segmenter*, que permite, como su nombre indica, segmentar la imagen en dos zonas de niveles de grises, mediante un umbral automático que sigue el método de Otsu [18], diferencia la zona oscura (burbuja) y la zona más clara (fondo). Esta modificación en la burbuja, permite distinguir las dos zonas, que se pueda aplicar un convertidor a blanco y negro y, por tanto, usar un detector de formas. Este tipo de funciones detecta las formas y geometrías de la imagen, y sus características, como áreas, densidad de color, etcétera. Normalmente, se pueden detectar más de un área, debido a brillos en el interior de la burbuja o suciedad en los alrededores de la interfase, por ello se hace un cribado de selección de mayor área. Una vez se ha detectado el mayor área, que será la burbuja, se realiza el contorno de esta forma. Como todo este proceso se realiza internamente en el programa, la única forma que existe de comprobar que el trabajo ha sido correcto, es representar el contorno detectado (a partir de la forma obtenida de la imagen modificada) y representarlo encima de la imagen original.

En este punto, se pudieron reconocer los dos problemas que tenían las imágenes que permiten ver la burbuja completa. El primer problema, reside en que no se pueden analizar las primeras imágenes del llenado, con la función de segmentación en modo automático, aunque sí es posible, si se usa de forma manual. El problema está en que cada imagen tiene un valor distinto en este modo manual y no existe ningún patrón. Por lo que, tras muchos días de probar distintos valores e intentar analizar estas imágenes, se decide que se van a descartar todas las imágenes iniciales en todos los vídeos y se comenzará a analizar, desde que es posible usar el modo automático de umbralización. Sin embargo, se recoge el tiempo de llenado de la burbuja, desde el desprendimiento de la anterior, por lo que estas imágenes no se descartan del todo del análisis. Aunque es cierto, que su volumen y el resto de parámetros calculados no son recogidos. A continuación, un ejemplo de este problema.

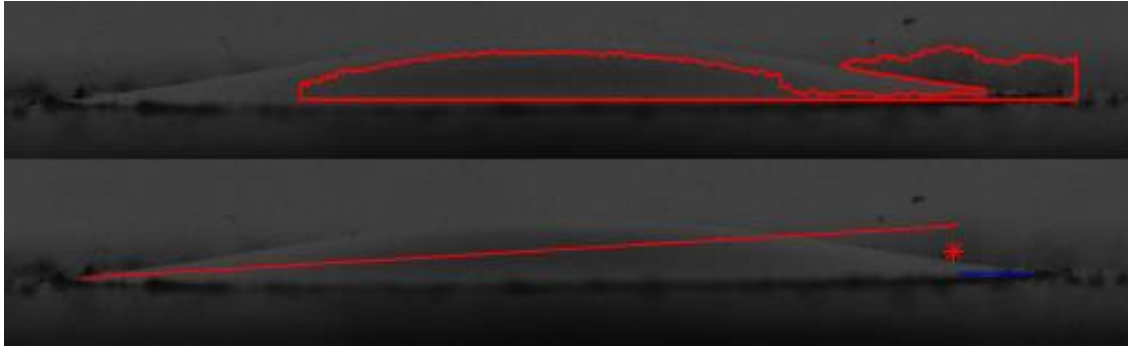


Figura 26. Contorno detectado de las primeras imágenes.

La Figura 26, es una de las imágenes iniciales del vídeo de una superficie hidrofóbica de diámetro, 16 mm. Se observa, como al estar tan plana la burbuja, detecta otros contornos en la imagen. Tal cual está diseñado el código, al estar el contorno de la burbuja por debajo del otro contorno, no es capaz de depurarlo y aparece una línea recta en la imagen del contorno modificado. El contorno se modifica en relación al siguiente problema, que se da en todas las imágenes.

El segundo problema, se centra en el contorno de la burbuja detectado, sobre todo, en la zona del borde en la base, en el límite de la triple interfase. En esta zona, las funciones de Matlab no pueden detectar el contorno de la burbuja, debido a que no está totalmente llena de aire por estar justo en el límite de la superficie hidrofóbica y porque hay demasiadas rugosidades o suciedad, debida a la superficie hidrofóbica, que con un gran zoom es muy irregular. La solución adoptada consiste en marcar manualmente el punto límite de la interfase y estudiar su movimiento a lo largo del tiempo, es decir, se obliga al contorno a pasar por ese punto, haciendo que el mismo se adapte mucho mejor a la forma de la burbuja. Además, como ya se sabe, la línea de contacto tiene una cierta dinámica que a simple vista es en la última parte de la formación de la burbuja, por lo que este movimiento también se debe establecer manualmente.

A continuación, en la Figura 27 se muestran algunos instantes en la formación de la burbuja. Se recogen las imágenes del contorno en el primer fotograma analizado, una etapa intermedia y en el final de la formación. Estas imágenes nos servirán para poder establecer las diferencias en la necesidad de resolución del problema expuesto.

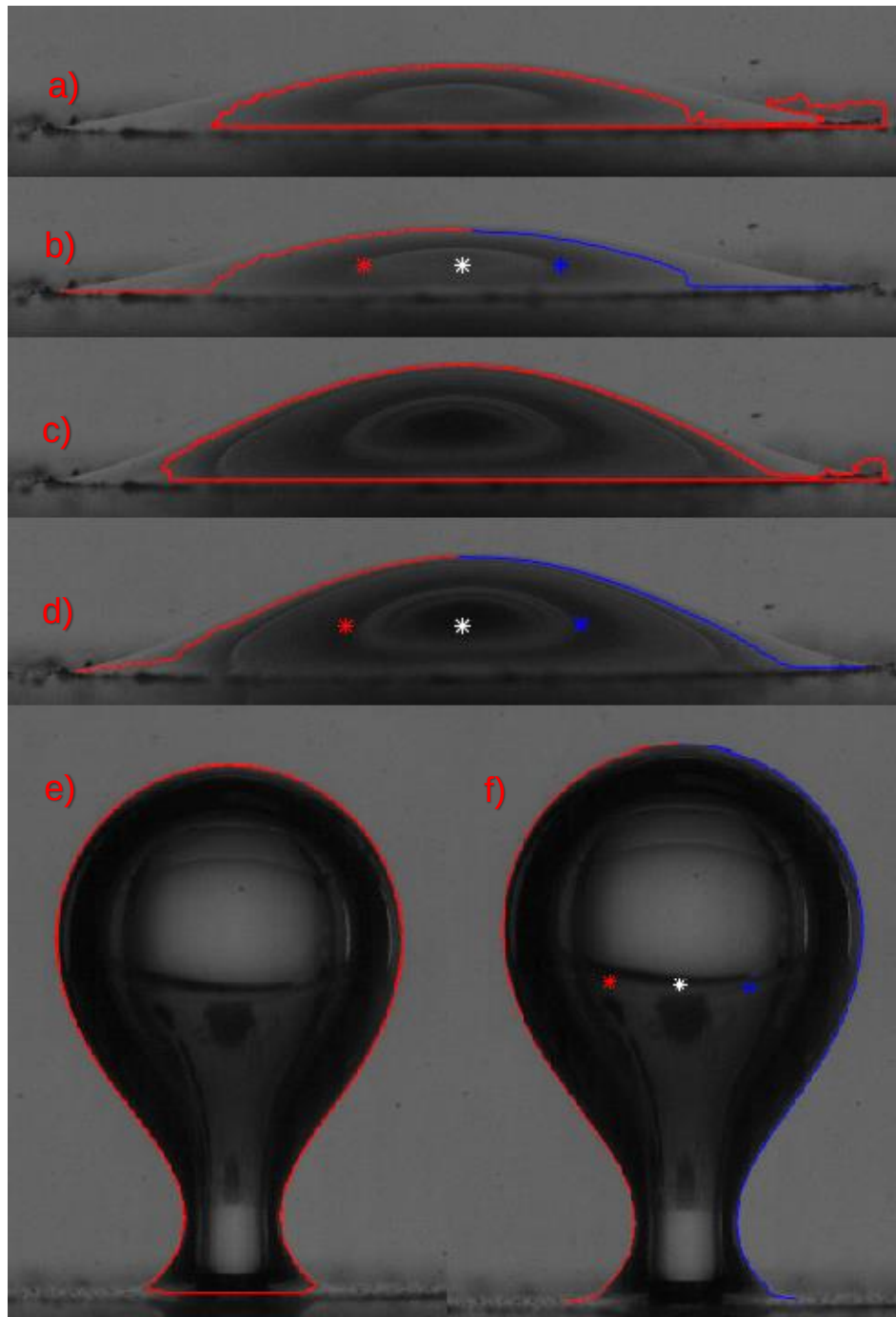


Figura 27. Contornos sin depurar (a,c,e) y contornos modificados (b,d,f).

Como puede observarse en esta Figura 27, en el inicio de la burbuja o al menos de las imágenes analizadas, el contorno detectado (contorno completo rojo) es muy irregular, detectando zonas donde no existe burbuja, aunque sí las rugosidades, magnificadas por la iluminación. Por ello es necesario una modificación o depuración del contorno, que permita detectar el final de la triple interfase y así aproximarnos lo máximo a la burbuja real, como ya se ha dicho, con esta premisa surge el contorno

modificado (contorno rojo y azul). Este contorno, se puede observar, que se adapta mucho mejor a la burbuja. Sobre todo, no se detectan partes no incluidas en la burbuja y, por tanto, no se contabilizan en los cálculos, aunque existen partes de la burbuja sin contabilizar, el error cometido es mínimo. También se puede ver claramente, que conforme la burbuja tiene un mayor tamaño y está mejor definida, en cuanto a nivel de gris, su detección es más exacta, siendo aceptable el contorno sin tratar, pero el modificado siempre realiza una mejoría.

Debido al segundo de los problemas detectados, que se ha explicado en los párrafos anteriores, se puede encontrar otro de los problemas, pero esta vez relacionado con el tipo de imágenes, aunque también derivado de la detección del contorno, como los anteriores. Se ha dicho que el borde del contorno se selecciona manualmente, aun así, no se ajusta totalmente a la inclinación de la burbuja en esa zona, por lo que no es posible, de ninguna forma, obtener datos del ángulo de contacto. Por otro lado, otro dato muy importante y que afecta a la formación de la burbuja, es la dinámica de la línea de contacto. Con este programa inicial, se ha podido medir tanto el diámetro de la base, como su movimiento a lo largo del tiempo, pero se debe tener en cuenta que esta posición es ajustada manualmente, por lo que no es un dato real, aunque se haya hecho con total precisión y concienzudamente.

Todo lo anterior conlleva, a que se ha tenido que desarrollar otro programa de detección de contorno y por ello, se han tenido que grabar los vídeos de detalle de la zona del borde de la interfase. Como estos vídeos solo captan una pequeña zona de la burbuja, pero muy ampliada, las funciones anteriormente usadas de detección de contornos de Matlab no son eficaces, debido a la oscuridad de las imágenes y a que la interfase sigue sin distinguirse plenamente, respecto del fondo. Por tanto, esta vez la detección del límite de la burbuja se ha tenido que diseñar manualmente. Después de probar numerosas funciones y comprobar la estructura matricial de las imágenes, se localizó que, en todas las imágenes, el borde de la burbuja estaba definido por una línea más clara, es decir, más blanca, por lo que su índice de color es mayor (las imágenes están indexadas). Por ello, el programa de detección se diseñó para encontrar este píxel de máximo índice y guardar su posición. Juntando todas las posiciones en un vector, se tienen los puntos que forman el contorno de la burbuja en el borde de la interfase con el sólido.

Lógicamente, estos puntos no van a estar colocados perfectamente alineados en el borde de la burbuja, pero se aproximan muy bien al mismo, por lo que se da por bueno el método de detección.



Figura 28. Imagen de detalle con contorno del borde detectado.

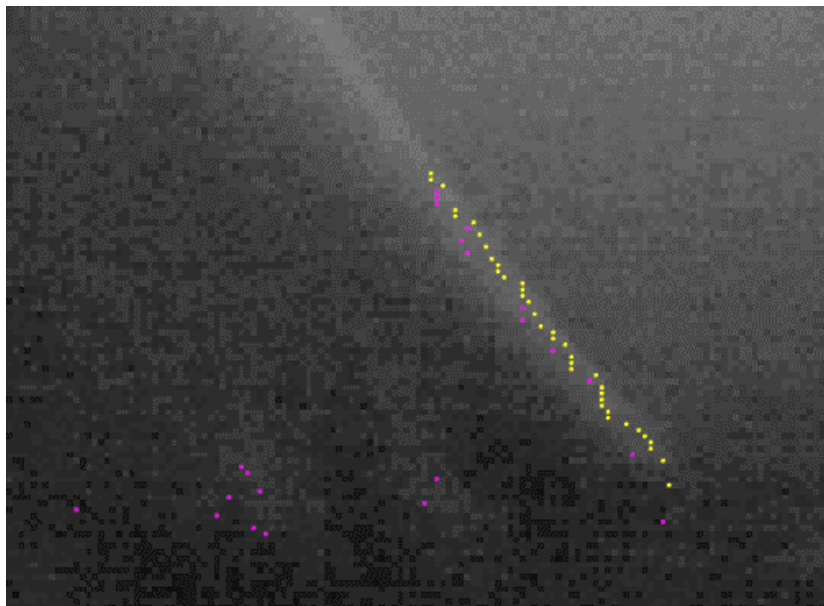


Figura 29. Ampliación del ajuste del contorno a la entrefase.

En las Figuras 28 y 29 se observa claramente, como existe una línea blanca en el contorno, justo en la zona del borde. La mayoría de puntos se encuentran sobre la misma, estando prácticamente alineados, aunque también hay algunos que se sitúan

señalando otras zonas claras de la burbuja, que no nos interesan, pero dichos puntos se eliminan en el código. Durante el proceso de formación de la burbuja, el ajuste de los puntos al borde de la misma va cambiando, por lo que se debe ampliar o reducir el tamaño de imagen analizado, de forma manual, estudiando el vídeo completo. Como se puede ver en las imágenes, no se intenta detectar todo el borde, sino la zona final de contacto con el sólido.

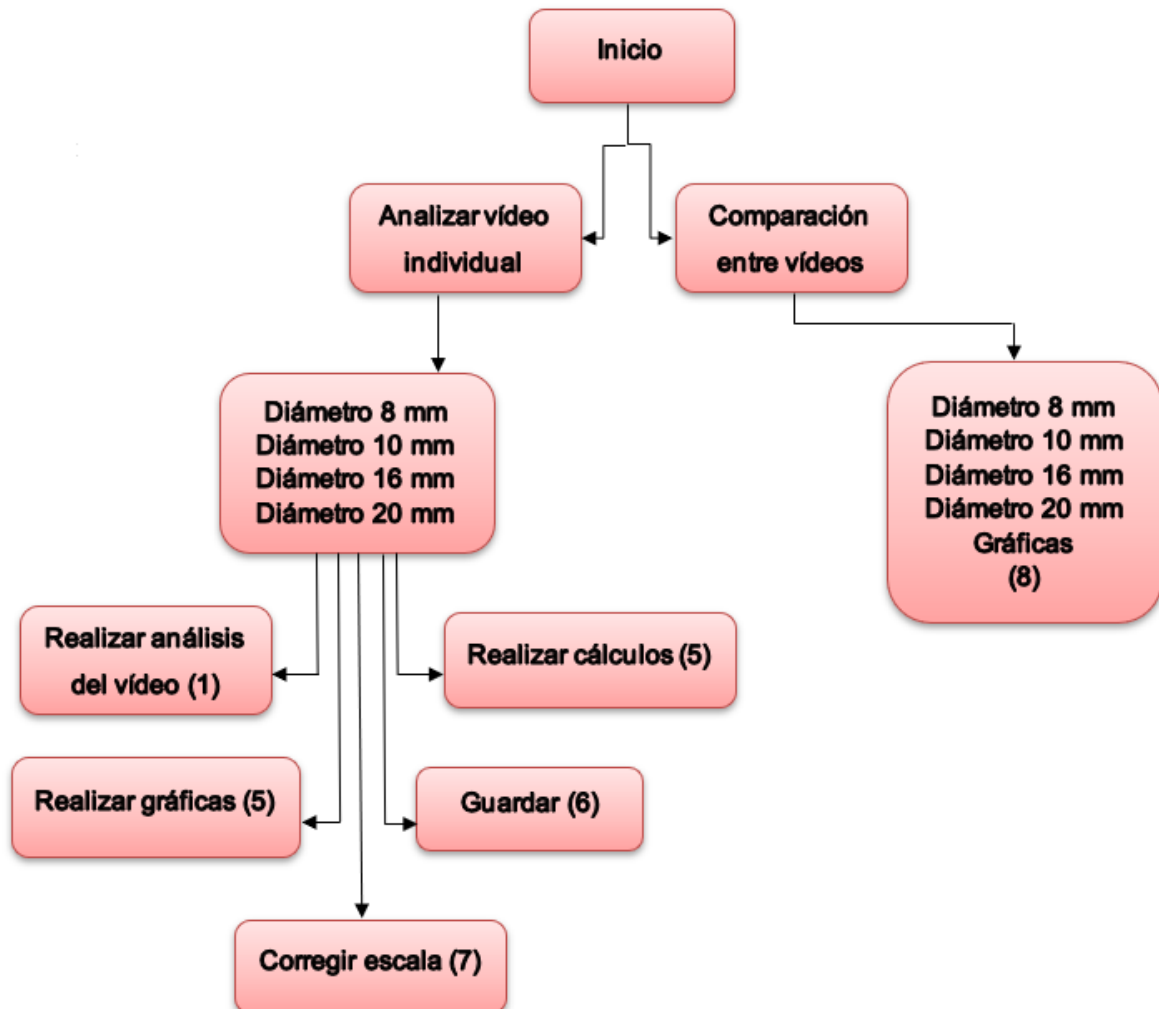
Lo realmente importante, es que estos puntos nos sirven para obtener una línea, que represente la línea de contacto en su parte más baja y, por tanto, poder medir la histéresis del ángulo de contacto y la dinámica de la línea de contacto. Para conseguir una línea que pase por los puntos, se realizan numerosos tipos de interpolaciones y aproximaciones, realizando un estudio de sensibilidad para escoger el número de puntos que ofrecen mejores resultados. Este apartado del proceso se explicará mejor en la etapa de resultados previos, ya que podrán observarse al mismo tiempo las gráficas solución a cada tipo de interpolación.

Sabiendo un poco más del objetivo principal y motivación de cada una de las dos ramas de códigos realizados, se van a presentar una serie de diagramas de bloques, donde se expondrá el trabajo realizado en cada código y subcódigos.

4.1. Códigos detección burbuja completa

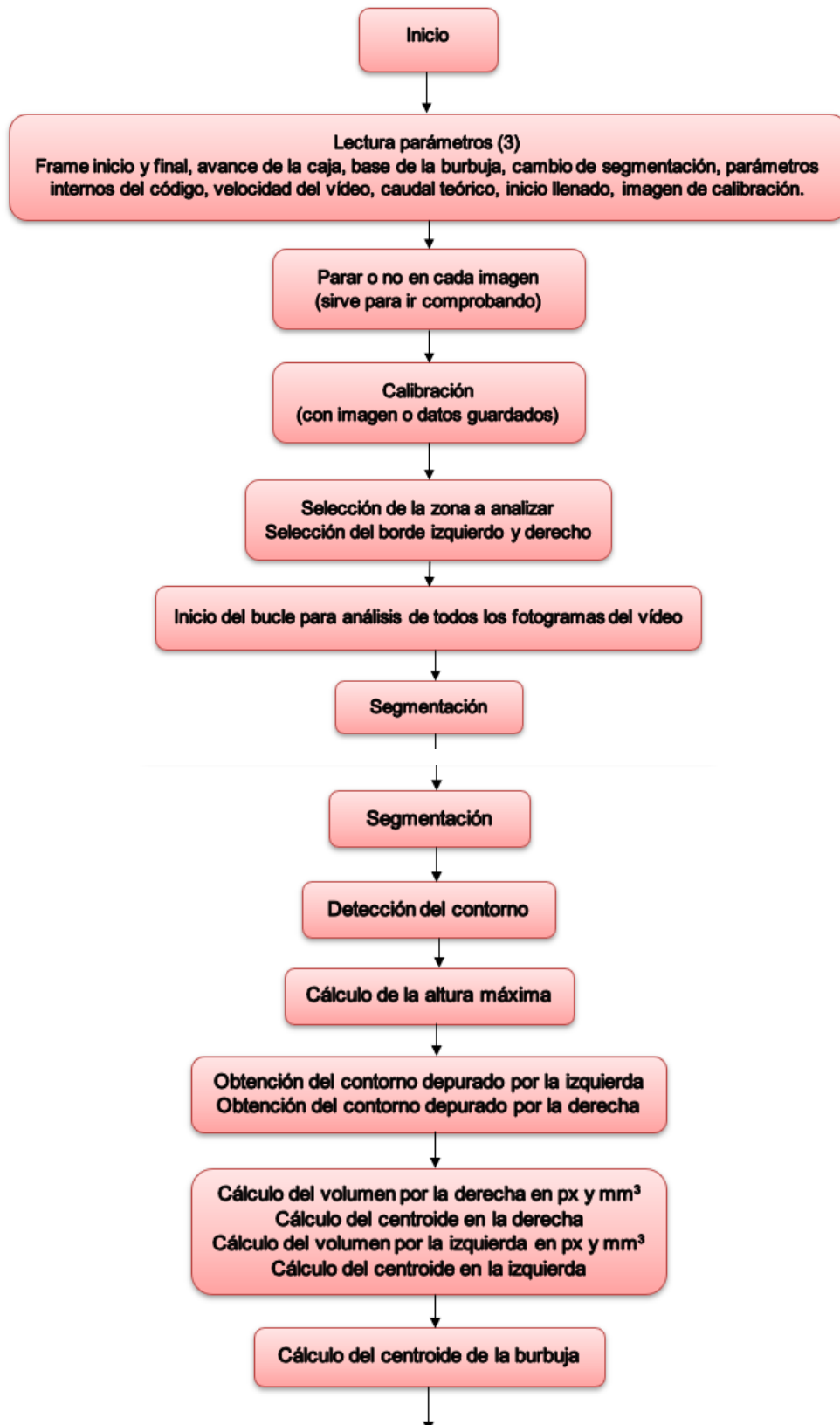
4.1.1. Completa general

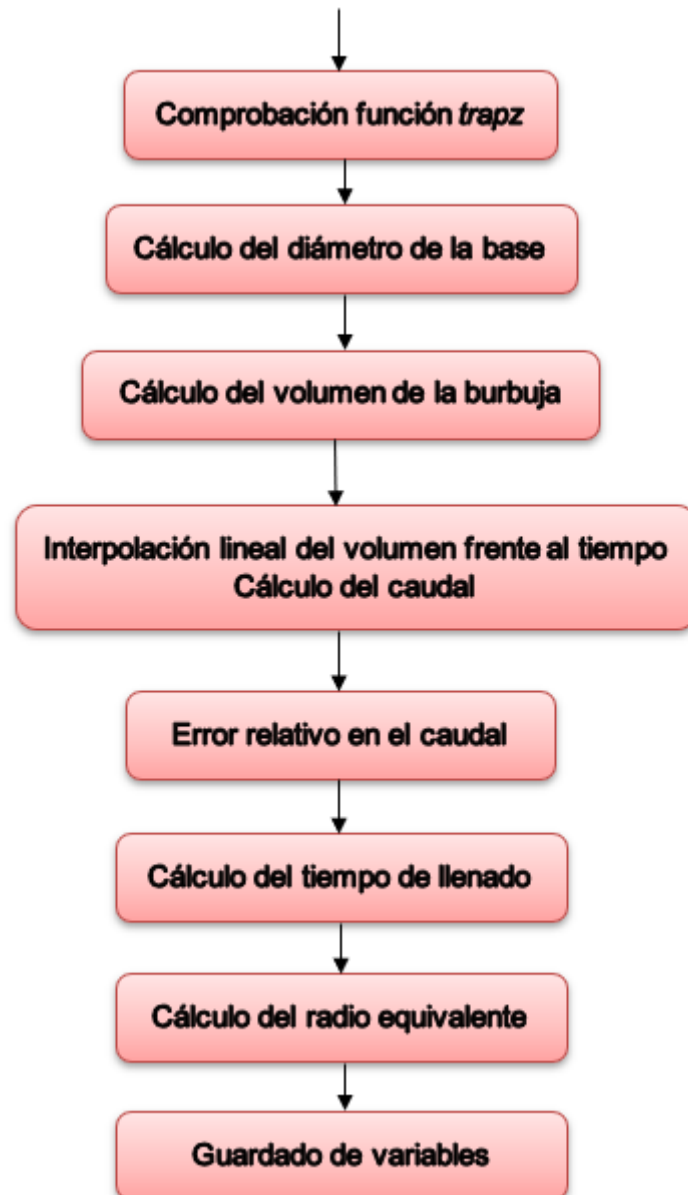
La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



4.1.2. Completa detección burbuja

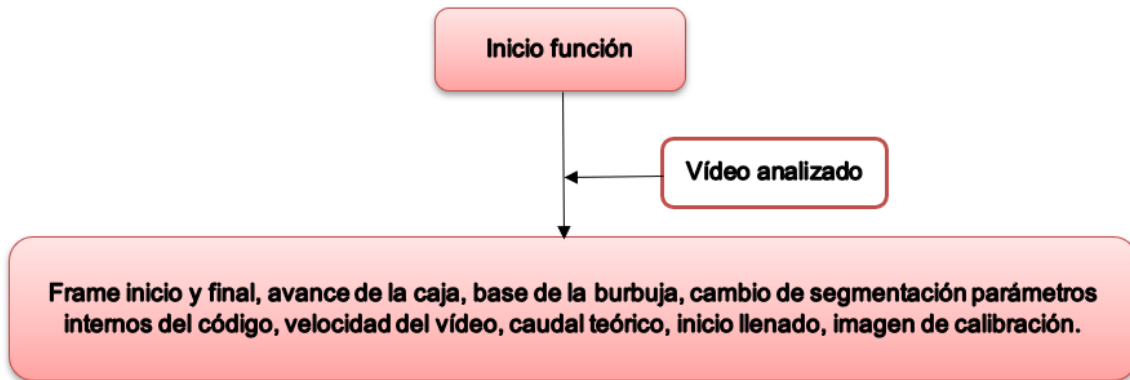
La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.





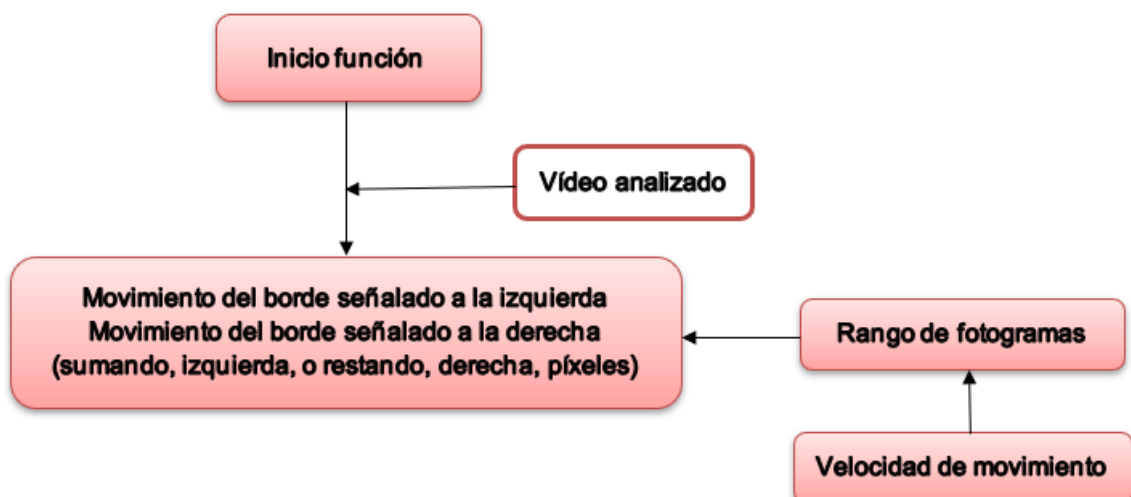
4.1.3. Completa parámetros

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



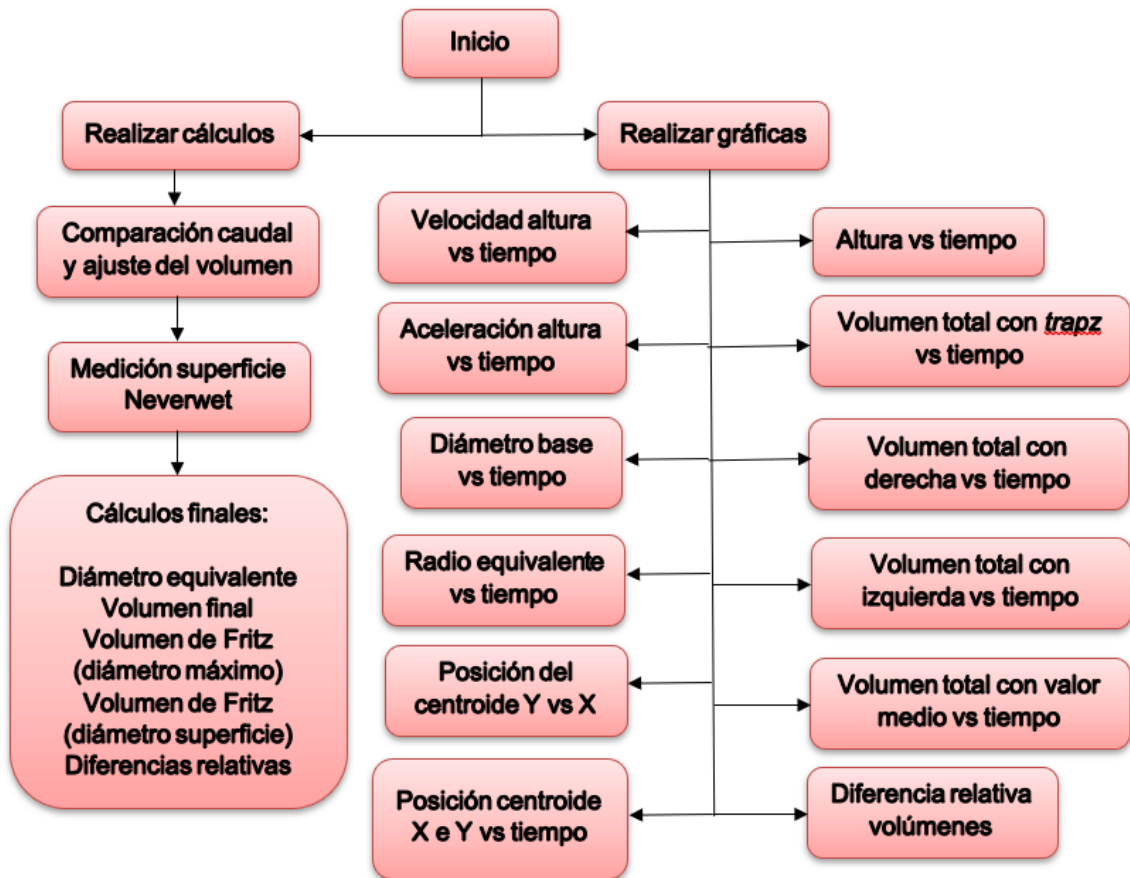
4.1.4. Completa movimiento del borde

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



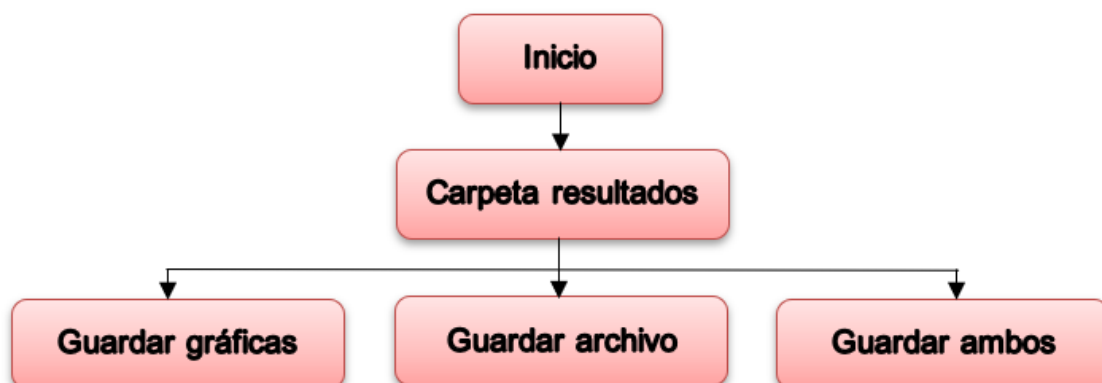
4.1.5. Completa gráficas

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



4.1.6. Completa guardar

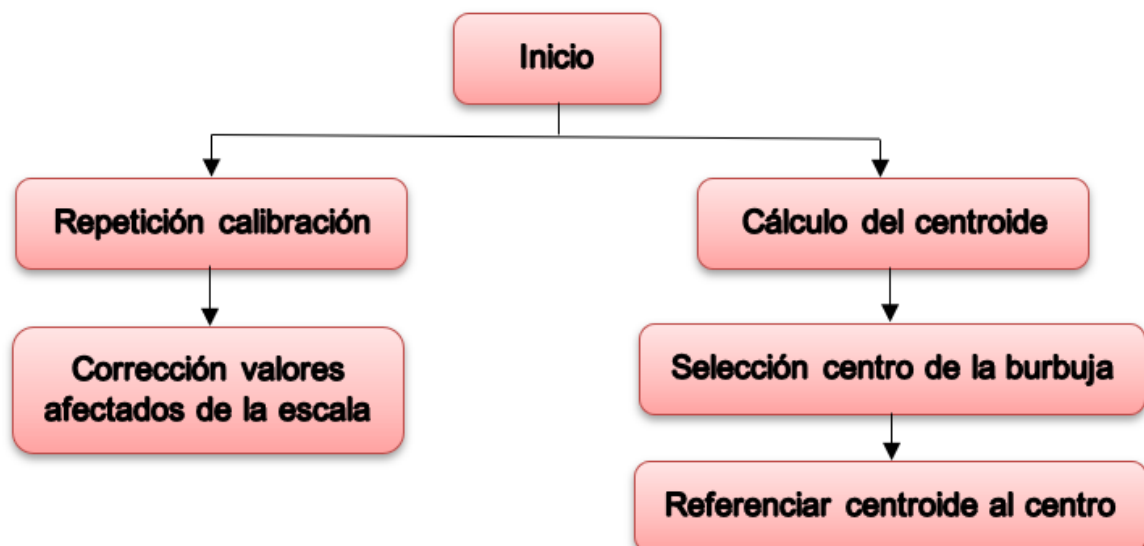
La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



4.1.7. Completa corrección

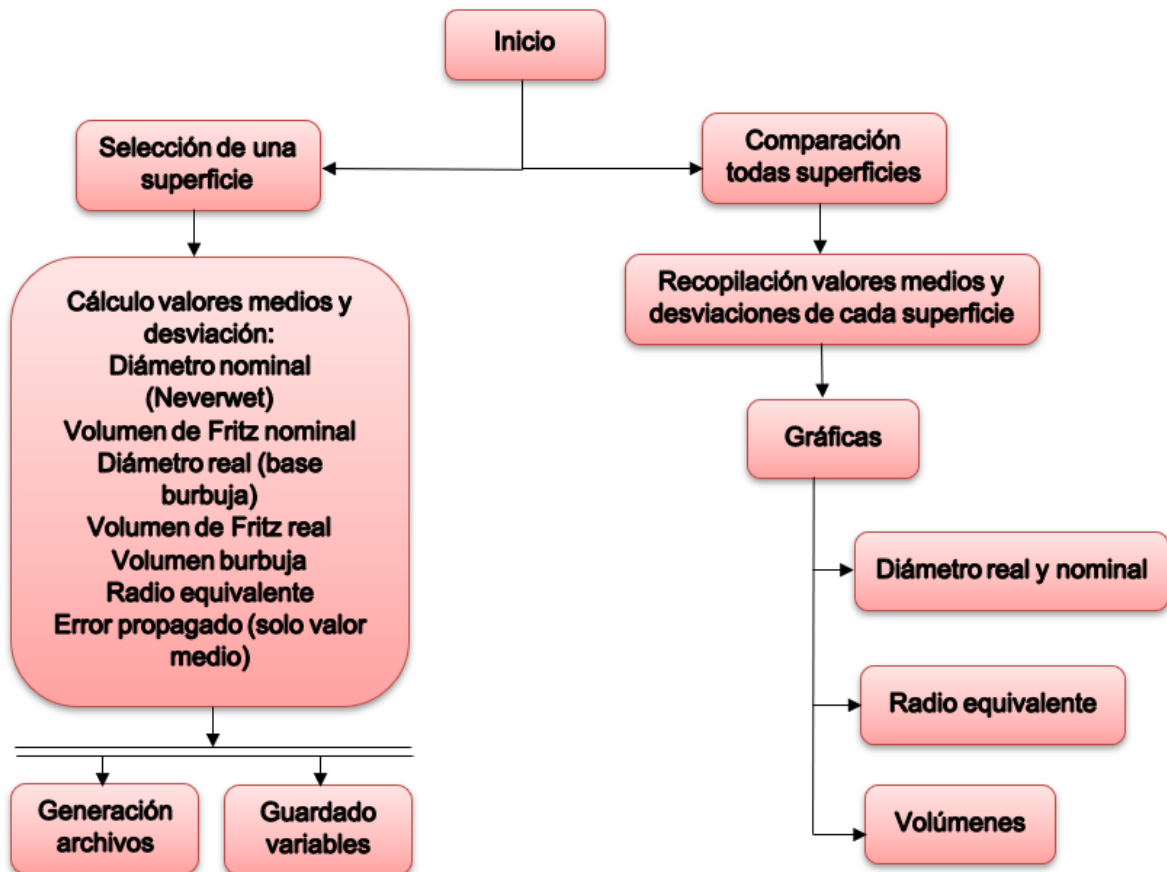
Este código se generó debido al error cometido al realizar la escala. En primera instancia, al calibrar se seleccionó solo 1 mm, aunque existía la posibilidad de coger una mayor distancia, lo que es más correcto. Por ello, se realizó un código para resolver este problema. A pesar de ser un código de solución de un error, se presenta para entender la importancia de una buena calibración y de cómo se ha sabido solventar el problema.

También se realiza una corrección respecto del centroide, pero esto se debe a un problema interno del código. Se presenta porque es una forma de corroborar que se han podido resolver los problemas surgidos.



4.1.8. Completa comparación

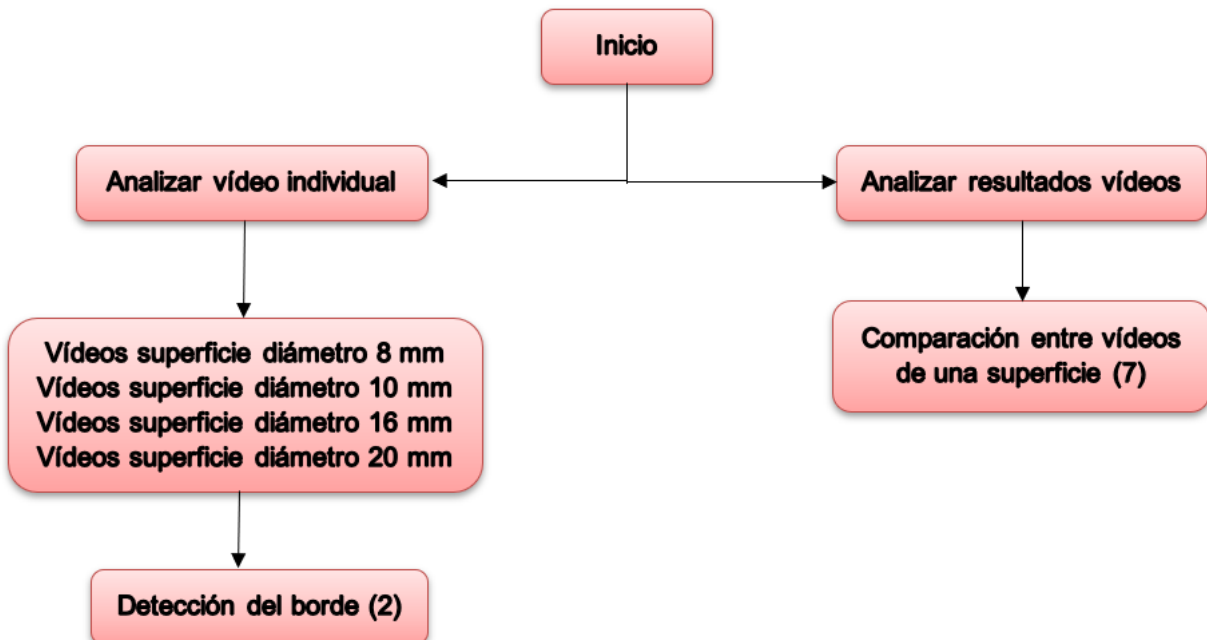
La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



4.2. Códigos detección borde de la línea de contacto

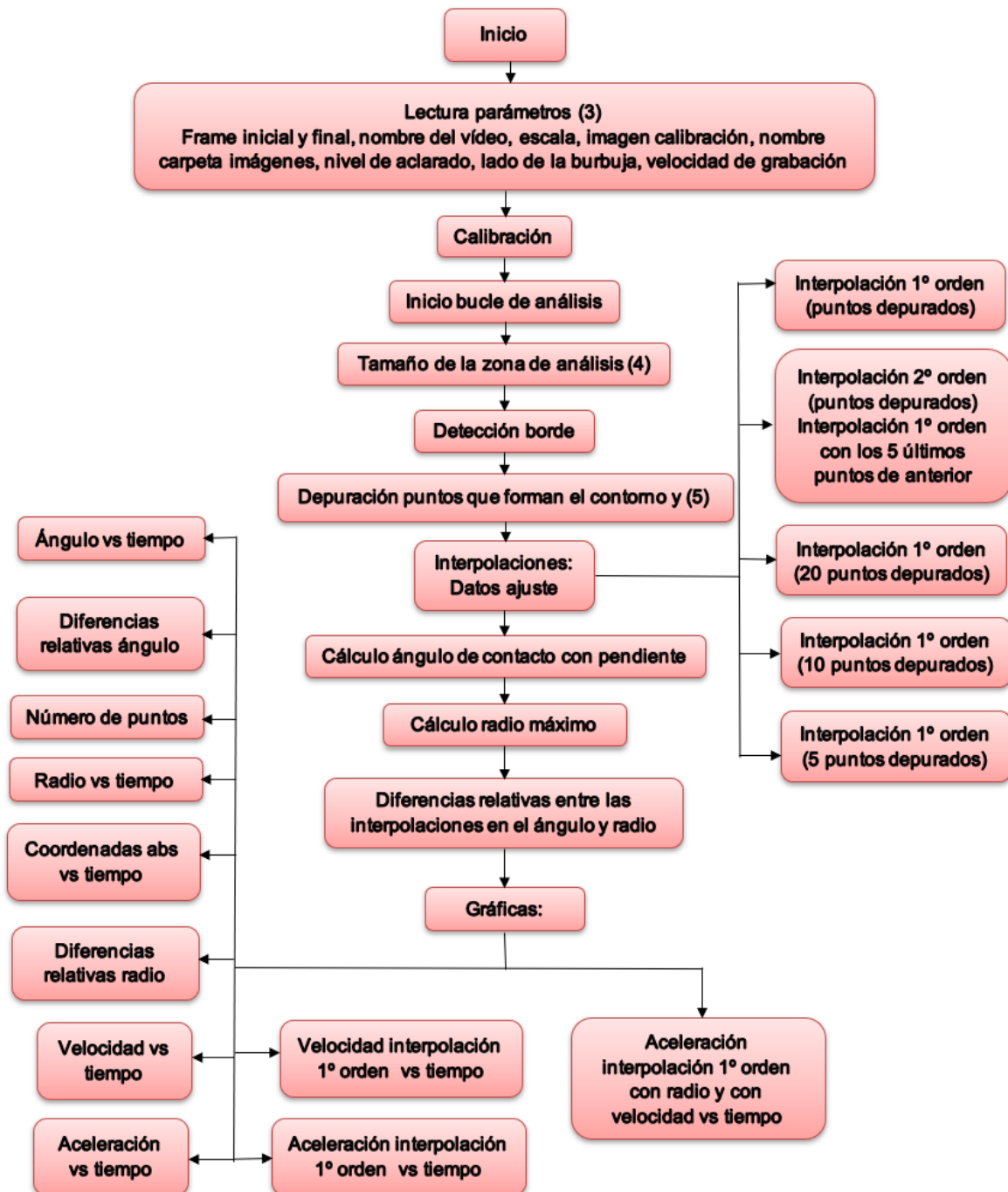
4.2.1. Detalle general

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



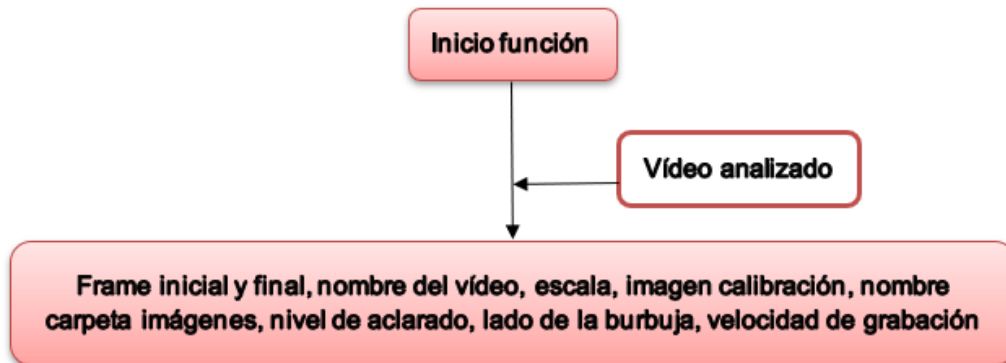
4.2.2. Detalle detección

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



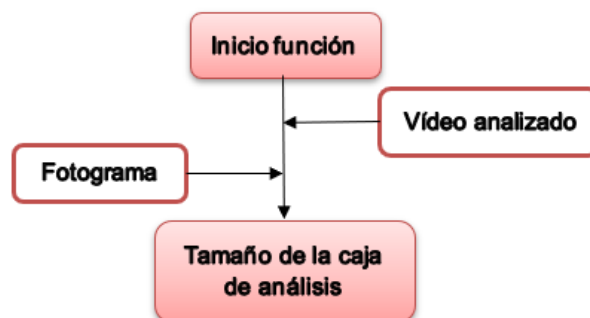
4.2.3. Detalle detección parámetros

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



4.2.4. Detección caja

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



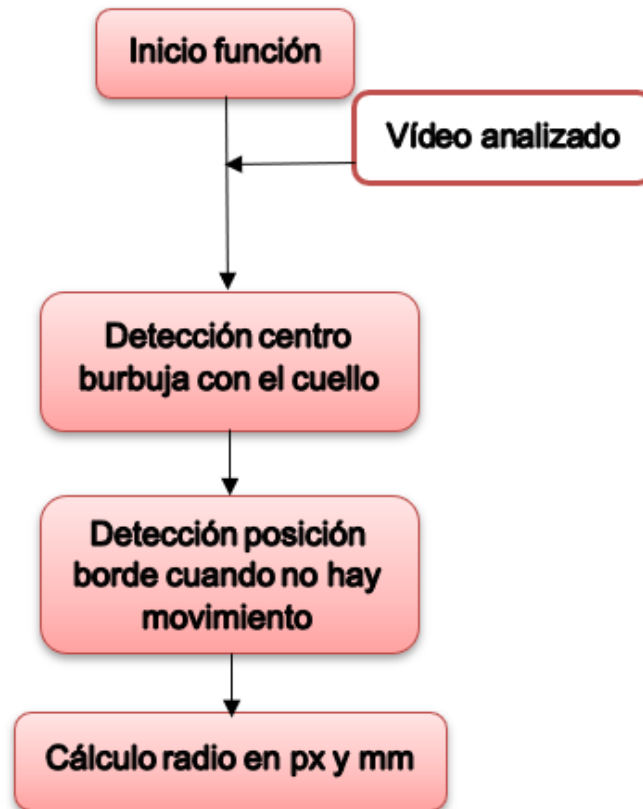
4.2.5. Detección diferencia

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



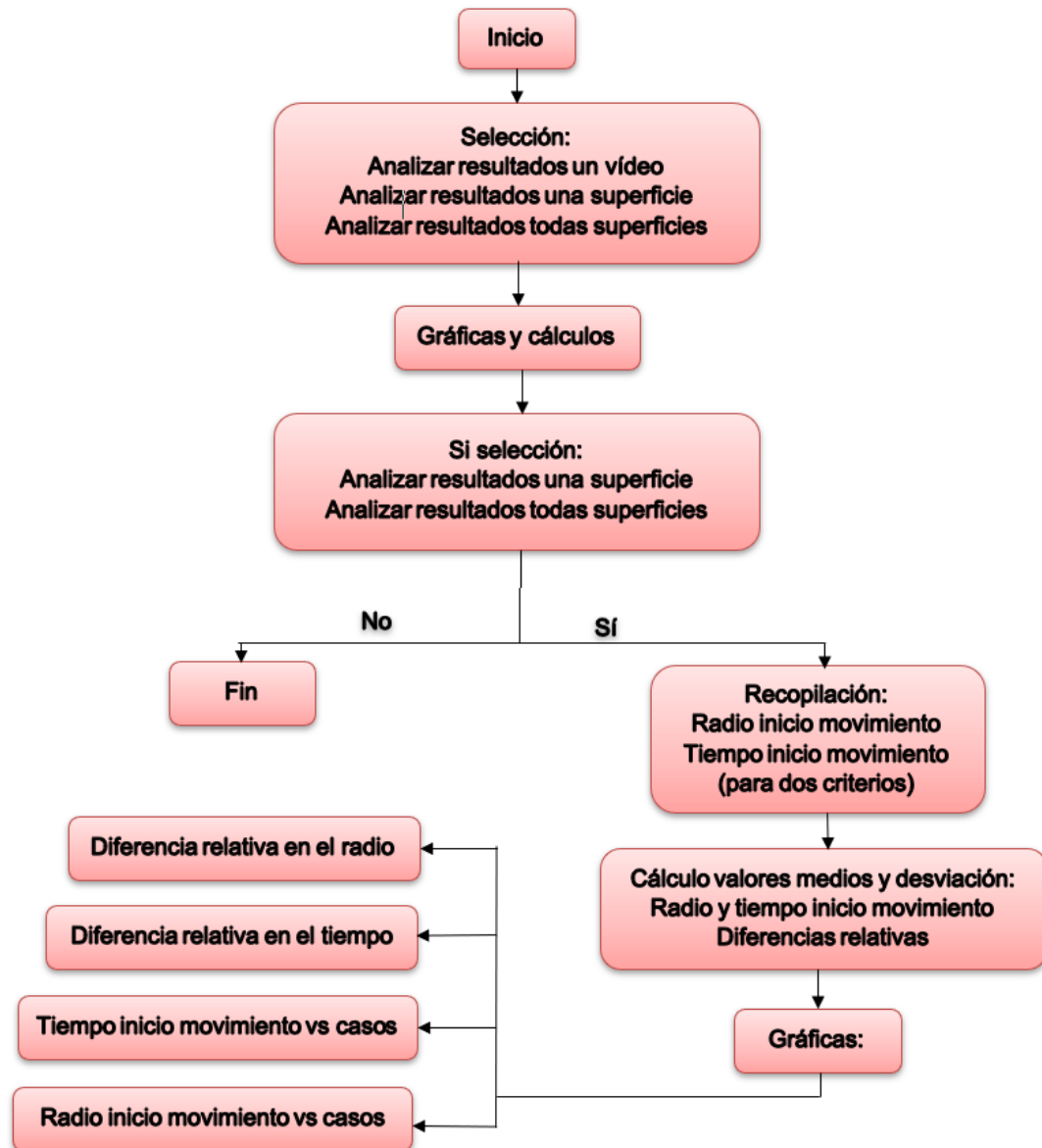
4.2.6. Detalle calibración radio

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



4.2.7. Detalle comparación

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



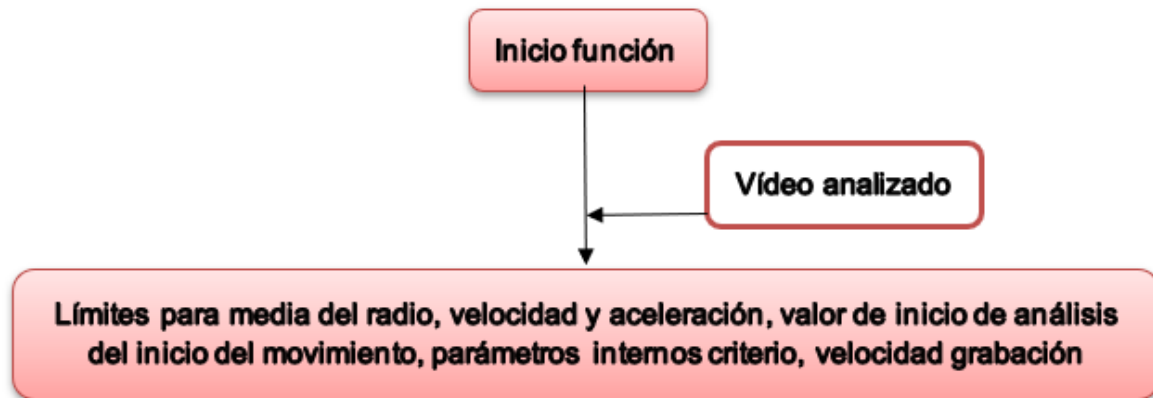
4.2.8. Detalle cálculos

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



4.2.9. Detalle parámetros

La descripción del código se realiza a través del diagrama de bloques.



5. Resultados

Este apartado del Trabajo Fin de Grado, desarrollado en la investigación sobre la formación de burbujas, se presentan los resultados obtenidos, de todos los análisis realizados. Ciertamente, que el resto de apartados han sido una mera introducción tanto a la teoría en que se basa el estudio, como a la experimentación y análisis necesarios, para concluir con la obtención de unos resultados, que nos permitan cuantificar el proceso de formación de burbujas y poder refrendar lo estudiado, es decir, se ha decidido trabajar de una forma dimensional. Se realiza de este modo porque el objetivo de este trabajo es encontrar el método óptimo de obtención de resultados, lo cual es más fácil usando parámetros dimensionales, ya que se pueden realizar comparaciones con la realidad. Esto sienta un precedente para posteriores trabajos en los que, para mejorar la comprensión del problema, habría que adimensionalizar los resultados.

Como se ha ido explicando a lo largo de todo el informe, sobre todo en el apartado de procesamiento de imágenes, han sido necesarios dos tipos de análisis para el estudio de todos los parámetros intervinientes en el proceso. Por tanto, se presentarán dos ramas de resultados. La primera parte, consistirá en una exposición de los resultados obtenidos en el análisis de una burbuja completa, en diferentes tamaños de superficies hidrofóbicas. La segunda parte, tratará la exposición de los resultados obtenidos en el análisis del detalle del borde de la línea de contacto en la base, para los mismos tamaños de superficies hidrofóbicas que en el apartado de la burbuja completa.

La mayoría de resultados obtenidos se ofrecen a través de gráficas y en algunos casos como datos impresos en pantalla o en archivos, por lo que en este apartado aparecerán algunas gráficas y tablas donde se recogen los datos más importantes. Por ejemplo, datos finales de la burbuja desprendida como volumen, radio equivalente, altura máxima, coordenada Y del centroide, diámetro de la base o volumen de Fritz.

Debido a que, al menos, se han realizado cuatro casos de cada superficie, existe una gran cantidad de gráficas. Porque se tienen dos tipos de análisis de cada superficie y en cada análisis se realizan más de diez gráficas de resultados. Esta gran

cantidad de gráficas, a la que se añaden las tablas de recopilación de datos importantes, hacen que este capítulo se extienda de una forma exagerada. Para solucionar esta aglomeración de gráficas, se decide incluir un solo caso de cada superficie, en cada análisis. Para realizar la comparación, y que no se preste a confusión por una posible manipulación, se recogen en tablas los resultados más importantes de todos los casos.

5.1. Burbuja completa

A continuación, se presentan los datos obtenidos en los sucesivos análisis de los vídeos, en los que se puede observar la burbuja completa. Se expondrán según el orden en que se van obteniendo, teniendo en cuenta los resultados previos que llevan a conseguir el dato definitivo. Como se ha dicho, los resultados representan lo mismo, pero para distintas superficies, por lo que se desarrollará en gran parte en la primera superficie, diámetro de 8 mm, y en el resto se asumirán comprendidas dichas explicaciones.

En primer lugar, se presentan los contornos que han permitido obtener los resultados, para poder comprobar, si dichos contornos se ajustan o no a la burbuja de una forma correcta y, por tanto, los resultados serán buenos o no.

5.1.1. Ajuste del contorno

Se muestran cuatro imágenes, con el contorno incluido, representativas tanto del proceso de formación de una burbuja en una determinada superficie, como del ajuste del contorno realizado. Muy semejantes al estudio realizado por D. Gerlach et al. [22].

Se debe destacar que, el contorno se encuentra dividido en una parte que se podría llamar lado izquierdo y otra, lado derecho, aunque no son realmente izquierda y derecha, porque la unión no siempre es el centro de la burbuja, sino que el contorno de la “izquierda” va del máximo al mínimo de la burbuja o el borde por la izquierda, sin repetir ningún valor, y el lado derecho el resto de valores, incluyendo el borde derecho. Incluir los bordes conlleva que, cuando se realiza el cálculo del volumen a partir de un proceso de integración de partes, la altura de dichas partes no sea siempre un píxel. Por otro lado, es necesario dividir el contorno en dos partes, para poder depurarlo de una forma correcta, ya que se deben establecer condiciones que no son válidas, al

mismo tiempo, en los dos extremos. Además, no puede hacerse con un solo contorno porque, en relación a lo dicho anteriormente, el punto inicial del vector donde está incluido dicho contorno, puede ser una zona que incluye las rugosidades, dicho punto no puede compararse con nada (por ser el primero), y debido a la gran cantidad de imágenes analizadas, los contornos no se pueden mejorar de uno en uno.

Como se dijo, en el apartado de Procesado de imágenes, una vez realizado y comprobado el código, se dedujo válido para todos los casos, a excepción de algunas condiciones y parámetros específicos de cada vídeo. Siendo la parte más costosa, temporalmente, el estudio del movimiento de la base, de forma manual.

Se debe destacar que cuanto mayor es la burbuja, menor tamaño tiene la imagen adjuntada, debido a que ocupa un mayor espacio y se debe reducir su tamaño para mantener los márgenes.

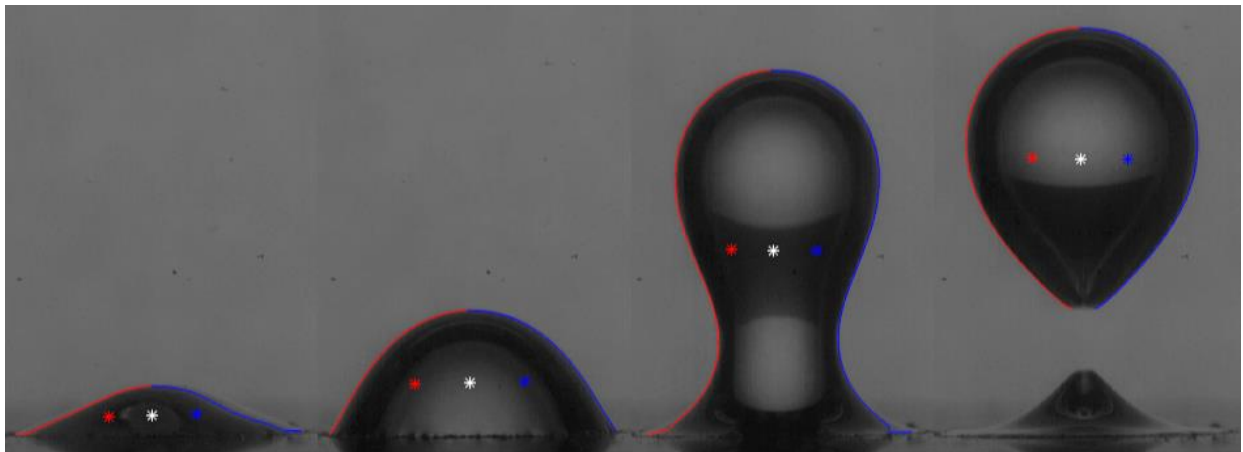


Figura 30. Evolución temporal de una burbuja, sobre una superficie de diámetro 8 mm.

Se puede observar en la Figura 30, que el contorno para esta superficie de 8 mm, no tiene tantos problemas como en el resto, debido a que la burbuja está mucho mejor definida. Esto se debe a que su tamaño es menor, siendo más parecido al de una burbuja formada en una tobera o aguja. En este caso, los bordes señalados manualmente están mucho más cerca del resto de puntos del contorno.

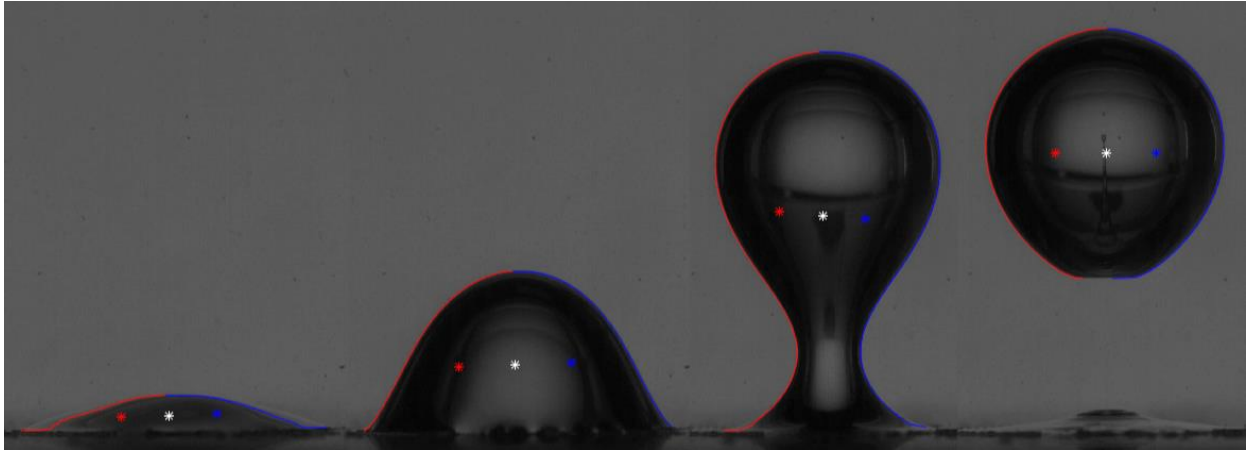


Figura 31. Evolución temporal de una burbuja, sobre una superficie de diámetro 10 mm.

En este caso de una superficie de 10 mm de diámetro, en la Figura 31 se puede ver que comienza a ser necesario una depuración mayor del contorno y el uso de los bordes como límites, aunque al ser todavía una burbuja de tamaño reducido, está bien definida.

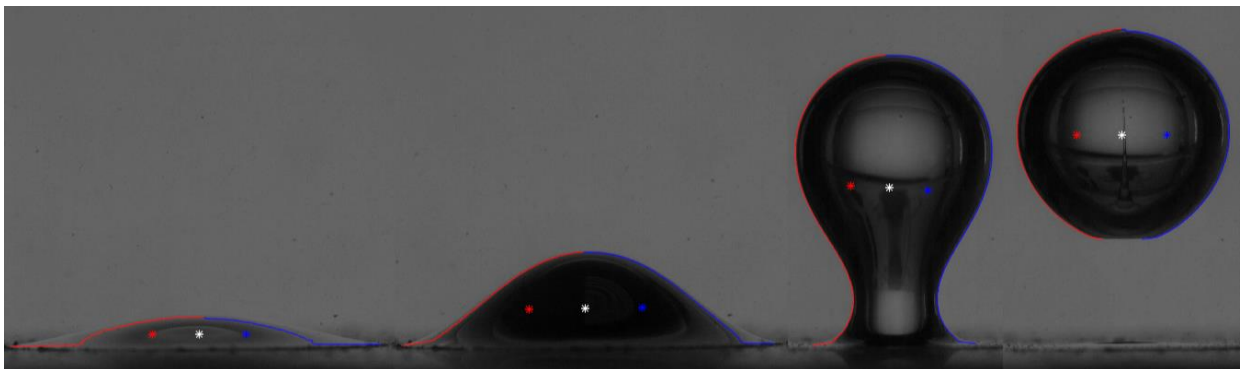


Figura 32. Evolución temporal de una burbuja, sobre una superficie de diámetro 16 mm.

Conforme la superficie va aumentando de tamaño, se puede observar una superficie de diámetro 16 mm en la Figura 32, al aire le cuesta más rellenar rápidamente toda la superficie, por lo que la parte inicial del vídeo es muy difícil de analizar y el contorno no se ajusta a la perfección a los bordes de la burbuja, pero conforme va creciendo, la modificación para encontrar los bordes va teniendo una influencia menor.

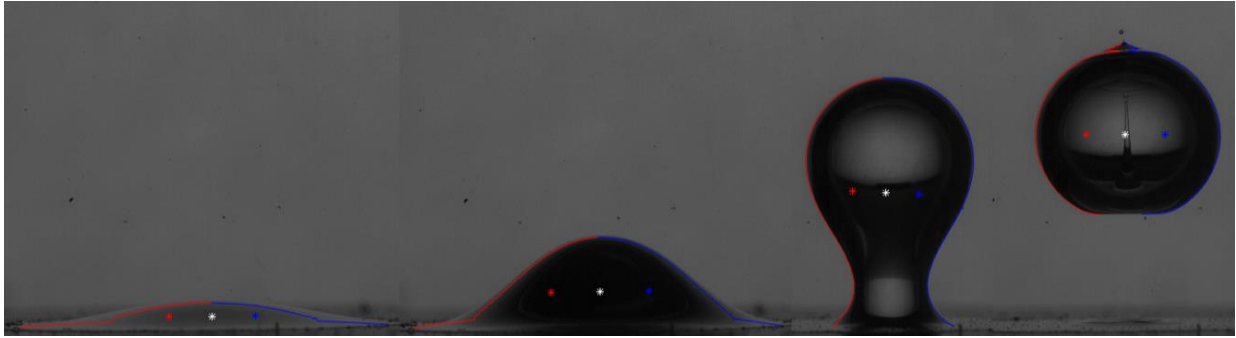


Figura 33. Evolución temporal de una burbuja, sobre una superficie de diámetro 20 mm.

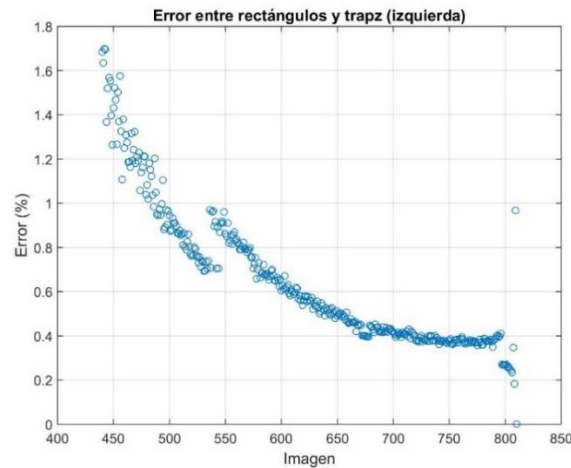
El caso más extremo, que se muestra en la Figura 33 es una superficie de 20 mm de diámetro, se realiza para comprobar el efecto de la superficie de Neverwet. Se demuestra que el aire consigue rellenar una superficie de diámetro 18 mm, aunque la superficie rociada tiene un diámetro de 20 mm. Esto confirma, que la superficie hidrofóbica tiene un cierto límite. Además, al tener un límite impuesto por el aire y el proceso y no por la superficie creada; el sistema se encuentra, en cierta medida, en libertad para moverse en la superficie. Este fenómeno no ha sido detectado durante el análisis mediante ningún parámetro, por lo que no se puede asegurar.

5.1.2. Volumen de la burbuja

Se presenta en primer lugar, las gráficas del volumen calculado con el contorno de la izquierda y el de la derecha, asumiendo simetría axial y que el límite de estos contornos es el centro de la burbuja. Como esto no sucede, se continúa con la gráfica del volumen calculado con la media de los dos. Se demuestra un método eficaz porque el volumen debe aumentar linealmente con el tiempo y según el indicador R cuadrado, esto se produce de una forma correcta. Este valor varía entre 0 y 1, y para considerarse un buen ajuste, debe ser al menos 0.99 o aún más próximo a 1.

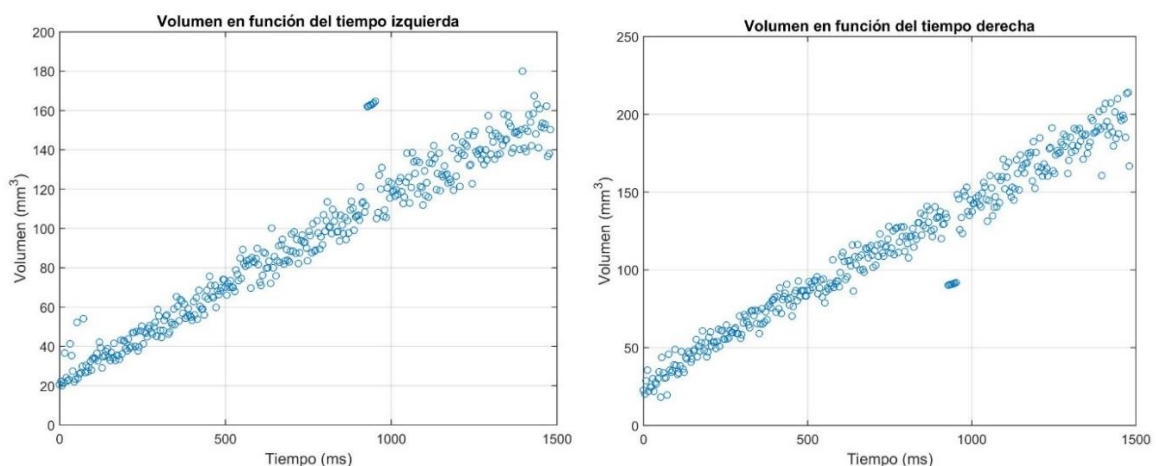
Además, se presenta una comparación entre el volumen calculado con el código propio y mediante la función *trapz*.

Se comienza con la superficie de 8 mm y se analiza la segunda burbuja del primer vídeo realizado (Caso 2).



Gráfica 1. Diferencia relativa al crear un código de cálculo de volumen por integración y no usar *trapz*, diámetro 8 mm.

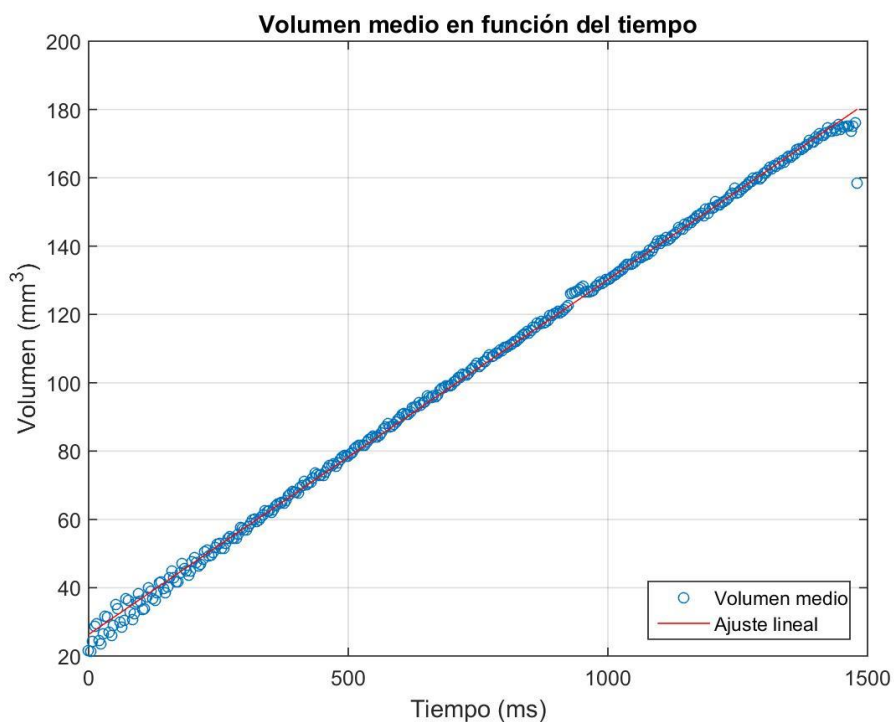
Se comete un máximo de 1.8 % de error al crear un código de integración propio, en vez de usar directamente la función. Como puede verse, la diferencia relativa se ve muy afectada del ajuste del contorno a la burbuja, debido a que en la parte inicial el error relativo es máximo y es donde el contorno tiene un peor ajuste, sin embargo, en la parte final, la diferencia relativa es aproximadamente cero, y es donde el contorno tiene un mejor ajuste. Realmente, esto sucede porque en los primeros contornos, los bordes están muy alejados y, por tanto, el diferencial de altura para la integración es muy grande.



Gráfica 2. Volumen de la burbuja calculado por la izquierda y derecha, diámetro 8 mm.

Se observa que la dispersión de los valores es muy alta, si el ajuste debe ser a una regresión lineal, tanto para el volumen de la burbuja considerando simetría axial desde la izquierda, como por la derecha. También, se puede detectar fácilmente, que

llamar contorno izquierdo y derecho no es válido, porque no se obtiene el mismo volumen calculando por la “izquierda” y por la “derecha”. Principalmente, la diferencia no se debe a que la burbuja no tenga total simetría axial, que además sucede, sino que es debida a las oscilaciones laterales de la burbuja, que hacen que el centro de la misma no coincida con el punto de unión de los dos contornos. Por ello, la imposibilidad para realizar los cálculos con un único contorno, se suple con este valor medio.



Gráfica 3. Volumen de la burbuja vs tiempo y ajuste lineal, diámetro 8 mm.

	Volumen final (mm ³)	Volumen de Fritz nominal (mm ³)	Volumen de Fritz real (mm ³)	Diferencia relativa nominal (%)	Diferencia relativa real (%)
Caso 1	161.437	187.772	186.404	16.313	15.465
Caso 2	158.466	187.772	185.617	18.493	17.133
Caso 3	165.015	187.772	185.976	13.791	12.703
Caso 4	161.496	185.595	186.449	14.929	15.459

Tabla 2. Comparación volumen final y volumen de Fritz, para diámetro 8 mm.

En esta tabla, se recoge el volumen final de la burbuja una vez se ha desprendido y el volumen de Fritz calculado, teniendo en cuenta el tamaño real de la superficie de

Neverwet (nominal) y el diámetro máximo de la base de la burbuja durante el proceso de formación (real), según [7].

Se puede detectar, que el volumen de la burbuja no coincide en ningún momento con el volumen de Fritz, esto se debe a que la suposición de la validez del volumen de Fritz sustituyendo el diámetro del orificio por el diámetro máximo de la base de la burbuja, no es del todo correcta, podría servir como una orientación. Además, esta mayor diferencia se debe, también, a que una gran parte de la burbuja permanece anclada en el disco orificio. Fenómeno que no se observa tan acusado en el resto de tamaños de superficies.

Es un buen resultado, que prácticamente todos los volúmenes finales sean semejantes, debido que es una señal de las condiciones cuasi-estacionarias, que permiten la periodicidad del proceso.

	Caudal teórico (ml/min)	Caudal experimental (ml/min)	R ²	Diferencia relativa (%)
Caso 1	5	6.3487	0.998	26.9748
Caso 2	5	6.2320	0.998	24.6398
Caso 3	5	6.3333	0.998	26.6655
Caso 4	3.4	4.7434	0.999	39.5107

Tabla 3. Comparación caudal medido con el caudalímetro y con el análisis. Ajuste a la regresión lineal, para diámetro 8 mm.

En la Tabla 3, se recoge el caudal teórico medido con el caudalímetro y plasmado en las imágenes mediante comentarios, que puede no ser exactamente el de la burbuja en cuestión, debido a que se producían fluctuaciones durante la realización de distintas pruebas hasta grabar el vídeo correcto. El caudal experimental es el obtenido con la pendiente de la regresión lineal, ya que, en condiciones de flujo constante, el volumen debe relacionarse con el tiempo de forma lineal. Además, se presentan dos métodos de comparación, el coeficiente R cuadrado y la diferencia relativa entre ambos valores.

Es muy interesante que todos los coeficientes R cuadrado son mayores a 0.99, lo que son resultados muy buenos teniendo en cuenta la dificultad de las imágenes y la problemática derivada con los contornos. Esto demuestra que el código de análisis es de una gran validez. Por otro lado, las diferencias relativas tienen valores más grandes, que posiblemente, se deban a lo señalado anteriormente. Los caudales

teóricos no fueron recogidos de una forma precisa durante el proceso de medición, esto se deduce porque el ajuste a una regresión lineal es muy bueno, por tanto, éste debe ser el caudal real suministrado.

	Diámetro superficie (mm)	Diámetro máximo base (mm)	Diámetro equivalente burbuja (mm)
Caso 1	8.1276	8.0681	6.7557
Caso 2	8.1276	8.0341	6.7140
Caso 3	8.1276	8.0496	6.8052
Caso 4	8.0331	8.0701	6.7563

Tabla 4. Comparación diámetro de la base de la burbuja, diámetro real de la superficie y diámetro equivalente de la burbuja final, para diámetro 8 mm.

Claramente, en la Tabla 4, se comprueba que, aunque se haya creado una superficie de aproximadamente 8 mm de diámetro, la zona rellenada por el aire es siempre menor, esto sucede en todos los casos.

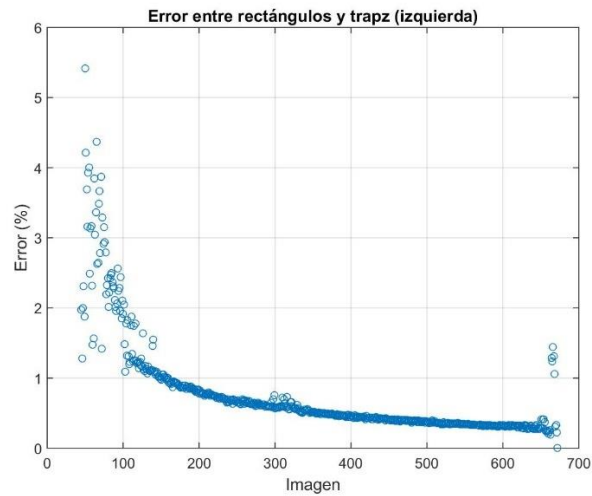
Se recoge también, el diámetro equivalente de la burbuja final. Esto se realiza comparando el volumen final de la burbuja con el de una esfera, despejando el diámetro. Se obtienen valores menores al diámetro de la superficie, lo que será una tónica en todos los casos.

	Tiempo de llenado (ms)	Porcentaje respecto del tiempo total (%)
Caso 1	112	6.93
Caso 2	136	8.42
Caso 3	140	8.64
Caso 4	156	7.29

Tabla 5. Tiempo de llenado, diámetro 8 mm.

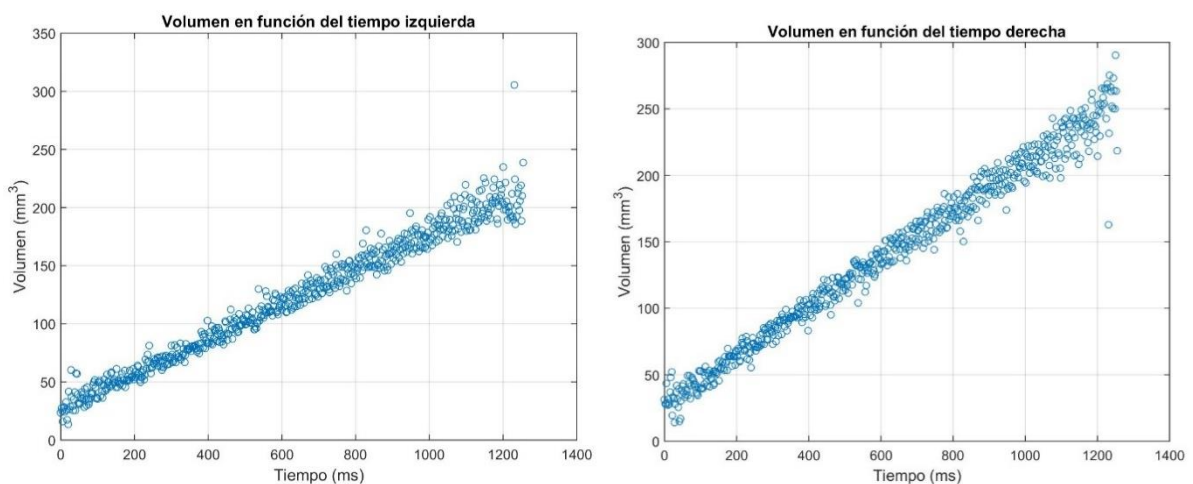
El tiempo de llenado se recoge para tener presente que la primera imagen analizada, realmente no es la que recoge el inicio del proceso de formación de la burbuja. Para analizar estos datos se debe tener en cuenta el caudal utilizado. Aunque se supone que con condiciones cuasi-estacionarias, el proceso debe tener la misma duración, realmente no sucede. El Caso 4, demuestra que, si se reduce el caudal, el proceso tiene una mayor duración, por muy bajo que sea el mismo y esté en el rango de condiciones cuasi-estacionarias. Por otro lado, si se analiza el tiempo de llenado, respecto al tiempo total del proceso (incluyendo tiempo de llenado y tiempo analizado) el resultado es muy similar en todos los casos. Esto nos indica que el tiempo de llenado, respecto del tiempo total, es constante e independiente del caudal.

Se continúa con la superficie de 10 mm realizando el mismo estudio anterior. Se analiza la burbuja del primer vídeo realizado (Caso 1).

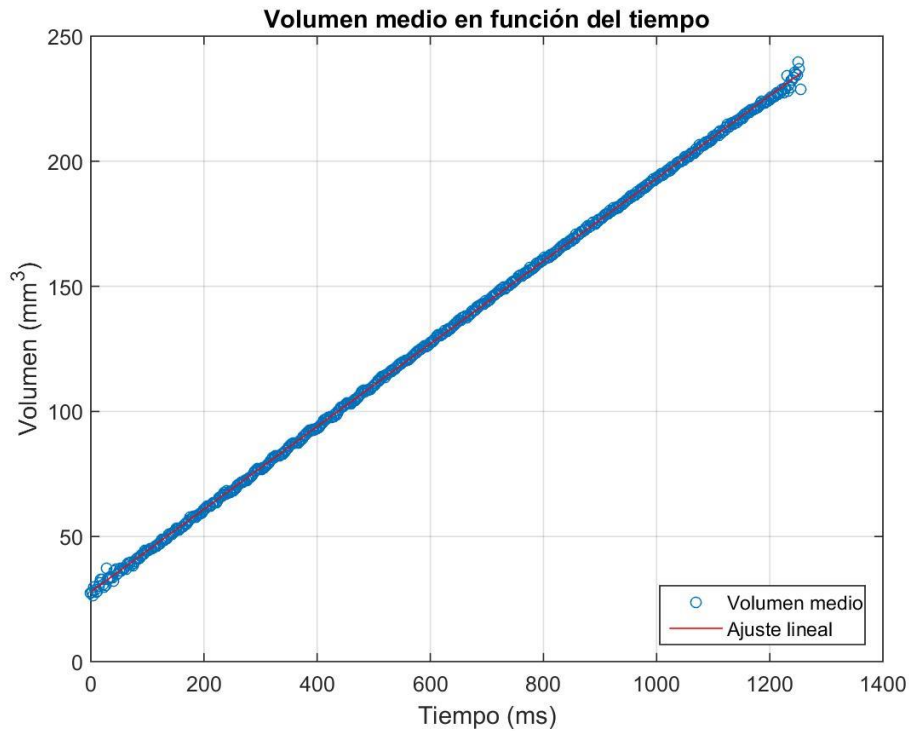


Gráfica 4. Diferencia relativa al crear un código de cálculo de volumen por integración y no usar trapz, diámetro 10 mm.

Se comete un máximo de 6 % de error al crear un código de integración, de nuevo el mismo comportamiento que en la superficie de 8 mm, reduciéndose el error conforme el contorno se ajusta mejor a la burbuja y los bordes forman una parte más coherente del contorno.



Gráfica 5. Volumen de la burbuja calculado por la izquierda y derecha, diámetro 10 mm.



Gráfica 6. Volumen de la burbuja vs tiempo y ajuste lineal, diámetro 10 mm.

	Volumen final (mm ³)	Volumen de Fritz nominal (mm ³)	Volumen de Fritz real (mm ³)	Diferencia relativa nominal (%)	Diferencia relativa real (%)
Caso 1	228.774	228.399	221.720	0.164	3.084
Caso 2	235.796	228.399	219.519	3.137	6.903
Caso 3	235.150	228.399	222.796	2.871	5.254
Caso 4	235.172	228.399	222.871	2.880	5.231

Tabla 6. Comparación volumen final y volumen de Fritz, para diámetro 10 mm.

En este caso, se destaca que el volumen final de la burbuja es mayor que el volumen de Fritz, lo cual sucede en las superficies de 10 y 16 mm.

	Caudal teórico (ml/min)	Caudal experimental (ml/min)	R ²	Diferencia relativa (%)
Caso 1	10	9.9146	0.999	0.8537
Caso 2	10	13.68	0.999	36.8003
Caso 3	10	13.6413	0.999	36.4134
Caso 4	10	13.6731	0.999	36.7311

Tabla 7. Comparación caudal medido con el caudalímetro y con el análisis. Ajuste a la regresión lineal, para diámetro 10 mm.

Para la Tabla 7, lo más importante a destacar, es que el volumen se ajusta a una recta a la perfección, ya que el coeficiente R cuadrado está siendo de 0.999, lo que es un valor muy bueno teniendo en cuenta que no son valores sintéticos. Esto demuestra que el método de realizar el valor medio de los dos volúmenes (por la izquierda y derecha) es totalmente aceptado. Los volúmenes obtenidos son mayores que en el caso de 8 mm.

	Diámetro superficie (mm)	Diámetro máximo base (mm)	Diámetro equivalente burbuja (mm)
Caso 1	9.8858	9.5967	7.5882
Caso 2	9.8858	9.5015	7.6650
Caso 3	9.8858	9.6433	7.6580
Caso 4	9.8858	9.6465	7.6582

Tabla 8. Comparación diámetro de la base de la burbuja, diámetro real de la superficie y diámetro equivalente de la burbuja final, para diámetro 10 mm.

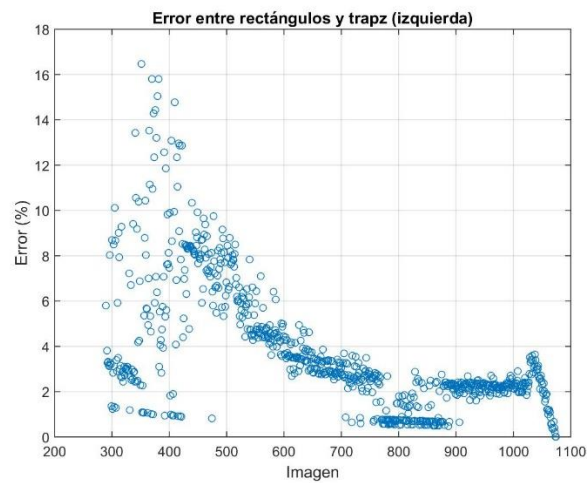
Se puede ver que el diámetro real, llenado por el aire es menor que el diámetro de la superficie creada, además, como la superficie aumenta y la burbuja también, el diámetro equivalente es mayor respecto a la superficie de 8 mm

	Tiempo de llenado (ms)	Porcentaje respecto del tiempo total (%)
Caso 1	86	6.42
Caso 2	212	19.78
Caso 3	228	21.27
Caso 4	236	22.02

Tabla 9. Tiempo de llenado, diámetro 10 mm.

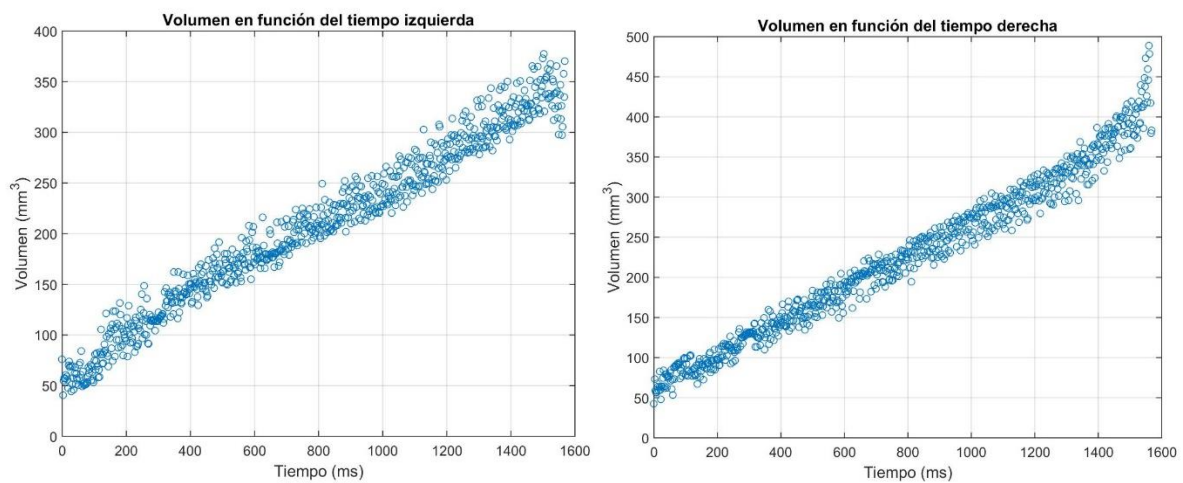
Para la superficie de 10 mm, el dato del tiempo de llenado no es del todo correcto en el primer caso, ya que su caudal es el mismo que el del resto, pero el tiempo es mucho menor. Eliminando este dato, si se referencian respecto de la duración total del proceso, se puede observar que, al igual que ocurría en la superficie de 8 mm, la etapa de llenado, dentro del proceso de formación de la burbuja, es constante para cualquier caso.

A continuación, se realiza el estudio del volumen para la superficie de 16 mm. Se analiza la burbuja del primer vídeo realizado (Caso 1).

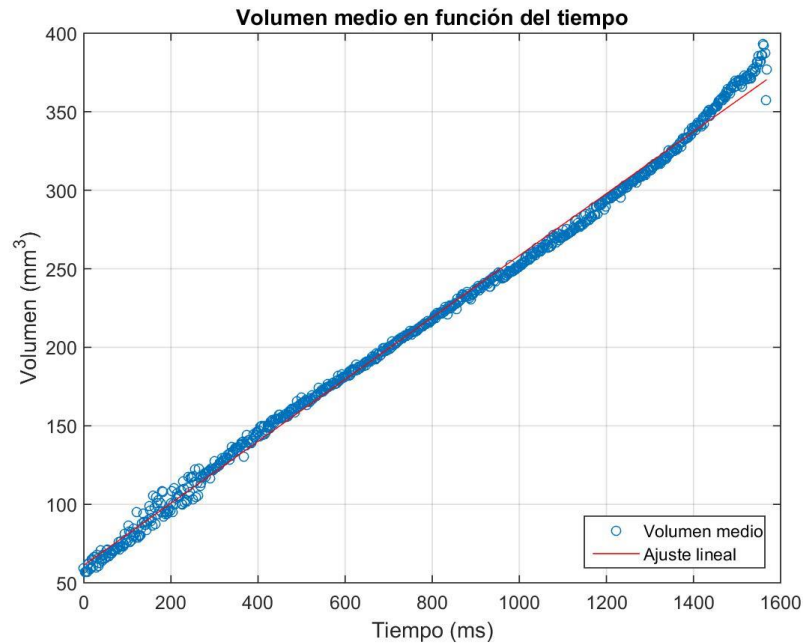


Gráfica 7. Diferencia relativa al crear un código de cálculo de volumen por integración y no usar trapz, diámetro 16 mm.

Se comete un máximo de 18 % de error, al crear un código de integración.



Gráfica 8. Volumen de la burbuja calculado por la izquierda y derecha, diámetro 16 mm.



Gráfica 9. Volumen de la burbuja vs tiempo y ajuste lineal, diámetro 16 mm.

Se observa en la Gráfica 9, que, en la parte final, el volumen se separa del comportamiento lineal, lo que se ve reflejado en el coeficiente R cuadrado, aunque de forma muy leve debido a que existen muchos puntos.

	Volumen final (mm ³)	Volumen de Fritz nominal (mm ³)	Volumen de Fritz real (mm ³)	Diferencia relativa nominal (%)	Diferencia relativa real (%)
Caso 1	376.764	369.025	359.924	2.054	4.470
Caso 2	382.876	369.025	361.556	3.618	5.568
Caso 3	390.789	369.025	361.378	5.569	7.526
Caso 4	361.349	351.219	341.4506	2.803	5.507

Tabla 10. Comparación volumen final y volumen de Fritz, para diámetro 16 mm.

El Caso 4 afectará en posteriores análisis, debido a que el volumen no es semejante al resto. Esto está causado por problemas en la detección del contorno de la burbuja final en ese vídeo.

	Caudal teórico (ml/min)	Caudal experimental (ml/min)	R ²	Diferencia relativa (%)
Caso 1	10	11.83	0.996	18.2997
Caso 2	10	16.1878	0.996	61.8776
Caso 3	10	16.1927	0.996	61.9265
Caso 4	10	12.0877	0.995	20.8774

Tabla 11. Comparación caudal medido con el caudalímetro y con el análisis. Ajuste a la regresión lineal, para diámetro 16 mm.

Como se había adelantado, el ajuste es levemente peor que en las dos superficies anteriores, aunque sigue siendo muy bueno, siempre por encima de 0.99. A pesar de esto, las diferencias entre el caudal teórico y experimental son grandes. Lo que puede deberse a la mala recogida del dato del caudalímetro.

	Diámetro superficie (mm)	Diámetro máximo base (mm)	Diámetro equivalente burbuja (mm)
Caso 1	15.9725	15.5786	8.961
Caso 2	15.9725	15.6492	9.0092
Caso 3	15.9725	15.6415	9.0708
Caso 4	15.2018	14.779	8.8371

Tabla 12. Comparación diámetro de la base de la burbuja, diámetro real de la superficie y diámetro equivalente de la burbuja final, para diámetro 16 mm.

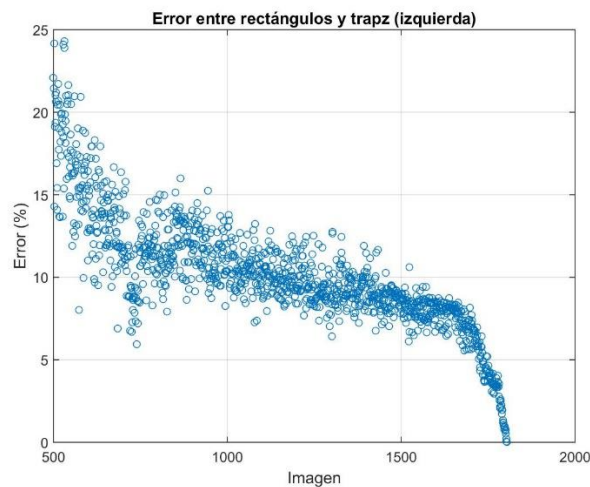
Es destacable que el comportamiento, conforme se tiene una superficie mayor, la burbuja es mayor y todas sus características con ella, se mantiene también en la superficie de 16 mm.

	Tiempo de llenado (ms)	Porcentaje respecto del tiempo total (%)
Caso 1	576	26.87
Caso 2	420	26.38
Caso 3	420	26.38
Caso 4	456	23.03

Tabla 13. Tiempo de llenado, diámetro 16 mm.

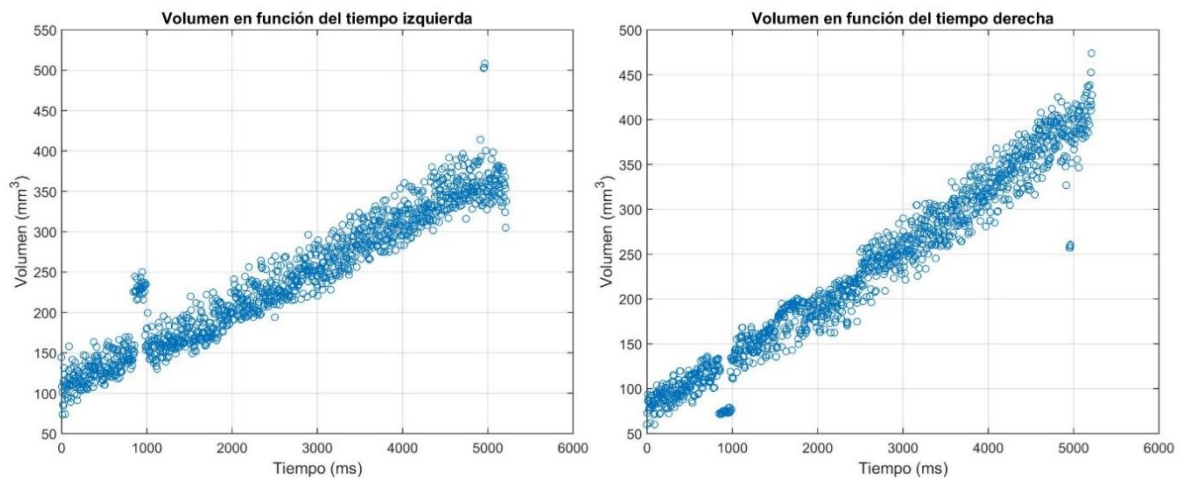
Aunque el tiempo de llenado por sí mismo, solo indique qué proceso tiene una mayor duración, debido a un caudal menor (se deben mirar los caudales experimentales), si se referencia respecto del tiempo total, se sigue manteniendo el mismo comportamiento que en los anteriores casos. La etapa de llenado de la burbuja es un proceso constante dentro de la duración total de la formación, variando de un caso a otro en un 3 %.

En último lugar, se calcularon los mismos resultados para la superficie de 20 mm. Se analiza la burbuja del tercer vídeo realizado (Caso 2).

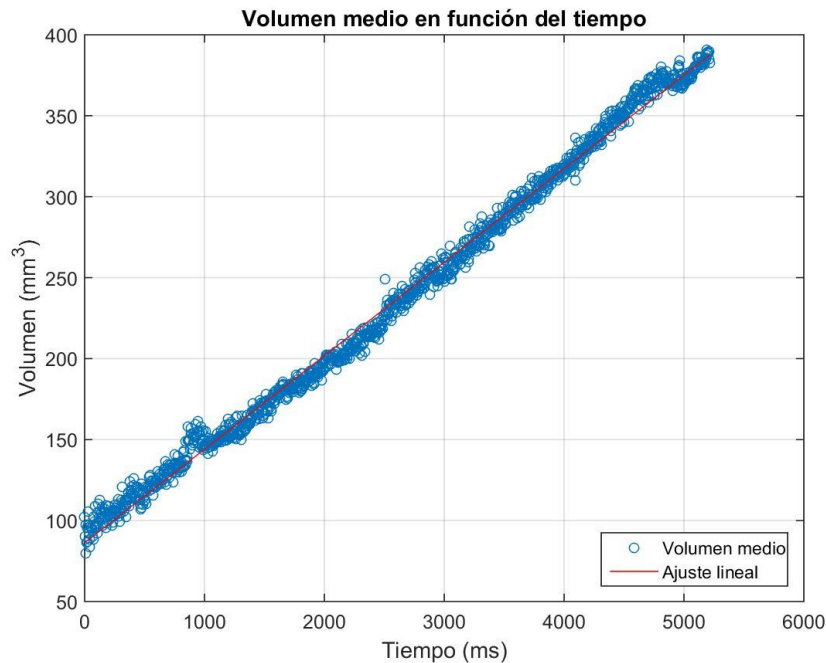


Gráfica 10. Diferencia relativa al crear un código de cálculo de volumen por integración y no usar trapz, diámetro 20 mm.

Se comete un máximo de 25 % de error al crear un código de integración. En esta superficie, se produce el mayor error en el inicio, debido a que en las primeras imágenes analizadas, los bordes están muy separados del contorno detectado.



Gráfica 11. Volumen de la burbuja calculado por la izquierda y derecha, diámetro 20 mm.



Gráfica 12. Volumen de la burbuja vs tiempo y ajuste lineal, diámetro 20 mm.

	Volumen final (mm ³)	Volumen de Fritz nominal (mm ³)	Volumen de Fritz real (mm ³)	Diferencia relativa nominal (%)	Diferencia relativa real (%)
Caso 1	346.466	403.645	358.767	16.504	3.550
Caso 2	382.610	463.805	425.003	21.221	11.080
Caso 3	387.71	463.805	423.649	19.627	9.270
Caso 4	385.712	463.805	423.386	20.247	9.767

Tabla 14. Comparación volumen final y volumen de Fritz, para diámetro 20 mm.

En el caso de diámetro 20 mm sucede como en el de 8 mm, siendo el volumen de la burbuja final menor que el volumen de Fritz, debido a que el aire no llena la superficie completa y a la gran cantidad de aire que se debe mantener en la superficie para que en ningún momento el agua toque la misma.

	Caudal teórico (ml/min)	Caudal experimental (ml/min)	R ²	Diferencia relativa (%)
Caso 1	10	15.0807	0.989	50.8074
Caso 2	3.4	3.4669	0.994	1.9669
Caso 3	8	7.6033	0.996	4.9590
Caso 4	8	7.594	0.994	5.0748

Tabla 15. Comparación caudal medido con el caudalímetro y con el análisis. Ajuste a la regresión lineal, para diámetro 20 mm.

	Diámetro superficie (mm)	Diámetro máximo base (mm)	Diámetro equivalente burbuja (mm)
Caso 1	17.471	15.5285	8.7141
Caso 2	20.0749	18.3954	9.0071
Caso 3	20.0749	18.3368	9.0470
Caso 4	20.0749	18.3254	9.0314

Tabla 16. Comparación diámetro de la base de la burbuja, diámetro real de la superficie y diámetro equivalente de la burbuja final, para diámetro 20 mm.

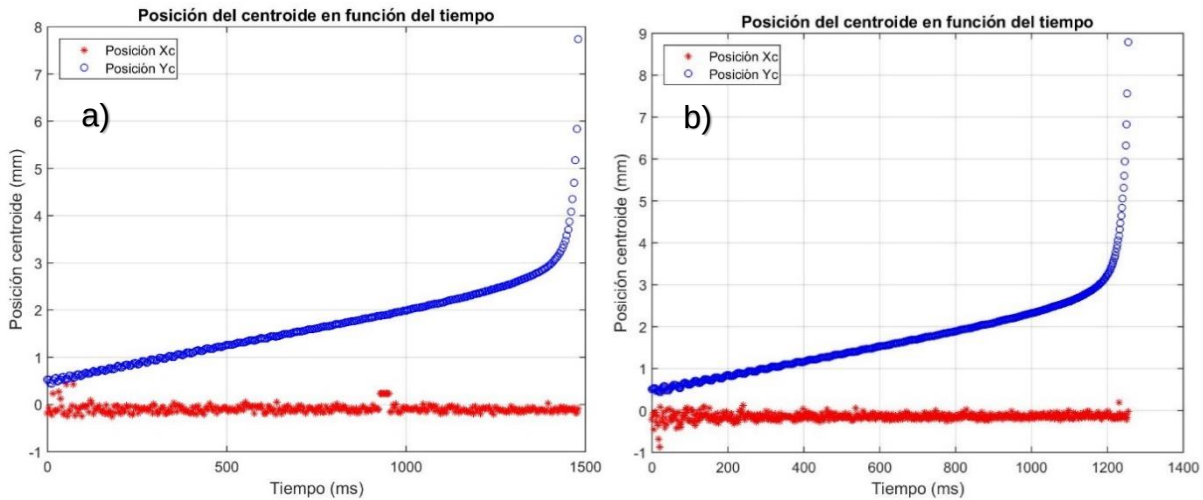
El diámetro equivalente no aumenta, teniendo en cuenta los conseguidos en la superficie de 16 mm, esto se debe a lo dicho anteriormente. Este caso no es muy estable y la superficie nunca se llena de aire al completo. Se puede decir, que se ha encontrado cierto límite a la hidrofobia de la superficie, ya que tanto el volumen como el diámetro, no se corresponden con el tamaño de la superficie.

	Tiempo de llenado (ms)	Porcentaje respecto del tiempo total (%)
Caso 1	294	18.38
Caso 2	1992	27.64
Caso 3	696	21.13
Caso 4	696	20.90

Tabla 17. Tiempo de llenado, diámetro 20 mm.

A pesar de las tremendas diferencias en el tiempo de llenado, se pasa de 1992 ms a 696 ms, porque en el segundo caso existe un caudal de 3.4 ml/min; si se pone en contexto este tiempo con el total del proceso de formación de la burbuja, la etapa de llenado sigue teniendo la misma duración independientemente del caudal, aunque en esta superficie las diferencias entre casos son mayores, en torno al 10 %.

5.1.3. Centroide de la burbuja



Gráfica 13. Movimiento del centroide de la burbuja vs tiempo, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).

Debido a que las gráficas del movimiento del centroide son muy semejantes en todas las superficies, a excepción de la altura que consigue en el desprendimiento, se explicará para estos casos.

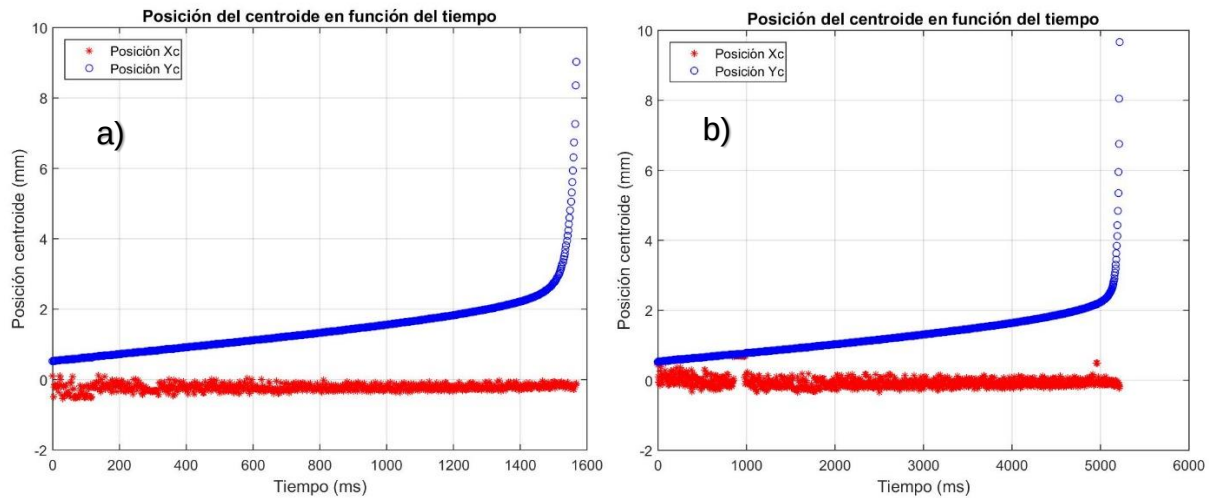
Se puede deducir que, si el orificio está bien nivelado, es decir, se encuentra totalmente horizontal, la burbuja ascenderá verticalmente sin ningún movimiento en la horizontal.

Como puede observarse en la gráfica, la coordenada X se mantiene constante en cero, por lo que se asume que la burbuja no se mueve en la horizontal respecto al centro, calibrado con el cuello de la burbuja. Existen pequeñas fluctuaciones, pero esto es comprensible debido a que se está analizando el proceso completo de formación.

Por otro lado, la coordenada Y va ascendiendo durante todo el proceso, diferenciándose en dos etapas claras. En la primera, la ascensión se produce de forma relajada, hasta llegar a la inflexión, donde se produce un rápido retroceso de la interfase y la burbuja asciende rápidamente, hasta llegar al desprendimiento, es el último punto, donde la burbuja se aleja notoriamente del disco orificio.

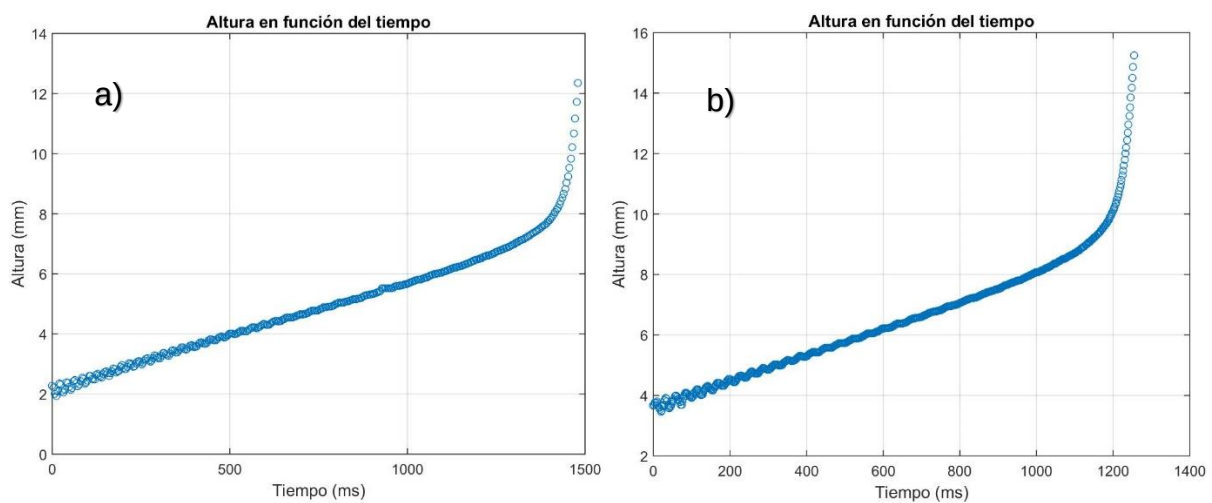
Se debe destacar que estas gráficas junto a la variación de la altura, el radio equivalente y el diámetro de la base respecto del tiempo (se exponen en los siguientes

apartados), son comparables con el estudio realizado por M. Lebon et al. [21]. En este caso, del movimiento del centroide, el comportamiento es el mismo.



Gráfica 14. Movimiento del centroide de la burbuja vs tiempo, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

5.1.4. Altura máxima de la burbuja

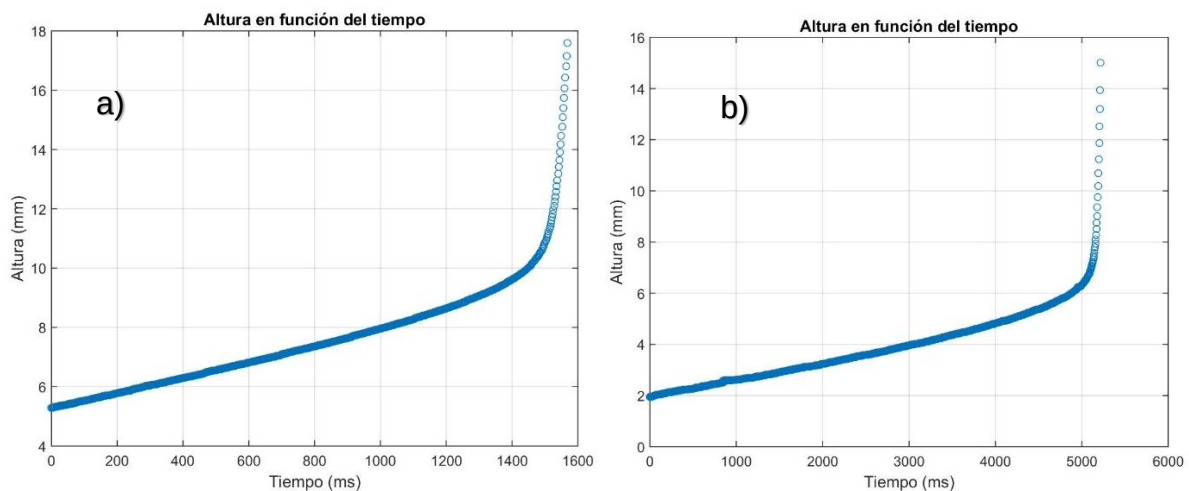


Gráfica 15. Altura máxima de la burbuja vs tiempo, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).

Al igual que sucede con las gráficas del centroide, la representación de la altura máxima de la burbuja respecto del tiempo es semejante en todas las superficies. Excepto, por el valor inicial y máximo conseguidos para cada superficie, esto se debe a los distintos tamaños de las superficies.

Como se puede ver, la altura máxima tiene un comportamiento muy parecido al de la coordenada Y del centroide. Teniendo una primera etapa, de crecimiento casi lineal y una segunda, de rápido crecimiento.

Se alcanzan dimensiones mayores que en el centroide, ya que el punto más alto se encuentra a una cierta distancia del centroide. Además, el ascenso es menos brusco que en el centroide, debido a la formación del cuello, que hace que el centroide ascienda rápidamente a la parte superior de la burbuja.



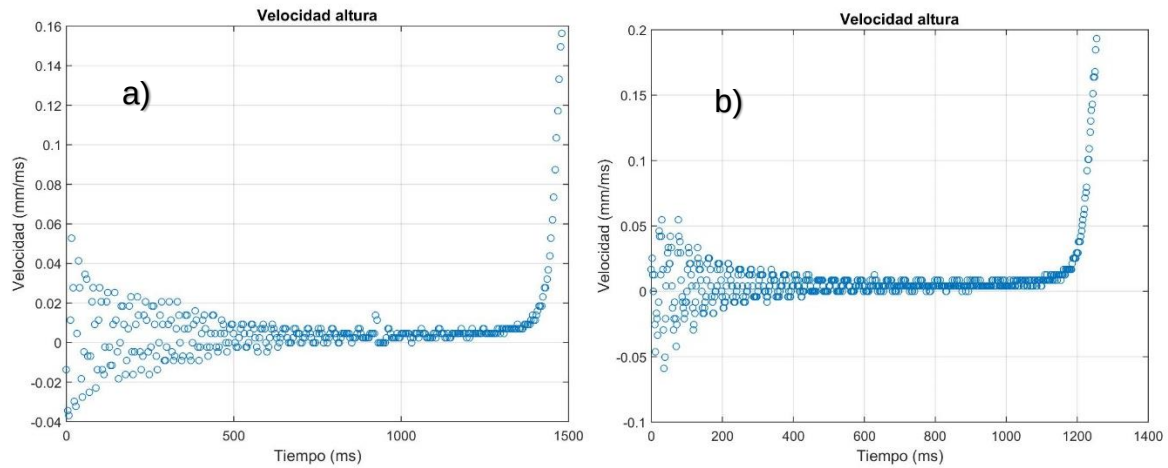
Gráfica 16. Altura máxima de la burbuja vs tiempo, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

5.1.5. Velocidad de la altura máxima de la burbuja

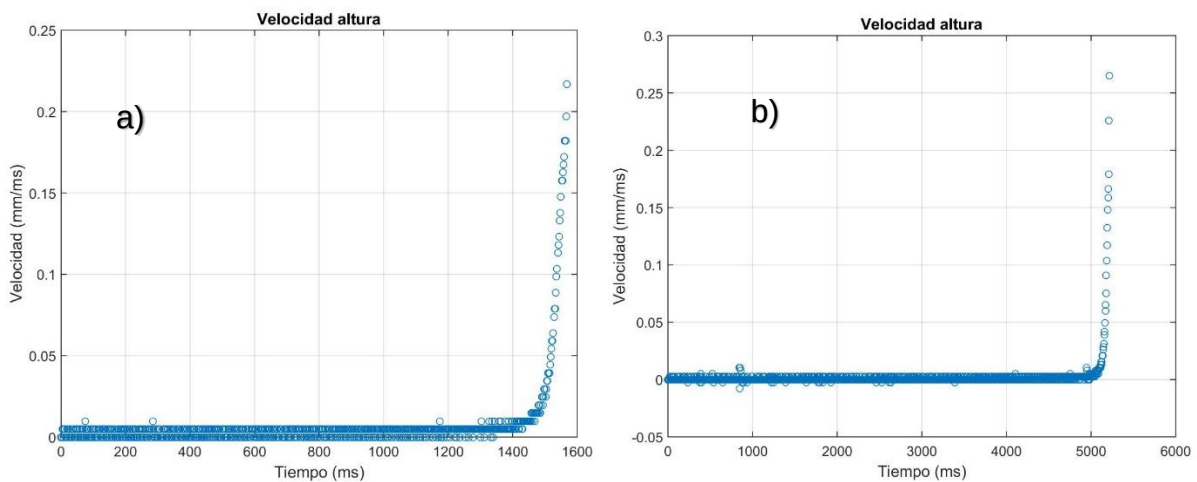
Se comentan de forma general las gráficas de velocidad de la altura máxima, debido a que, al tener una resolución temporal tan amplia, el error cometido al realizar la derivación numérica es muy grande, ya que existen muchos valores parecidos.

Como es de esperar, la velocidad comienza a crecer justo en el momento en que se produce el retroceso de la entrefase y la burbuja comienza a elongarse, siendo constante y cero durante gran parte del proceso de formación. Aunque este valor de cero está distorsionado por el error numérico.

La aceleración no se incluye por el gran error numérico cometido al realizar una segunda derivación de los datos.



Gráfica 17. Velocidad de la altura máxima de la burbuja, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).



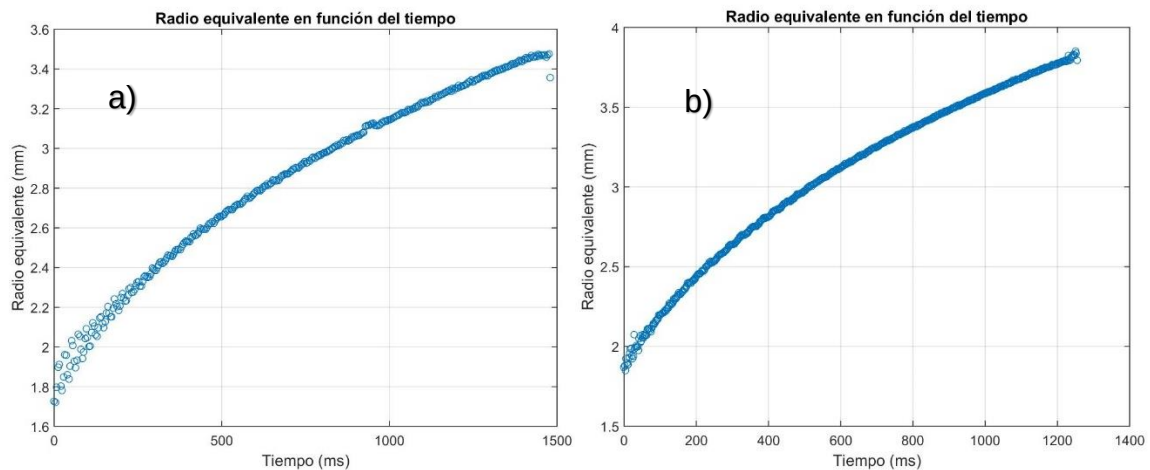
Gráfica 18. Velocidad de la altura máxima de la burbuja, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

5.1.6. Radio equivalente

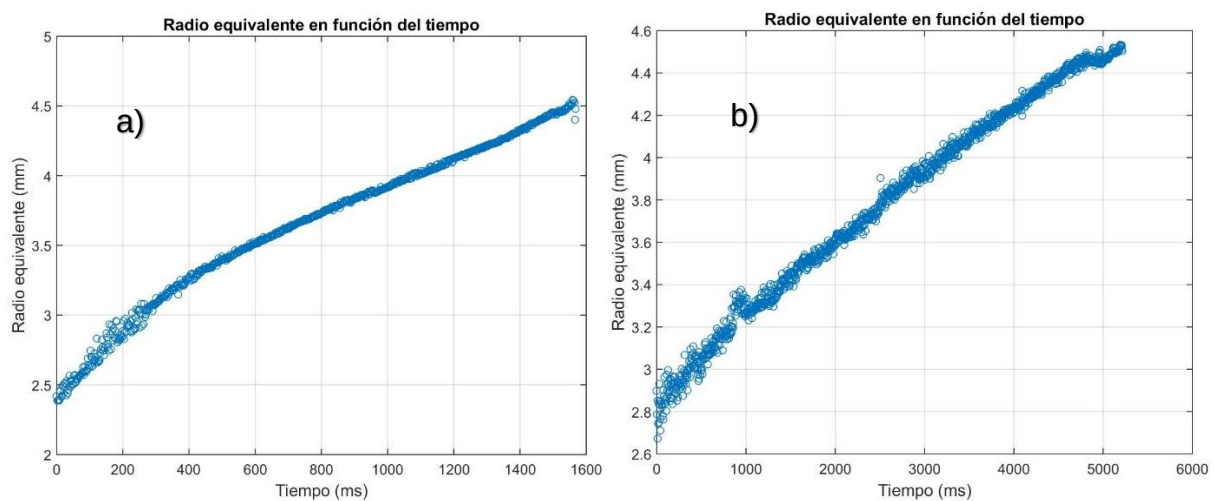
Al igual que ocurre en el centroide y en la altura de la burbuja, se puede asegurar que el comportamiento del radio equivalente en todas las superficies sigue un patrón semejante, realizando un crecimiento, según lo que se podría caracterizar como una parábola o una línea recta. Se destaca que, a diferencia de estos parámetros analizados, el radio equivalente no tiene cambios bruscos en su crecimiento, lo que nos indica que el crecimiento del volumen es lineal, como ya se había comprobado en el inicio del análisis de los resultados. Simplemente, el radio equivalente es un parámetro derivado del volumen multiplicado por una constante, que surge de despejar el radio de una esfera.

Además, el comportamiento es semejante al estudio de investigación en la referencia [21].

Recordando las tablas analizadas anteriormente, se encontrarán las diferencias en el radio equivalente entre las distintas superficies.



Gráfica 19. Radio equivalente de la burbuja asumiendo esferoidización, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).

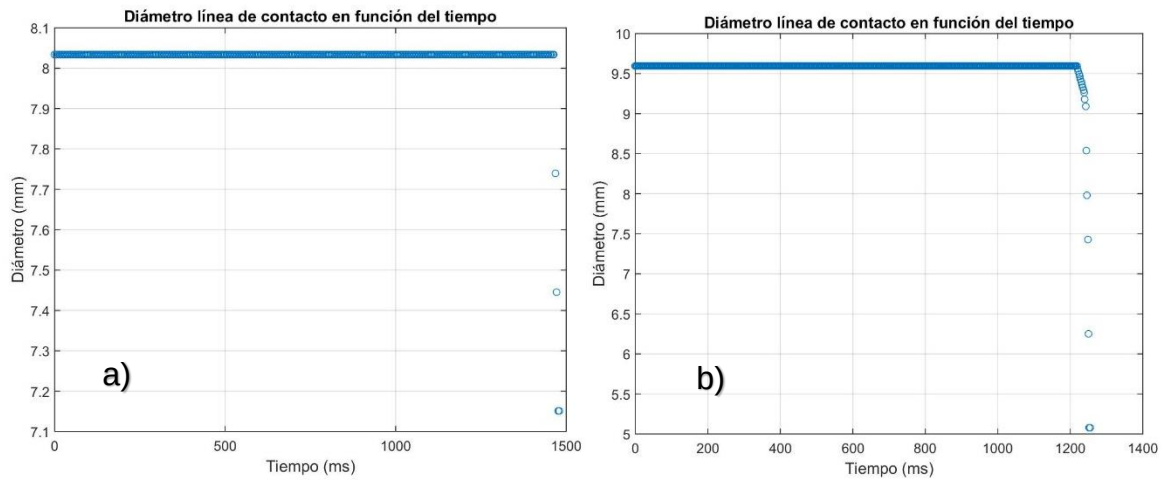


Gráfica 20. Radio equivalente de la burbuja asumiendo esferoidización, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

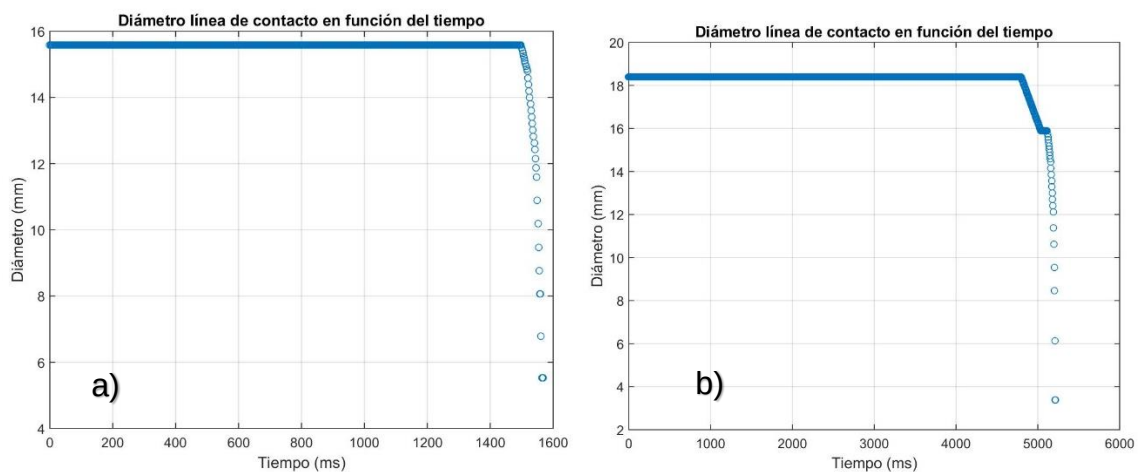
5.1.7. Diámetro de la base de la burbuja

Estas gráficas se exponen con cierta precaución, por ello se presentan juntas. Esto se debe a que, realmente, esta gráfica se ha creado manualmente y no ha sido fruto del código, como resultado automático. Dicho código requiere de la intervención del usuario para señalar en el vídeo y estudiar el movimiento de los puntos señalados,

para ello se han realizado ampliaciones en las imágenes. Con la resolución o escala que se tenía en ellas, los puntos señalados coinciden a la perfección con los límites reales de la burbuja.



Gráfica 21. Dinámica de la línea de contacto (impuesta manualmente), diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).



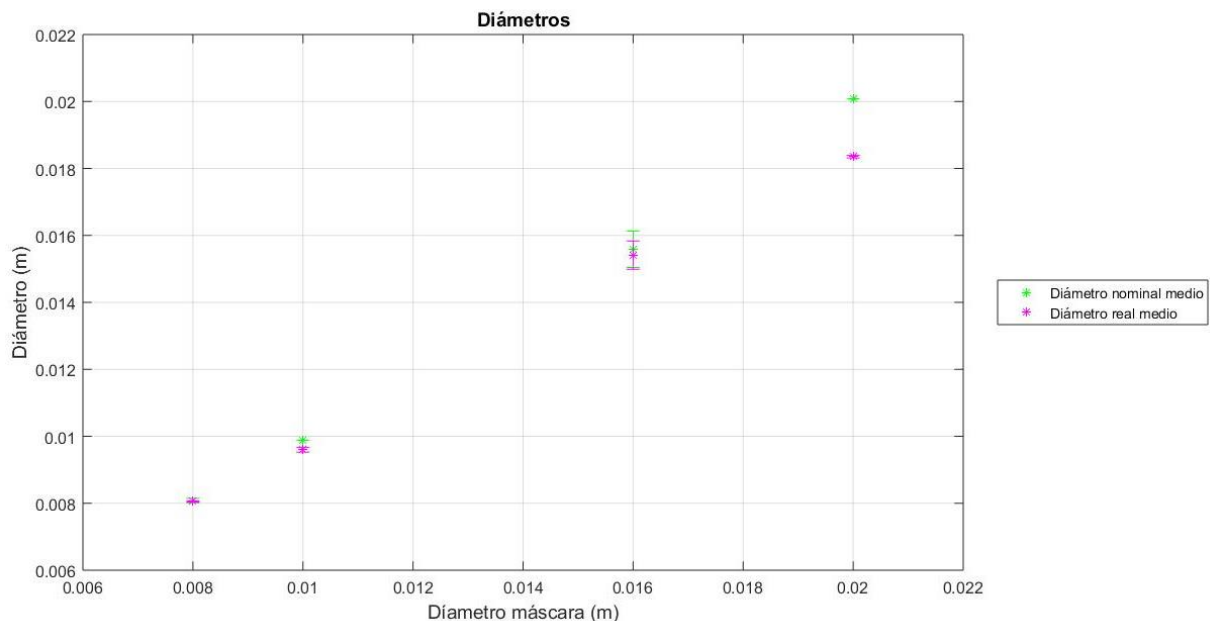
Gráfica 22. Dinámica de la línea de contacto (impuesta manualmente), diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

Comentando los datos obtenidos, se puede destacar que la línea de contacto no se mueve durante gran parte del proceso de formación (esta información se complementará con los datos obtenidos del análisis del detalle) y, sino que, solo en la parte final, se produce el retroceso de la línea de contacto en dirección al orificio, hasta que ocurre el desprendimiento o pinch-off.

5.1.8.Comparación entre superficies

En este último punto del análisis de resultados de los vídeos de la burbuja completa, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en las distintas superficies, mediante el cálculo de valores medios y su desviación típica. La desviación típica se utiliza para comprobar que los valores medios calculados son representativos de los resultados. Su valor debe ser muy inferior al valor medio calculado ya que, al tener las mismas unidades, representa el rango en que el valor medio puede variar. Por ello, la desviación típica se utiliza para incluir barras de error en las gráficas. Las gráficas siguientes incluyen estas barras de error.

Se debe destacar que, realmente, la desviación típica no es una medida del error. En nuestro caso se usa como tal, debido a que su valor es superior al cometido debido al error en la medición y su posterior propagación en las fórmulas utilizadas, se incluye una tabla final, con esa comparación en el volumen.

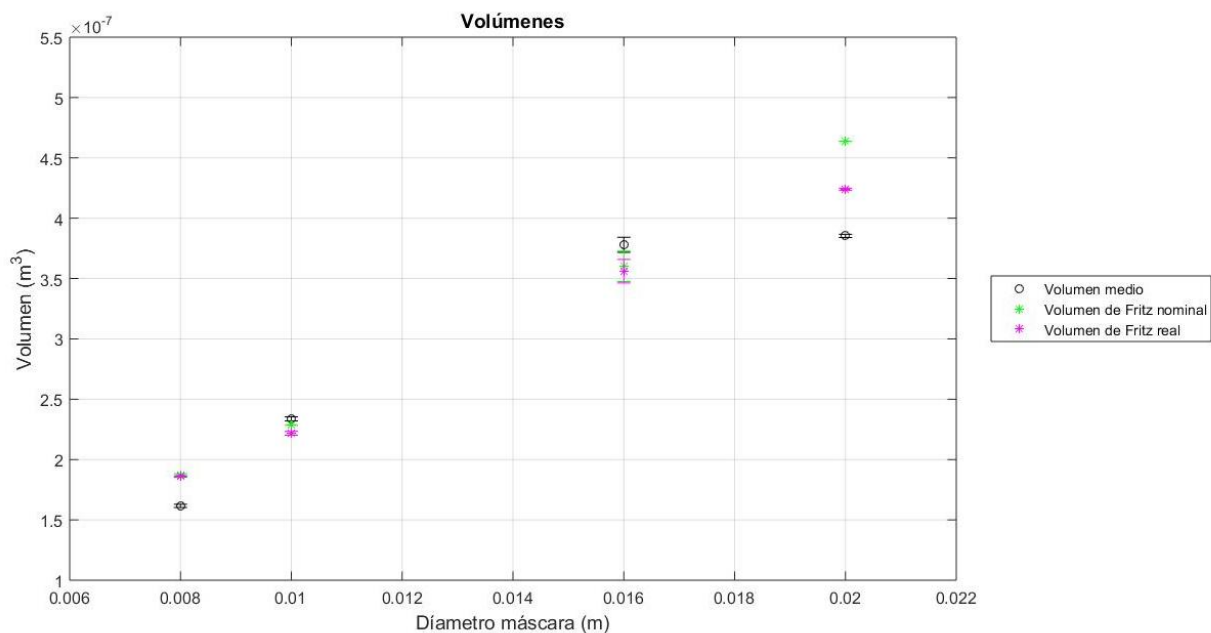


Gráfica 23. Diámetros medios y su desviación con barras de error.

La Gráfica 23, representa la comparación entre el diámetro de la superficie hidrofóbica real y el diámetro que ocupa la base de la burbuja. Si se realiza la ampliación del documento, se comprueba que el diámetro de la base (representado por los puntos rosas) siempre está por debajo del diámetro de la superficie (puntos verdes), por lo que nunca se consigue rellenar al completo la superficie. Eso es un

indicador de la pérdida de hidrofobia en el filo de la superficie. Se deben destacar, tanto la superficie de 8 mm como la de 20 mm, una por superposición de los puntos y la otra, por ser en la que más alejados se encuentran. En la superficie de 8 mm, los puntos se encuentran superpuestos debido a que, por su menor tamaño, generar la superficie es mucho más fácil y al aire le cuesta menos redistribuirse por la misma. Por otro lado, como ya se dijo, en la superficie de 20 mm se ha encontrado el límite del efecto del producto Neverwet, no pudiéndose generar una superficie mayor a 18 mm y que funcione en toda su amplitud.

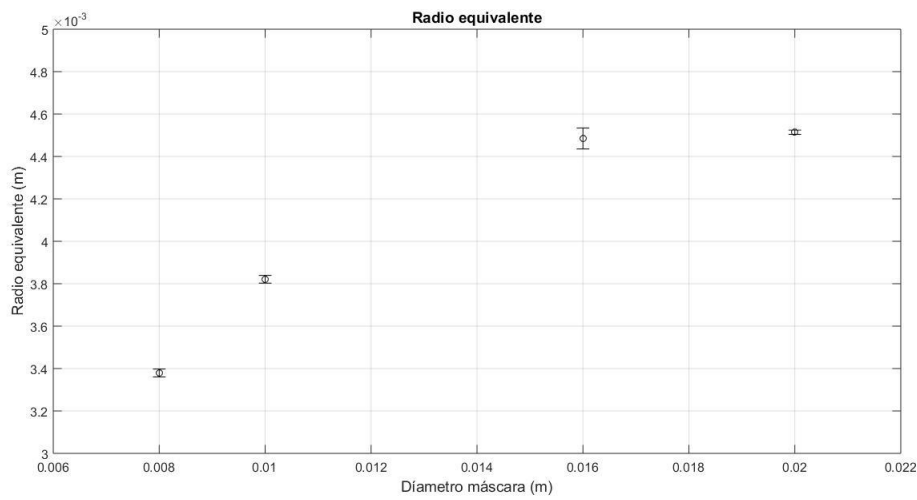
También se puede destacar que, en el diámetro de la base, las barras de error son inapreciables, lo que significa la uniformidad de los resultados obtenidos y su precisión. En las tablas posteriores se verán los valores.



Gráfica 24. Volúmenes medios y su desviación con barras de error.

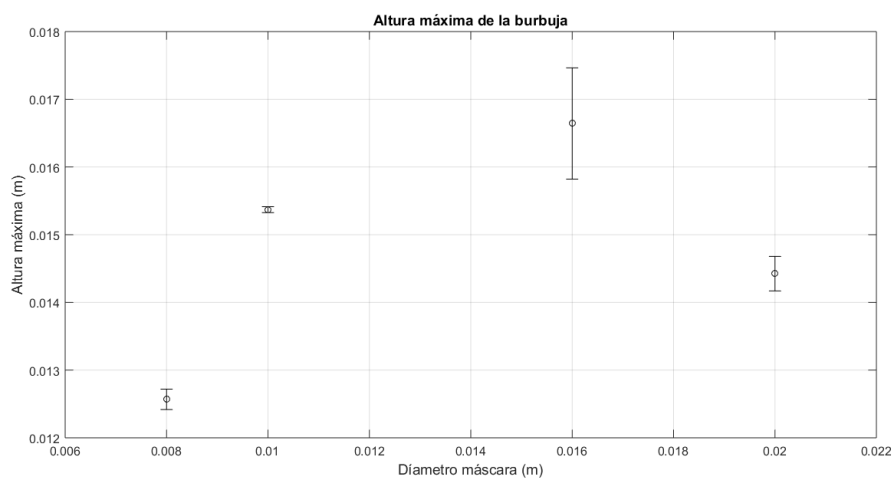
En la Gráfica 24, se puede observar, quizá el dato más importante obtenido, el volumen medio final en el desprendimiento y el volumen de Fritz calculado con el diámetro de la base de la burbuja y de la superficie. Aquí se demuestra, que existe cierta semejanza entre el volumen final y el volumen de Fritz, pero nunca coinciden. Se observa que, en la superficie de 10 y 16 mm, el volumen final es próximo al de Fritz, aunque superior. Sin embargo, tanto en la superficie de 8 mm, como en la de 20 mm, la separación es mayor y el volumen final es inferior al de Fritz (por diferentes

motivos, ya señalados). Aparte de indicar que las barras de error calculadas con la desviación típica son prácticamente inexistentes y, por tanto, se manifiesta una vez más la bondad de los resultados; se debe señalar que, como era de esperar, conforme la superficie hidrofóbica aumenta de tamaño, la burbuja también lo hace, viéndose un crecimiento proporcional en 8, 10 y 16 mm y un parón en la de 20 mm, que como se ha expuesto en numerosas ocasiones, se debe a que la burbuja no alcanza esos 20 mm, en su crecimiento radial en la base.



Gráfica 25. Radios equivalentes medios y desviaciones con barras de error.

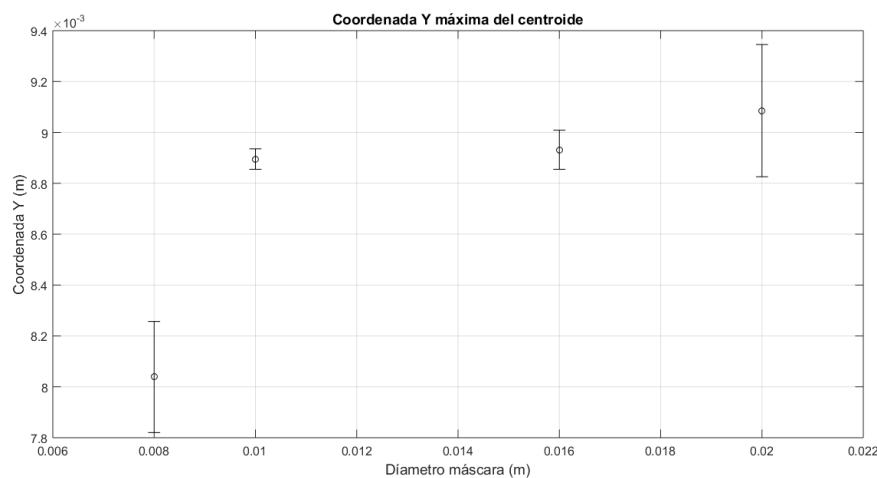
Se señala lo mismo que para el diámetro y volúmenes. Aumento del radio equivalente, conforme aumenta la superficie y precisión de los resultados obtenidos por el pequeño tamaño de las barras de error.



Gráfica 26. Alturas máximas medias y desviaciones típicas.

En la gráfica anterior, se recoge una comparación entre las distintas alturas máximas alcanzadas por la burbuja para todas las superficies. Como en las gráficas del diámetro, volumen y radio equivalente, se incluyen los valores medios y para la generación de las barras de error, se usan las desviaciones típicas de estos valores. Sin embargo, en este caso los valores tienen un error mucho mayor, destacando la superficie de 16 mm, aunque se debe destacar, que este gran error solo existe visualmente. Realmente, los valores de las desviaciones típicas respecto del valor medio, representan un tanto por ciento muy pequeño. Esto se verá en las tablas posteriores a estas gráficas.

Se puede observar que, la altura máxima aumenta con el aumento de la superficie de Neverwet. Aunque en el caso de 20 mm, la altura máxima alcanzada queda por debajo de la alcanzada en las superficies de 10 y 16 mm, lo que demuestra una vez más que, en la superficie de 20 mm, el proceso no está controlado y no se está rellenando dicho diámetro al completo.



Gráfica 27. Coordenadas Y del centroide medias y desviaciones típicas.

Como en todas las gráficas anteriores de este apartado, se recoge el valor medio, para cada superficie, de la coordenada Y máxima del centroide y su desviación típica en forma de barras de error. A través de los ejes, se puede observar que la altura alcanzada por el centroide es menor, que la altura máxima de la burbuja. Esto se debe, como ya se ha explicado, a que entre la altura y el centroide siempre hay una cierta diferencia, si la burbuja fuera totalmente esférica, sería igual al radio de la burbuja. En esta gráfica, las barras de error tienen cierto tamaño en la superficies de

8 y 20 mm, aunque se demostrará que el error no es tan grande respecto al valor de la dimensión. Además, se debe destacar que no se ha podido descartar ningún valor de la media para mejorar las dispersión de los valores, porque sería incoherente con el resto de gráficas, donde los máximos errores se dan en otras superficies. A diferencia del resto de gráficas, hay un aumento de la posición máxima, conforme aumenta la superficie, aunque en las superficies de 10, 16 y 20 mm, los valores son muy próximos.

	Diámetro superficie (m)	Desviación típica (m)	Diámetro base (m)	Desviación típica (m)
8 mm	8.08e-03	7e-05	8.055e-03	1.7e-05
10 mm	9.89e-03	-----	9.60e-03	7e-05
16 mm	1.56e-02	5e-04	1.54e-02	4e-04
20 mm	2.01e-02	-----	1.835e-02	4e-05

Tabla 18. Comparación diámetro superficie y de la base de la burbuja medios y sus desviaciones típicas.

En la Tabla 18, se demuestra el valor pequeño de la desviación típica, siendo del orden de 0.07 mm en todos los casos, excepto en la superficie de 16 mm que es de 0.5 mm. Lo que se puede asegurar es muy pequeño, ya que los diámetros superan los 8 mm (error relativo inferior al 1 %).

	Radio equivalente (m)	Desviación típica (m)	Altura máxima (m)	Desviación típica (m)	Coor. Y centroide (m)	Desviación típica (m)
8 mm	3.379e-03	1.9e-05	1.26e-02	3e-04	8.1e-03	4e-04
10 mm	3.821e-03	1.8e-05	1.537e-02	9e-05	8.89e-03	8e-05
16 mm	4.49e-03	5e-05	1.66e-02	1.6e-03	8.9e-03	1.5e-04
20 mm	4.51e-03	1.004e-05	1.44e-02	5e-04	9.1e-03	5e-04

Tabla 19. Comparación radio equivalente, altura máxima y coordenada Y del centroide medias y sus desviaciones típicas.

En la Tabla 19, se comprueban las desviaciones típicas mínimas del radio equivalente, siendo inferiores a 0.05 mm, lo que demuestra la precisión de los datos. Sin embargo, en casi todas las superficies, las desviaciones tanto de la altura máxima, como del centroide, son mayores. Destacando, el valor de la superficie de 16 mm,

donde la desviación típica de la altura máxima es 1.64 mm, en el resto son inferiores a 0.5 mm, lo que sí son valores pequeños. Este valor tan grande se puede entender viendo la mayoría del resto de propiedades, donde la superficie de 16 mm tiene la mayor desviación.

Sin embargo, aunque es cierto que las desviaciones son mayores que para otras propiedades y, visualmente en las gráficas, las barras de error tienen un gran tamaño, se debe estudiar la magnitud real de los errores, comparándolos con el valor de la propiedad a la que representan. Es decir, cogiendo el valor máximo de la desviación típica, que se da en la altura máxima de la superficie de 16 mm, tiene un valor de 1.64 mm y la altura es de 16.64 mm, si se valora, uno respecto del otro en tanto por ciento, la desviación típica representa un 9.86 % del valor medio. Esto en valores experimentales está totalmente aceptado. Otro ejemplo podría ser la desviación típica de la coordenada Y del centroide en la superficie de 20 mm, que tiene un valor de 0.52 mm, respecto del valor medio de 9.1 mm, representa un tanto por ciento de 5.7, también muy pequeño.

	Volumen (m ³)	Desviación típica (m ³)	Volumen de Fritz nominal (m ³)	Desviación típica (m ³)	Volumen de Fritz real (m ³)	Desviación típica (m ³)
8 mm	1.62e-07	3e-09	1.867e-07	1.5e-09	1.861e-07	4e-10
10 mm	2.34e-07	3e-09	2.284e-07	-----	2.217e-07	1.6e-09
16 mm	3.78e-07	1.3e-08	3.60e-07	1.3e-08	3.6e-07	1e-08
20 mm	3.85e-07	3e-09	4.64e-07	-----	4.240e-07	9e-10

Tabla 20. Comparación volumen, volumen de Fritz nominal y volumen de Fritz real medios y desviaciones típicas.

Representando en la Tabla 20, los volúmenes, se observa que la desviación típica o error cometido es del orden de 1 mm³, lo que, comparado con los volúmenes de las burbujas que superan los 150 mm³, es un error o dispersión muy pequeña (menos de un 1 % de error relativo) en unos resultados experimentales. Aunque en las gráficas se pueden visualizar estos datos, aquí se tiene el valor exacto.

	Desviación típica (m ³)	Error de propagación (m ³)
8 mm	2.6782e-09	2.6509e-09
10 mm	3.3127e-09	3.0881e-09
16 mm	1.2465e-08	4.9503e-09
20 mm	2.5696e-09	5.3225e-09

Tabla 21. Comparación entre la desviación típica y el error cometido.

Para poder asegurar el uso de la desviación típica como una medida del error de los resultados, se debe comparar con el error propagado en la fórmula del volumen, debido a la medición manual de la escala en una imagen. Se asume que, durante la calibración, se ha podido cometer como máximo un píxel de error, aunque la calibración se realiza con una gran distancia y diez veces. Usando la fórmula siguiente se puede obtener el error propagado:

$$\Delta V = 4 \pi R^2 \Delta R$$

ΔV Error en el volumen

ΔR Error cometido al medir una distancia

R Radio equivalente de una burbuja, ya que se usa la fórmula del volumen de la esfera.

5.2. Borde de la burbuja en la base

La segunda parte de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, se centra en obtener la dinámica de la línea de contacto y la histéresis del ángulo de contacto, es decir, se ha obtenido la variación del ángulo con el tiempo, la variación del radio de la base de la burbuja y la velocidad del mismo.

Para obtener los datos comentados, se han tenido que realizar una serie de interpolaciones o aproximaciones sobre los puntos detectados como contorno. No es tan fácil como en el apartado anterior, en el que se tenía un contorno, que se iba modificando. En este caso, el contorno es detectado mediante un proceso ideado (no con funciones) y la unión de los puntos para formar un contorno no es posible, ya que tienen una gran dispersión. Además, para obtener el ángulo, se necesita una línea recta de la que se conoce la pendiente, por tanto, la tangente del ángulo de contacto.

Inicialmente, no se conoce si una interpolación lineal de los puntos es lo más recomendable para ajustarse a la forma de la burbuja, ya que cabría la posibilidad de una interpolación de segundo grado que permite cierta curvatura. Por otro lado, tampoco se conoce cuántos puntos de los detectados formarán una interpolación que se ajuste mejor al contorno de la burbuja. Por tanto, antes de realizar los cálculos, se debe realizar un estudio de sensibilidad, es decir, investigar el número de puntos recomendable para realizar las interpolaciones y el tipo de las mismas que conviene más.

En el apartado 5.2.1, se verán las distintas posibilidades estudiadas y de las que se obtienen los mismos datos. Para comentar el estudio de sensibilidad realizado, se señalará el número de puntos usados y el tipo de interpolación realizada. Estando todo caracterizado por un color exclusivo, que serán los que se muestren tanto en las imágenes de detección de contornos, como en las gráficas introductorias para la elección de la mejor opción.

- Los puntos totales detectados, se representan en color blanco.
- Los puntos depurados (usados para el análisis), se representan en color amarillo.
- Interpolación de primer orden con todos los puntos depurados, se representa en color azul oscuro.
- Interpolación de segundo orden con todos los puntos depurados, se representa en color amarillo.
- Interpolación de primer orden con los últimos 20 puntos depurados, se representa en color azul claro (cian).
- Interpolación de primer orden con los últimos 10 puntos depurados, se representa en color morado (magenta).
- Interpolación de primer orden con los últimos 5 puntos de la interpolación de segundo grado, se representa en color verde claro. Esta última representación, se realiza para poder obtener el ángulo de contacto de la interpolación de segundo grado, ya que de una parábola no es posible.

En primer lugar, se presenta el ajuste de cada interpolación y se podrá intuir cuál es la que posee un mejor ajuste. Pero también, se mostrarán los resultados que proporciona cada ajuste, para que la toma de decisiones sea con más información.

En adelante, se comentarán los resultados según los colores de las interpolaciones, para facilitar el desarrollo literario.

Como ya se dijo en la introducción al apartado de resultados, debido a la ingente cantidad de datos en forma de gráficas y archivos recopilada, se tiene que hacer una selección en cada superficie y así, no producir un crecimiento excesivo de estas páginas. Se quiere remarcar que, para la superficie de 10 mm, se han realizado un total de seis casos, obteniendo resultados válidos de todos y en la superficie de 16 mm, se han analizado un total de siete casos de los que han resultado válidos seis. En la superficie de 8 y 20 mm, se han analizado cuatro casos, como en los resultados de la burbuja completa.

5.2.1. Contorno detectado

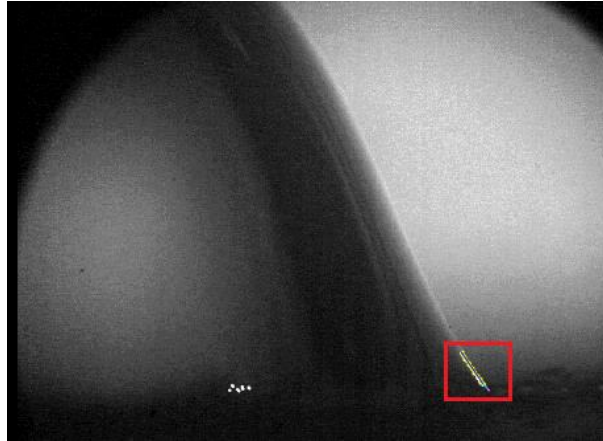


Figura 34. Imágenes grabadas de detalle. Zona que se muestra ampliada en la Figura 35.

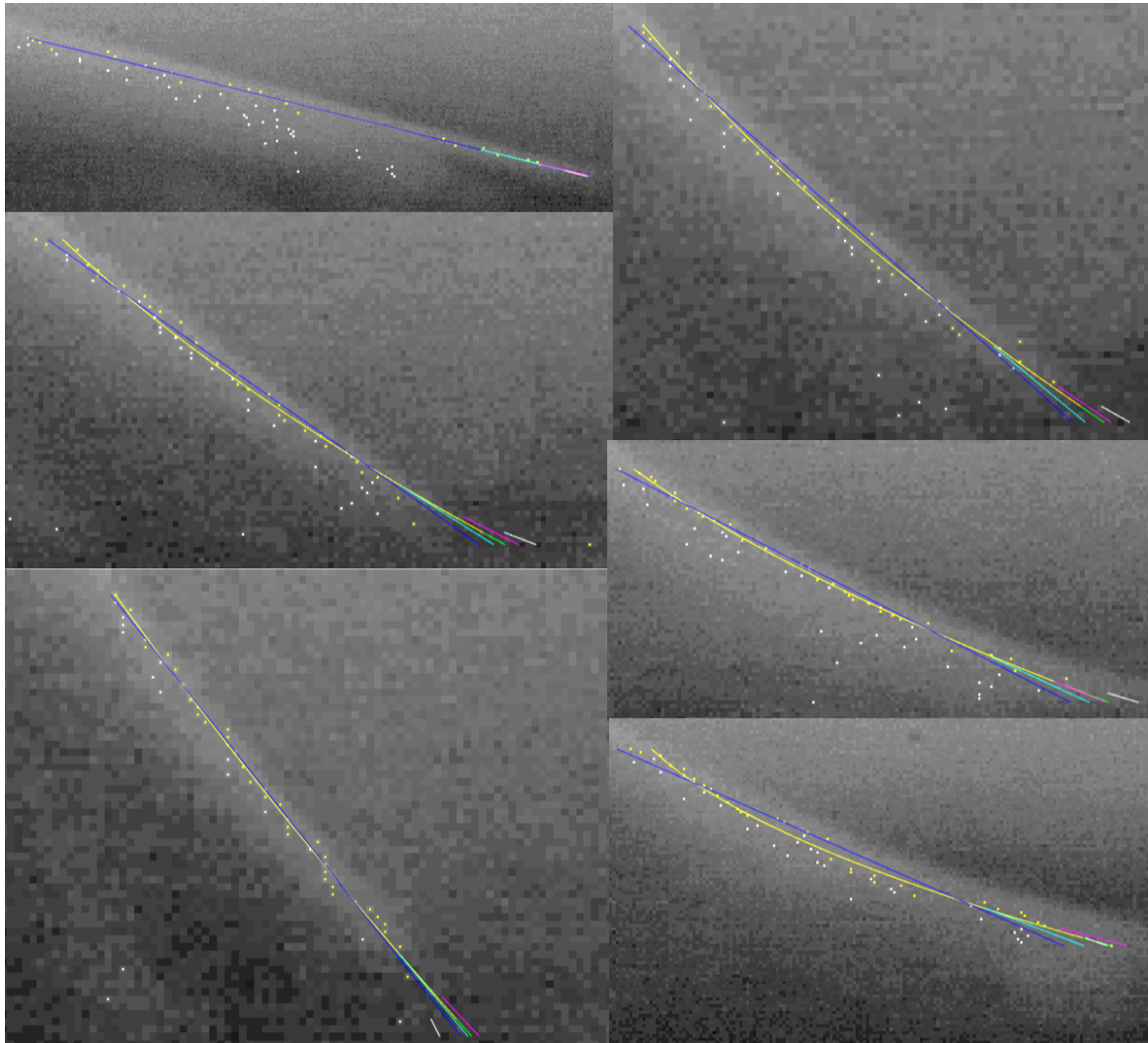


Figura 35. Puntos detectados e interpolaciones realizadas en varias etapas. (Diámetro 10 mm)

En la Figura 35, que ordenada va de arriba hacia abajo, en la izquierda y luego en la derecha, se observan distintos ajustes de los puntos e interpolaciones a la forma de la burbuja. Realmente, la imagen utilizada para la detección abarca un campo de visión mayor, como puede verse en la Figura 34, sin embargo, para poder visualizar las distintas curvas realizadas, se ha tenido que realizar un gran zoom en las imágenes. Dicha zona ampliada para generar la Figura 35, se ha marcado en la Figura 34. A pesar de esto, es difícil distinguir las diferencias entre las interpolaciones. Se debe señalar que el borde de la burbuja es la zona más clara de la imagen.

Ampliando esta página, se pueden observar ciertas diferencias en las interpolaciones, la línea blanca y magenta (se remite a la descripción detalla al principio del apartado), al usar menos puntos, se alejan más del borde de la burbuja. Por tanto, nos quedan como posibilidades la línea azul oscuro, la línea azul claro y la línea amarilla.

Las interpolaciones lineales con todos los puntos depurados y con solamente 20 puntos son muy semejantes y la validez de una u otra, se determinará en los resultados. Se adelanta que ya en el código, se tuvo que solucionar el problema que ocurre cuando los puntos totales depurados son menores que 20, en ese caso se repite el valor anterior. Esto deja claro, que la validez de la curva azul oscuro es mayor.

Comparando la interpolación lineal con la de segundo grado, no se podría decir cuál tiene un mejor ajuste, a priori. Sin embargo, debido a que una interpolación de segundo grado siempre se va a ajustar mejor a los puntos, puede suceder que, si estos están muy dispersos, la parábola tome una gran curvatura, alejándose del borde de la burbuja. Esto se puede intuir en la última imagen de la Figura 35, pero en otros casos es mucho más acusado.

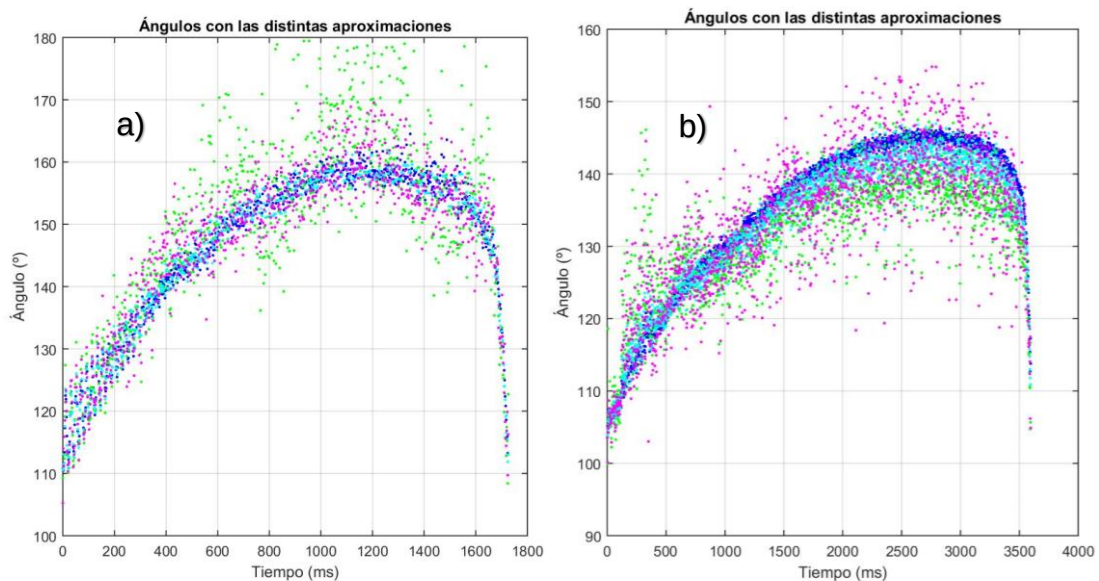
Como conclusión, se puede establecer con la información obtenida durante el desarrollo del código y la comprobación visual de la aplicación del mismo al vídeo, que la línea azul oscuro será la que mejor se ajuste a la burbuja y proporcione los resultados con una menor dispersión.

5.2.2. Ángulo

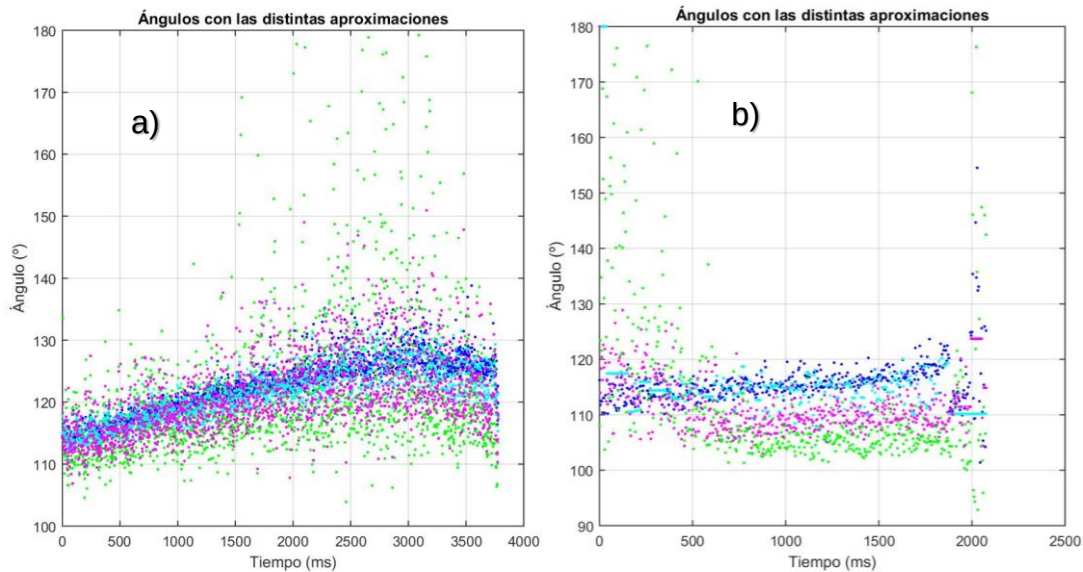
En primer lugar, para el estudio de sensibilidad realizado con los resultados del ángulo, se presentan las siguientes gráficas. La gama de colores que se tiene en las mismas representa las interpolaciones anteriormente enumeradas. El ángulo se obtiene a partir de la pendiente de una interpolación lineal, siendo igual a la tangente del ángulo de la burbuja. Se mide en la parte exterior de la burbuja, como se indicó en el esquema del problema.

Esta variable será la que mejor permita realizar el estudio de sensibilidad, ya que se produce una gran dispersión general, existiendo alguna de las interpolaciones con una un poco inferior, que destacará a primera vista.

Este apartado se centrará en el estudio de sensibilidad y no en valores máximos o comportamientos.



Gráfica 28. Ángulos con las distintas interpolaciones, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).



Gráfica 29. Ángulos con las distintas interpolaciones, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

Lo más destacable, a simple vista, aunque se hablará más detenidamente sobre ello, es la semejanza entre los resultados de 8 y 10 mm y entre los de 16 y 20 mm.

Ha sido muy gratificante obtener unos datos que, aunque muy dispersos, muestran un comportamiento claro de un parámetro que no ha sido muy estudiado en las investigaciones de este campo. En las investigaciones realizadas [6,7,8,21,22], la resolución temporal usada es mínima.

En cuanto al estudio de sensibilidad, se puede ver, claramente, que como ya se había adelantado, la interpolación lineal con todos los puntos depurados (color azul oscuro) es la que tiene una dispersión menor, coincidiendo en numerosas ocasiones con la interpolación lineal de los últimos 20 puntos depurados (cian). Esto se debe a que cuanto mayor sea el número de puntos seleccionados, se van a producir menos variaciones o movimientos en la línea, ya que tendrán que variar un mayor número de puntos para que haga efecto sobre la regresión. Sin embargo, si existe un menor número de puntos, como en el caso de la interpolación lineal de los últimos 10 puntos (magenta), es más fácil que estos puntos varíen de una imagen a otra y la regresión se adaptará inmediatamente a ellos. Lo mismo ocurre con la interpolación de segundo grado de todos los puntos depurados (para obtener el ángulo se usa una interpolación lineal de los últimos cinco puntos), pero en este caso no por el número de puntos, sino

por ser de segundo grado y tener un grado más de libertad, que le permite adaptarse mejor a los cambios en la disposición de los puntos.

Aunque se ha dicho que existen semejanzas entre los puntos azul oscuro y cian, la interpolación lineal de 20 puntos tiene una mayor dispersión, esto se produce por la misma razón explicada anteriormente, en algunas imágenes se analizan más de 20 puntos, sin embargo, otra razón puede ser el caso contrario, cuando es imposible analizar más de 20 puntos en el borde. Los valores de la línea cian repiten el valor anterior en el que sí había 20 puntos, lo que elimina partes del movimiento del ángulo.

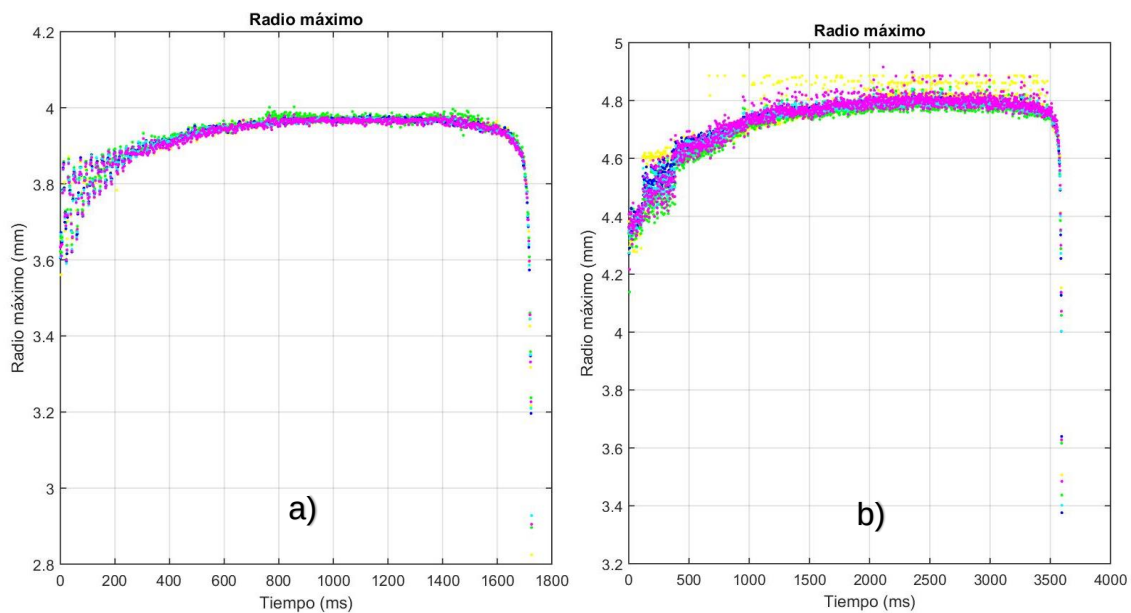
Por tanto, a través de las cuatro gráficas del ángulo, se puede asegurar que la interpolación lineal con todos los puntos depurados tiene una dispersión menor.

5.2.3. Radio máximo (radio en la base)

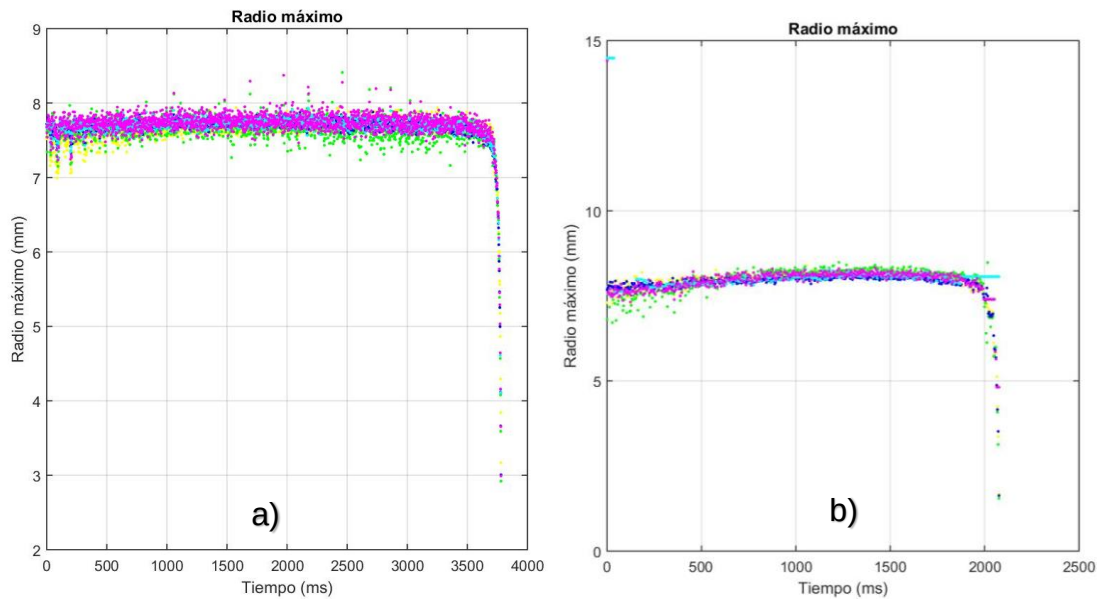
El segundo parámetro, que nos ayudará a dirimir el estudio de sensibilidad, es el radio máximo de la base de la burbuja. En estas gráficas, se han incluido los resultados obtenidos a partir de los puntos depurados, sin realizar ningún tipo de interpolación serán los datos de amarillo y los datos de color verde representarán la interpolación de segundo grado.

Antes de comentar qué interpolación es mejor, se debe explicar cómo se ha conseguido este resultado, ya que no ha sido tan fácil como extraer un punto extremo de las interpolaciones. Lo primero, sí es extraer la posición en píxeles del máximo valor (si se analiza la Figura 35) en la coordenada X de las interpolaciones. Pero para conseguir un radio, se necesita el centro de la burbuja. Para ello se tuvieron que grabar una serie de vídeos al mismo nivel de zoom (para evitar una nueva calibración), pero moviendo la cámara horizontalmente, hasta que se pueda observar al mismo tiempo el cuello de la burbuja y uno de los bordes. Por tanto, se realiza un código aparte, para analizar dos imágenes clave, la primera será el punto anterior al desprendimiento, en el que el cuello es más delgado. Suponiendo que el mismo se encuentra en el centro de la burbuja, se realiza la búsqueda del centro de dicho cuello, realizando un proceso similar al de la calibración. La segunda imagen, se debe buscar una vez se han analizado los vídeos de detalle, aunque el radio no sea el real, pero se necesita saber cuándo este parámetro se mantiene constante (lo cual sucede en algún rango de

tiempo en todas las superficies). Sabiendo la distancia entre este momento, donde se supone que la línea de contacto no se mueve (nos permite tener un mayor rango de posibilidades y menos oportunidades para cometer un error), y el desprendimiento, se puede pasar esta información al código de calibración del radio. Por tanto, con este tiempo, se puede obtener la segunda imagen a partir del desprendimiento en ese vídeo (se supone que el proceso es periódico). En esta imagen, se seleccionará el límite de la burbuja. Sabiendo el centro de la burbuja y el borde límite, se puede obtener el radio de la burbuja, en píxeles y milímetros. Esta información se pasa a los códigos de análisis, de tal forma que se conoce el radio en píxeles en un determinado punto en el que se puede obtener el centro y así referenciar el resto de datos respecto a ese mismo centro, consiguiendo el radio máximo de la burbuja para todos los instantes.



Gráfica 30. Radio máximo (en la base) para las distintas interpolaciones, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).



Gráfica 31. Radio máximo (en la base) para las distintas interpolaciones, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

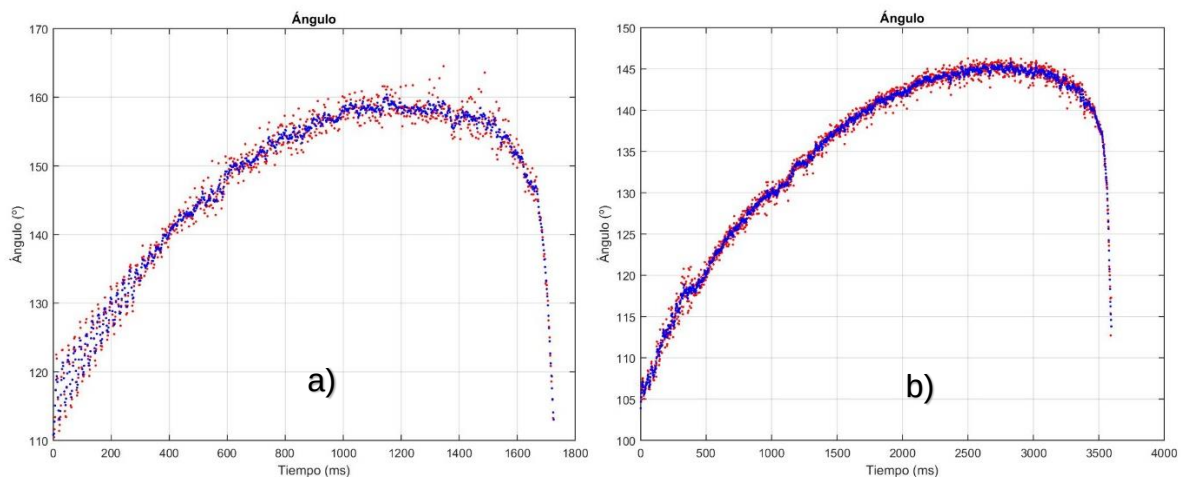
En esta ocasión, no es tan fácil decidir qué interpolación tiene una menor dispersión. Esto se debe a que los extremos de las interpolaciones no están tan diferenciados como su inclinación, además, es indicador de que la inclusión de la referencia ha sido correcta, ya que todos los datos están superpuestos. Sin embargo, excepto en la gráfica correspondiente a 8 mm, en ella todas las interpolaciones tienen un muy buen ajuste, en cada una de las otras tres se puede descartar una interpolación por su gran dispersión. En la gráfica de la superficie de 10 mm, se puede ver que los puntos depurados sin realizar ninguna interpolación tienen una gran dispersión, sobre todo en la zona donde el radio debería ser constante, además, se observa que justo en esta zona, la interpolación lineal con 10 puntos depurados sufre una gran dispersión. Por lo que ya se han descartado dos datos, quedando los datos azul oscuro, cian y verde. Pasando a la gráfica de 16 mm, se tiene que la interpolación de segundo grado con todos los puntos depurados sufre una gran dispersión, también en la zona donde debería ser constante. Por último, en la gráfica de 20 mm, se pueden descartar directamente los datos de la interpolación lineal con los últimos 20 puntos depurados, debido a que el ajuste automático de los ejes a los datos, que realiza Matlab, nos indica que existen puntos de color cian muy alejados del resto, además, en la zona donde comienza el retroceso de la entrefase, estos datos permanecen con un valor constante. Este gran error se debe a que, en el análisis de estos vídeos, debido a la dificultad que entrañaban las imágenes de la superficie de 20 mm, en la

mayoría de las mismas era imposible conseguir detectar más de 20 puntos que estuvieran sobre el borde de la burbuja.

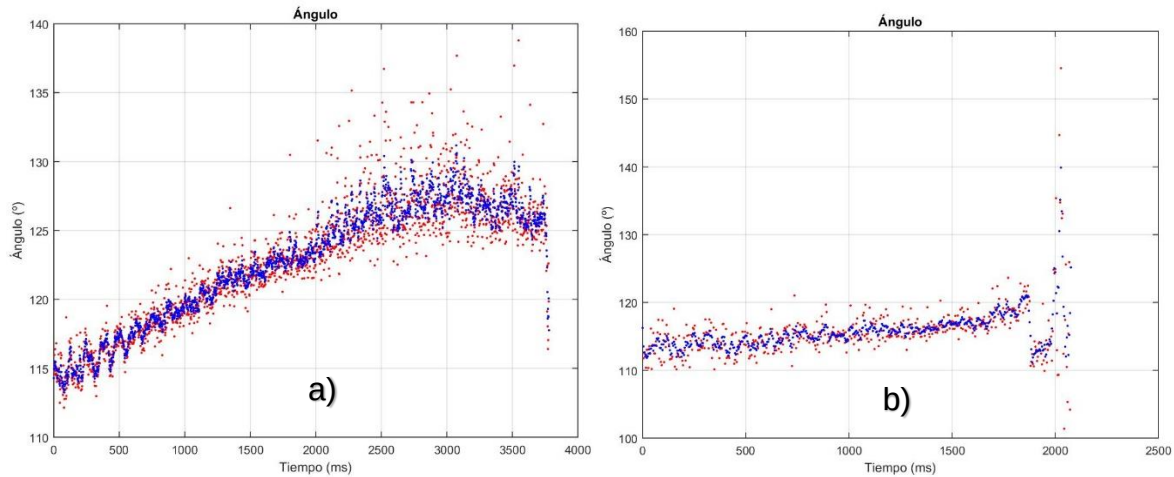
En conclusión, al igual que ocurría en la histéresis del ángulo de contacto, la dinámica de la interfase de la burbuja demuestra que el mejor tipo de ajuste y que aporta los datos con menor dispersión, es la interpolación lineal de todos los puntos depurados (color azul oscuro). En definitiva, serán estos resultados los que se mejorarán y a partir de los que se obtendrán otros datos interesantes en este tipo de análisis de detalle, con esto queda resuelto el estudio de sensibilidad.

5.2.4. Ángulo suavizado

Una vez elegido el mejor ajuste del apartado anterior, la interpolación lineal con todos los datos depurados, y aunque los resultados obtenidos tienen una dispersión mínima, algo mayor conforme la superficie es mayor, para una mejor diferenciación del comportamiento, se decide suavizar los resultados. Esto se realiza con la función *smooth*, que trabaja como un filtrado de media móvil. Existen numerosas funciones de filtrado, aunque después de realizar varias pruebas tanto con el ángulo, como con el radio, se decidió que la función *smooth* es la que proporciona mejores resultados en todo el rango de análisis. A pesar de la bondad de la función, en los análisis realizados para las superficies de 16 y 20 mm la dispersión es casi imposible de amortiguar.



Gráfica 32. Ángulo de la interpolación lineal total y suavizado, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).



Gráfica 33. Ángulo de la interpolación lineal total y suavizado, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

En la Gráfica 32 y 33, se pueden observar la variación del ángulo con el tiempo para las superficies de 8, 10, 16 y 20 mm, siendo los datos de color rojo aquellos obtenidos, directamente, del análisis del contorno (interpolación lineal de todos los puntos depurados) y los de color azul, el suavizado de los anteriores datos.

Como se puede observar, a simple vista y tal cual se han agrupado las gráficas, el comportamiento del ángulo en las superficies de 8 y 10 mm es muy semejante, describiendo las mismas etapas, sin embargo, las superficie de 16 y 20 mm tienen un comportamiento, totalmente, distinto. En las primeras, el ángulo va aumentando desde el inicio hasta llegar a un valor máximo, donde se mantiene constante durante unos milisegundos, y a continuación, vuelve a caer hasta prácticamente el valor inicial. Esto es muy semejante a lo explicado en [6,7], en los que se indicaba que, según un proceso de relajación, el ángulo tendía a su valor de equilibrio. En este caso, según el fabricante, la superficie de Neverwet tiene un ángulo de equilibrio de entre 160° y 175°, como se recoge en la gráfica del fabricante, en la Figura 36, lo que se aproxima a los valores en la cumbre de las superficies de 8 y 10 mm, siendo el máximo para 8 mm de 160° y para 10 mm de 145°, esto es muy cercano al valor inferior del rango dado por el fabricante. Un indicativo adicional de la bondad de los resultados, ya que, a pesar de estar fuera del rango, la diferencia relativa respecto a un valor medio de 167.5° es inferior al 5 % para 8 mm e inferior al 16 % para 10 mm, lo que, para unos resultados experimentales nunca antes realizados con tanta resolución temporal es un muy buen resultado. Además, si se observa el estudio [21], el comportamiento es parecido. Para comprobar los valores proporcionados por el fabricante, se decide

realizar la medición del ángulo de equilibrio. Para ello, se proporciona una imagen realizada en estudios anteriores del grupo de investigación TEP235, la imagen se muestra en la Figura 36. En esta imagen, se realiza un estudio clásico del ángulo de contacto, dejando una gota de agua sobre una superficie de Neverwet. Utilizando el programa gratuito ImageJ, se realiza la medición del ángulo. Obteniendo valores en torno a los 160° en las numerosas pruebas completadas, lo que es muy próximo al valor dado por el fabricante y al obtenido a través del código.

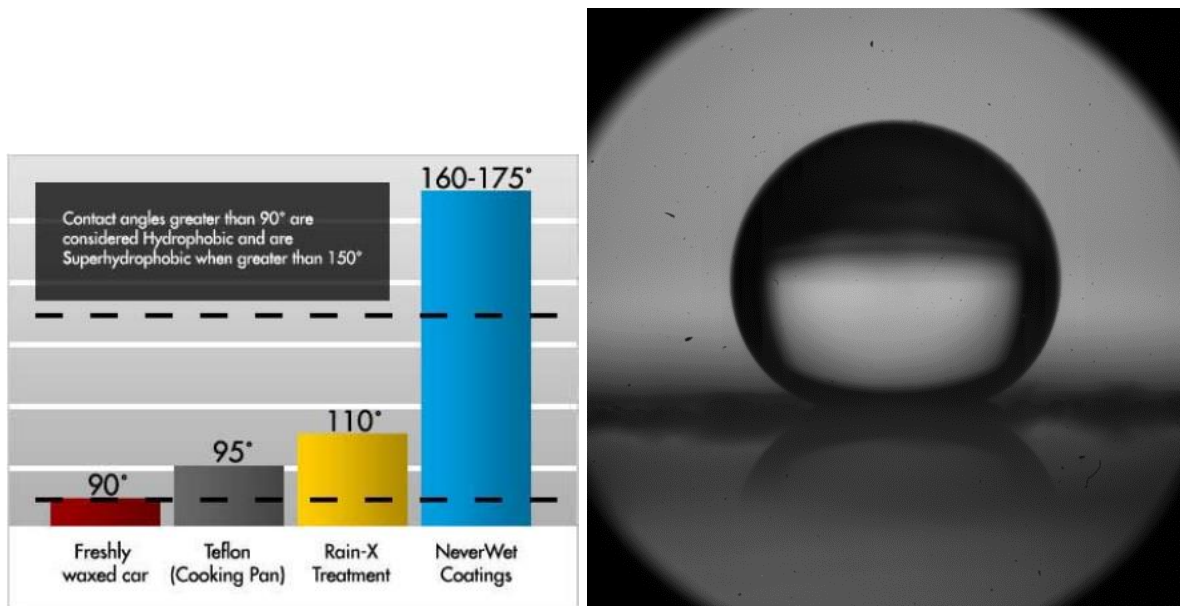


Figura 36. Datos del ángulo de contacto de equilibrio proporcionado por el fabricante, Neverwet (izquierda). Imagen proporcionada por TEP235, para la medición del ángulo de contacto de una gota de agua sobre Neverwet.

Sin embargo, en el caso de 16 y 20 mm la dispersión es muy grande, aunque se puede intuir un cierto crecimiento desde el inicio hasta que al final se produce una rápida caída, pero debido a las dificultades que se han tenido en estas últimas imágenes, esta rápida caída no tiene una gran definición.

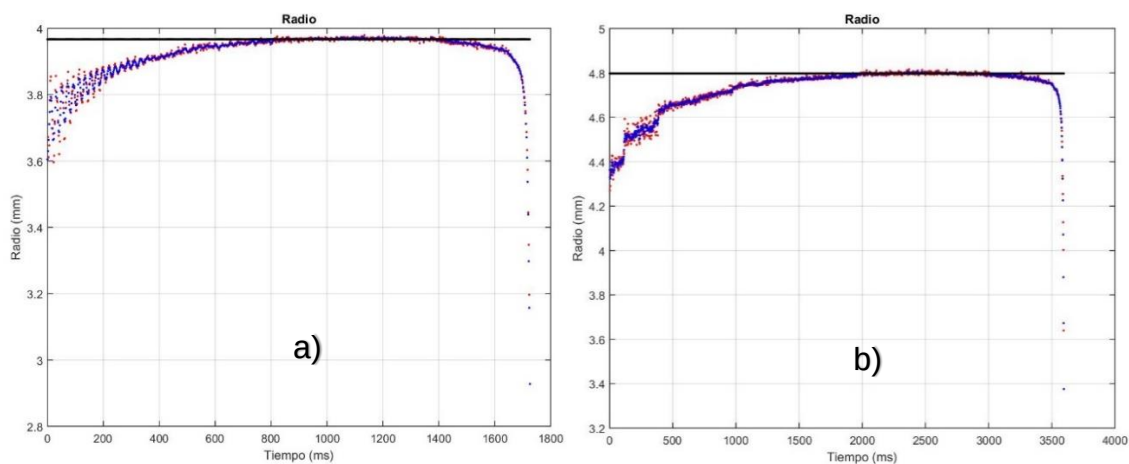
En el caso de 16 mm, se alcanza un ángulo de contacto de 130° y para 20 mm, 120° . Esto es muy contrario a lo deducido de la bibliografía, donde se nos indicaba que cuanto mayor es el ángulo, mayor es el tamaño de la burbuja. En este caso, conforme aumenta la burbuja desde la superficie de 8 mm hasta la de 20 mm (se aumenta la superficie), el ángulo va disminuyendo. Estudiando los resultados, se pueden dar tres posibles razones a este comportamiento. La dificultad para analizar las imágenes cuanto mayor es la superficie, en el caso de 20 mm fue muy costoso

poder obtener resultados, mostrándose en la gran dispersión de la gráfica, lo mismo sucede, aunque de forma más leve, en el caso de 16 mm. Otra razón puede ser que, directamente, los análisis de las superficie de 16 y 20 mm están mal efectuados, este argumento se descarta de cierta manera, por la imposibilidad de mejoría y porque se está utilizando el mismo código que para las otras dos superficies. Por último, como se ha demostrado en la superficie de 20 mm, el producto que origina la superficie hidrofóbica tiene un cierto límite, podría suceder que este límite se presente antes en el ángulo que en la superficie que es capaz de rellenar, de tal forma que, al ser la superficie mayor a 10 mm, no sea capaz de mantener un comportamiento superhidrofóbico.

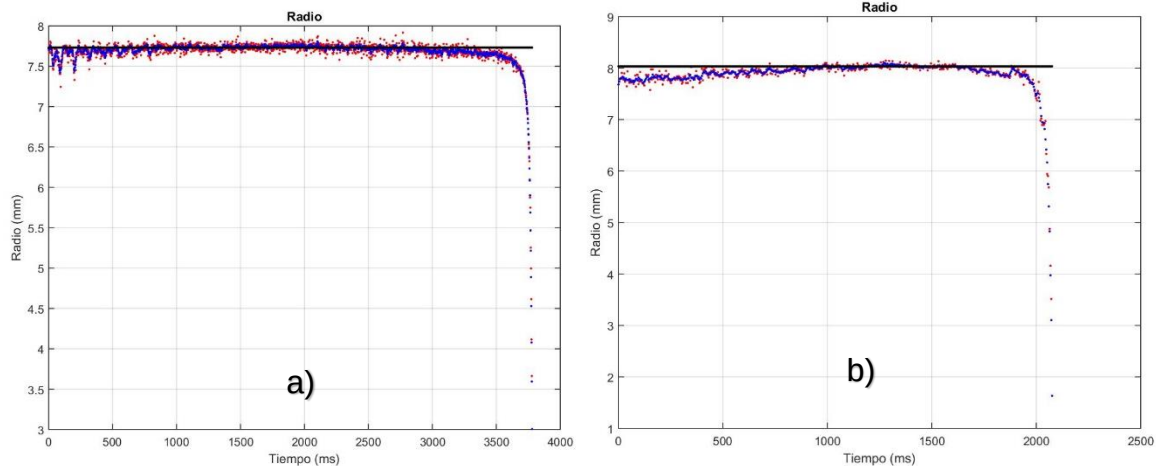
Se destaca que, mirando los valores mínimos coinciden de forma aproximada en todas las superficies, estando dentro de un rango de entre 105° y 115° , 10° de diferencia.

5.2.5. Radio máximo suavizado

A diferencia del ángulo, el radio máximo de la base de la burbuja tiene una dispersión muy pequeña en todas las superficies, estando alineados todos los puntos, como si de datos sintéticos se tratase. Como en las gráficas del ángulo, existe una clara semejanza entre las superficies de 8 y 10 mm y entre las de 16 y 20 mm. Para dejar claro que existe una zona constante y ver cuándo los datos se alejan o acercan a la misma, se incluye una línea que representa el valor medio de esta zona.



Gráfica 34. Radio máximo (en la base) de la interpolación lineal total y suavizado, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).



Gráfica 35. Radio máximo (en la base) de la interpolación lineal total y suavizado, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

En la Gráfica 34, correspondiente a las superficies de 8 y 10 mm, se puede observar un claro comportamiento, una primera expansión radial de la línea de contacto hasta llegar a un valor constante, donde permanece durante gran parte del proceso de formación de la burbuja. En este momento, llega el retroceso de la interfase, lo cual sucede de una forma rápida, hasta que se produce el desprendimiento. El límite del análisis es el momento anterior al desprendimiento.

El valor máximo alcanzado en la superficie de 8 mm es de casi 4 mm y en la superficie de 10 mm, de 4.8 mm. Esto escenifica una vez más, que los mejores resultados se obtienen en las superficies más pequeñas. Ya que se está demostrando que en la superficie de 8 mm se rellena, prácticamente al completo, la superficie generada, sin embargo, en la superficie de 10 mm, se encuentra por debajo de los 5 mm, que se supone debería ocupar la burbuja. Esto no es del todo un problema ya que, realmente, las superficies no van a tener el tamaño exacto de las máscaras usadas, aunque sí es un síntoma del comportamiento ya comprobado en los análisis de la burbuja completa, en los que el tamaño de la superficie siempre era mayor al de la base de la burbuja.

En el caso de las superficies de 16 y 20 mm, el comportamiento es semejante a las otras dos superficies en la parte final, pero en la parte inicial no se produce ese crecimiento radial de la línea de contacto, sino que se comienza en el valor estable. Esto puede deberse a que realmente el comportamiento es así, o a que las imágenes

iniciales eran de una mayor dificultad, porque las burbujas están mucho peor definidas que en las superficies menores. En la superficie de 16 mm, se alcanza un valor máximo de 7.75 mm y en la de 20 mm, de 8 mm. La superficie de 16 mm es llenada casi al completo, sin embargo, en la de 20 mm se consigue rellenar como máximo 16 mm de diámetro, lo que es inferior a lo detectado en los vídeos de la burbuja completa, a pesar de esto, estos resultados obtenidos en los vídeos de detalle se consideran (en este ámbito) más realistas porque existe un mayor zoom, por tanto, una mayor precisión al seleccionar puntos en una imagen.

Es destacable, la ínfima dispersión de los resultados en todas las superficies, a pesar de la dificultad que entrañaban las imágenes.

5.2.6. Velocidad del radio máximo con y sin suavizado

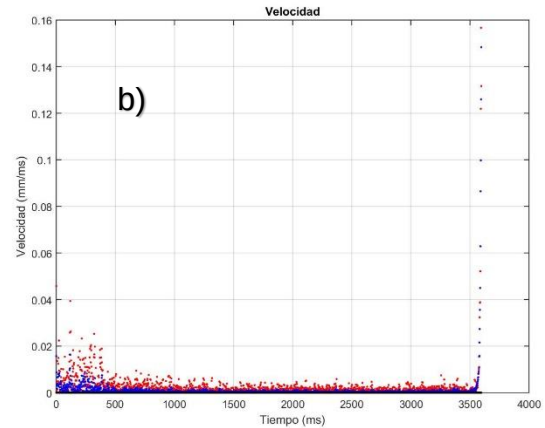
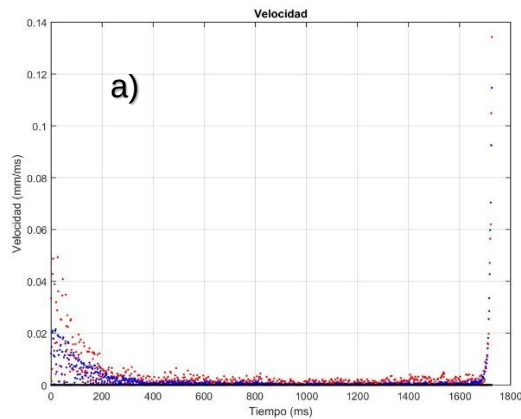
Se presentan las gráficas de velocidad de la línea de contacto de las superficies de 8, 10, 16 y 20 mm, aunque en algunas tendrán una mayor utilidad que en otras, debido a la gran dispersión producida por el error numérico cometido.

Está claro, que la velocidad debe aumentar repentinamente en la etapa de retroceso de la entrefase. Y así sucede en todas las gráficas mostradas, aunque en la superficie de 16 mm el error numérico es grande.

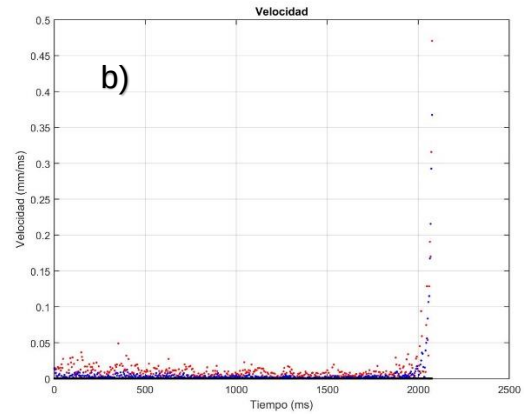
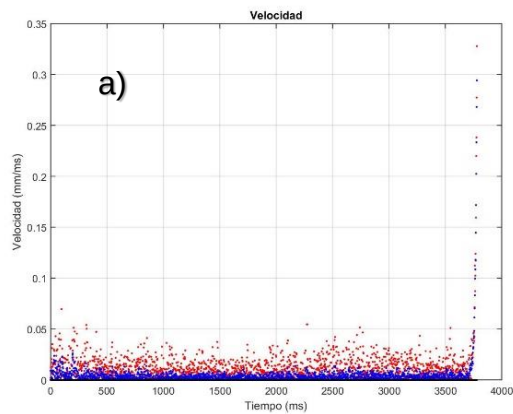
Las gráficas de velocidad muestran, la velocidad calculada directamente con el radio obtenido del análisis, en color rojo y la velocidad calculada con el radio suavizado, en color azul.

Por otro lado, la aceleración se ha calculado con los datos suavizados del radio y el error numérico era demasiado grande, por lo que se ha decidido no incluirla, al no tener valores representativos.

A la velocidad se le ha aplicado el valor absoluto, porque se obtuvo negativa al disminuir el radio con el tiempo, la aceleración sería negativa por la misma razón.



Gráfica 36. Velocidad del radio máximo suavizado, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).



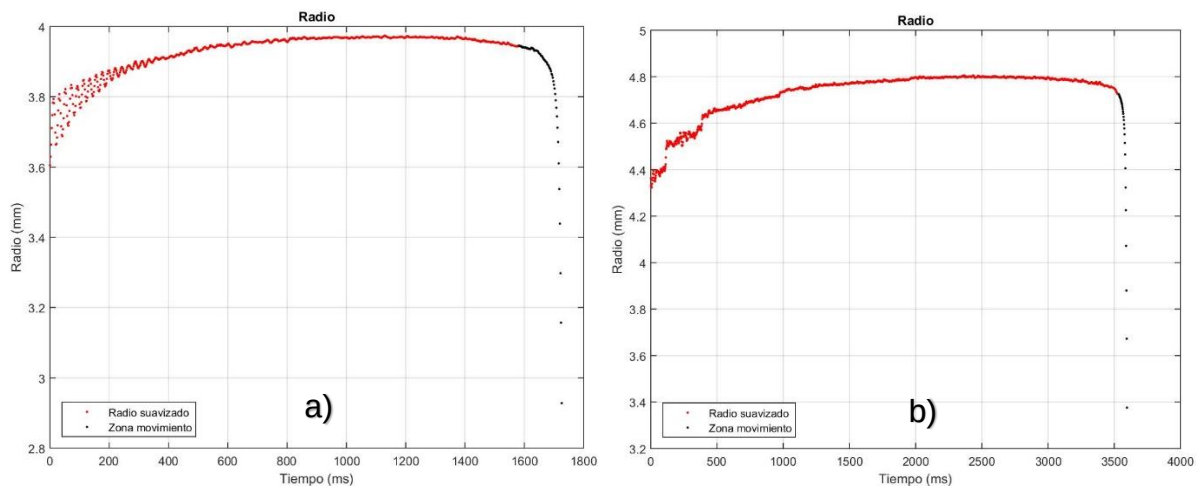
Gráfica 37. Velocidad del radio máximo suavizado, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

5.2.7. Zona de movimiento en el radio máximo suavizado

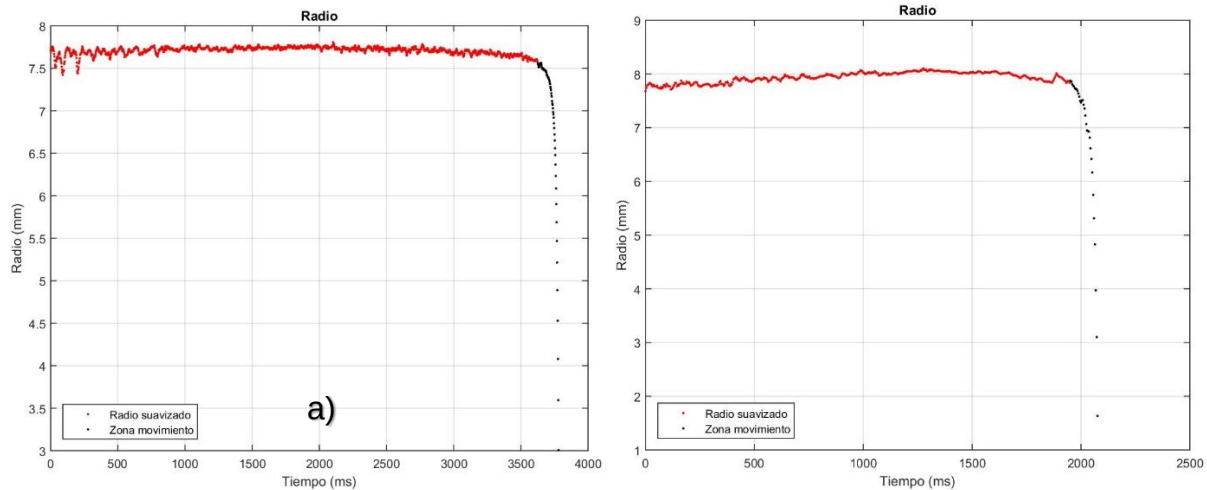
El último dato, que se calcula en esta investigación, es la zona de movimiento de la línea de contacto de la burbuja, es decir, en qué radio y tiempo se produce el inicio del movimiento de la interfase. Sabiendo que este momento, se produce cuando ocurre la disminución del radio desde el valor en el que se mantiene constante. En las gráficas del radio máximo presentadas anteriormente, se puede ver de una forma fácil, en qué zona de la gráfica se produce esta disminución del radio. Se debe destacar que, para poder comparar entre los distintos casos realizados para una misma superficie, el tiempo de inicio de movimiento se ha referenciado al momento del desprendimiento de la burbuja, es decir, el desprendimiento será el tiempo cero y el tiempo total de inicio de movimiento contabilizará hasta el punto en que se determina el retroceso de la interfase. Esto se hace porque los casos propuestos para una

misma superficie están realizados en distintas condiciones de caudal y en algunos casos con superficies generadas en diferentes momentos.

Sin embargo, al tener una resolución temporal tan grande en esa zona, existen muchos posibles puntos que indicarían el cambio de curvatura en los datos. Por ello, se tuvo que idear un método o criterio arbitrario para encontrar el punto que mejor representase el inicio del movimiento de retroceso de la interfase. Dicho método consiste en que, al conocer el punto donde el radio comienza a desviarse del valor constante, es decir, el punto extremo del cálculo de la media. Si se analiza el vector de resultados del radio a partir de este punto, buscando los máximos o puntos que tengan un valor mayor que todos los que le siguen, se obtendrán los puntos posibles de inicio del movimiento. Realizando un método de selección con una serie de parámetros de máximas diferencias, se obtienen el radio máximo y el tiempo de inicio del movimiento de la interfase. Debido a que este es un criterio personal, se utiliza otro criterio en el que el punto de inicio del movimiento viene dado por un tanto por ciento del primer radio detectado.



Gráfica 38. Radio máximo suavizado y zona de movimiento de retroceso, diámetro 8 mm (a) y 10 mm (b).



Gráfica 39. Radio máximo suavizado y zona de movimiento de retroceso, diámetro 16 mm (a) y 20 mm (b).

En estas gráficas, como aparece en la propia leyenda, la zona negra caracteriza la etapa en la que la interfase se está moviendo. El primer punto de este color será el punto de inicio del movimiento. Las gráficas utilizan el criterio realizado manualmente y no el del tanto por ciento, debido a que como se verá, tiene peor consistencia entre los distintos casos de una superficie.

Analizando las gráficas, se puede ver que la zona de movimiento es coherente con el inicio de la caída del radio desde la etapa en que se mantenía constante.

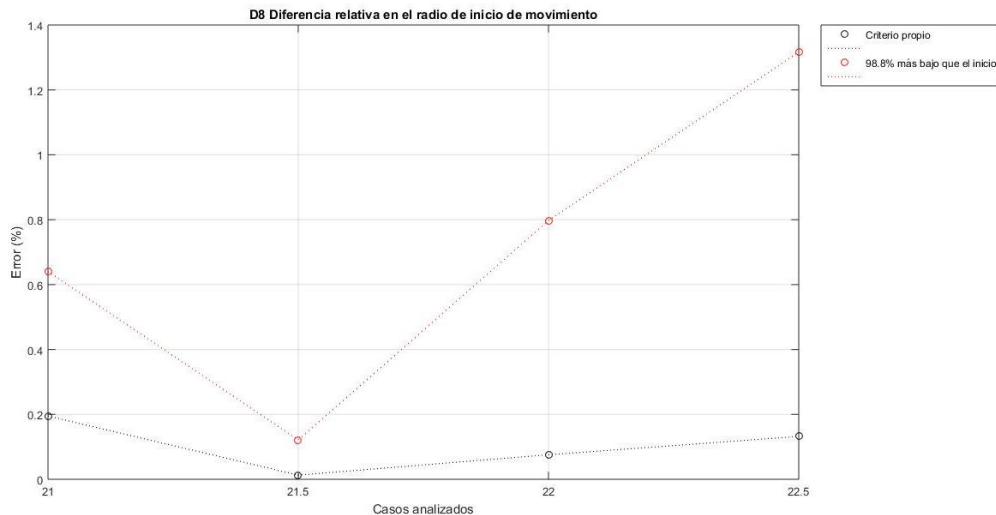
5.2.8. Comparación entre superficies del inicio del movimiento

En este último apartado, se realiza la comparación entre los resultados obtenidos para el radio y tiempo de inicio de movimiento en los distintos casos analizados en una misma superficie. Si existe la periodicidad del proceso, estos valores deben ser semejantes para esa misma superficie.

Se analizan tanto los resultados obtenidos con el criterio creado y parametrizado, definido como criterio propio, como con el criterio del tanto por ciento del radio inicial. Dicho tanto por ciento es diferente en cada superficie. Aunque el análisis se centrará en los valores obtenidos con el criterio propio, ya que las diferencias relativas entre los casos obtenidos con el otro criterio son mucho mayores.

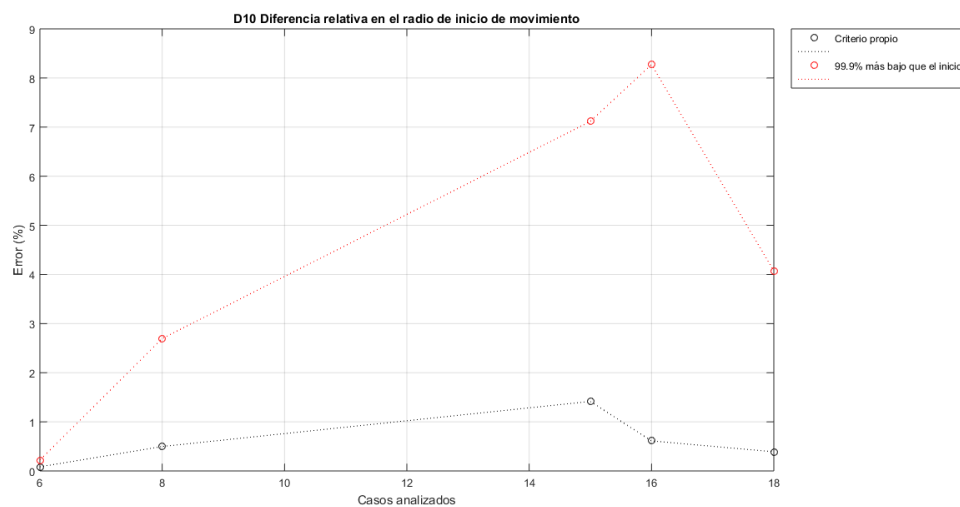
Se debe aclarar que en el eje X de estas gráficas de comparación, se indican los nombres de los vídeos a los que corresponden los datos.

5.2.8.1. Comparación radio inicio movimiento



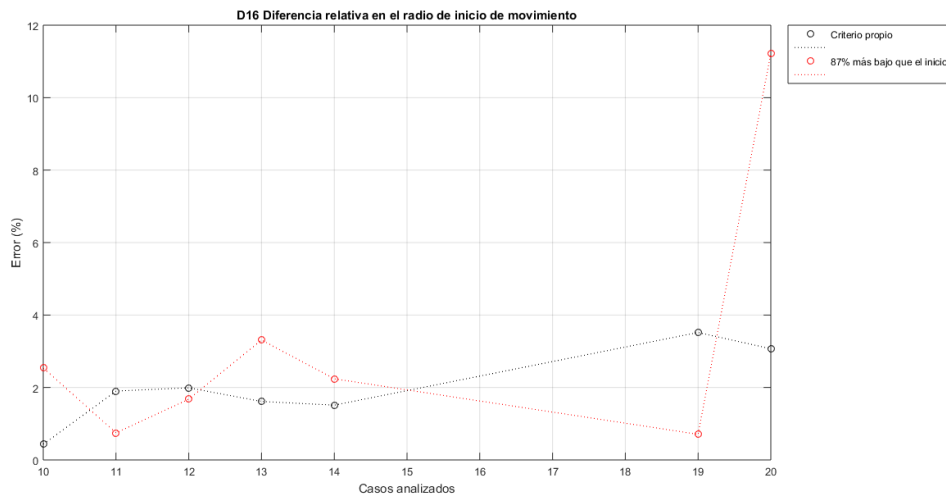
Gráfica 40. Diferencias relativas entre el radio de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 8 mm.

Para el caso de la superficie de 8 mm, se tiene una diferencia relativa máxima en el radio de 0.2 %, lo que es un valor mínimo. Esta diferencia relativa, se calcula entre el valor obtenido en el caso en cuestión y el valor medio de todos los casos de una superficie.



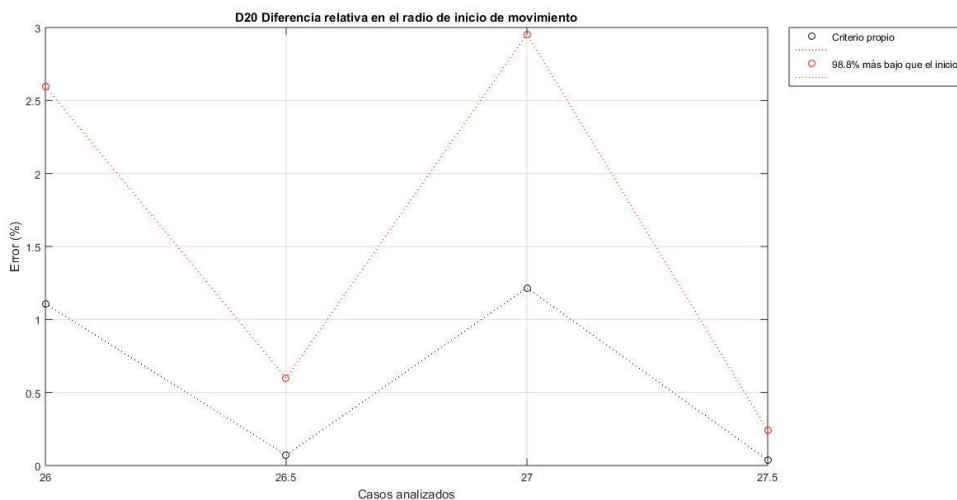
Gráfica 41. Diferencias relativas entre el radio de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 10 mm.

Para el caso de la superficie de 10 mm, se tiene una diferencia relativa máxima en el radio de 1.5 %, siendo algo mayor que el anterior pero aun mínimo.



Gráfica 42. Diferencias relativas entre el radio de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 16 mm.

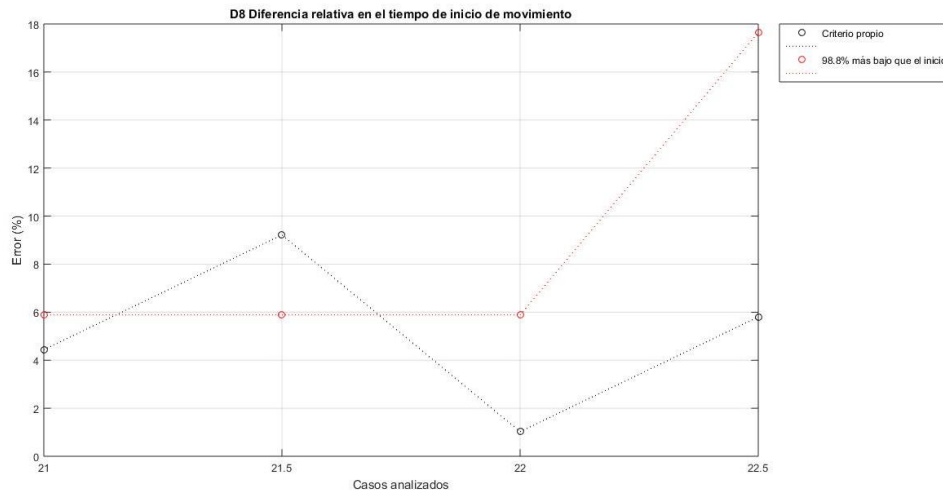
Para el caso de la superficie de 16 mm, se tiene una diferencia relativa máxima en el radio de 4 %. Se puede observar, que cada vez que aumenta la superficie, el error está aumentando, debido a que la dificultad de las imágenes se incrementa y los datos son menos precisos, aunque sigue siendo muy pequeño para valores experimentales.



Gráfica 43. Diferencias relativas entre el radio de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 20 mm.

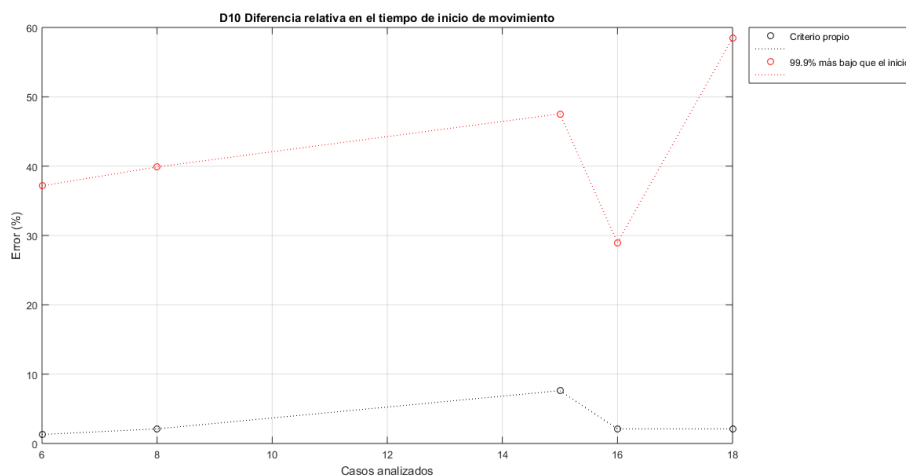
Para el caso de la superficie de 20 mm, se tiene una diferencia relativa máxima en el radio de 1.25 %, que es inferior al último caso, por lo que, aunque ha aumentado la superficie, el error no lo ha hecho.

5.2.8.2. Comparación tiempo inicio de movimiento



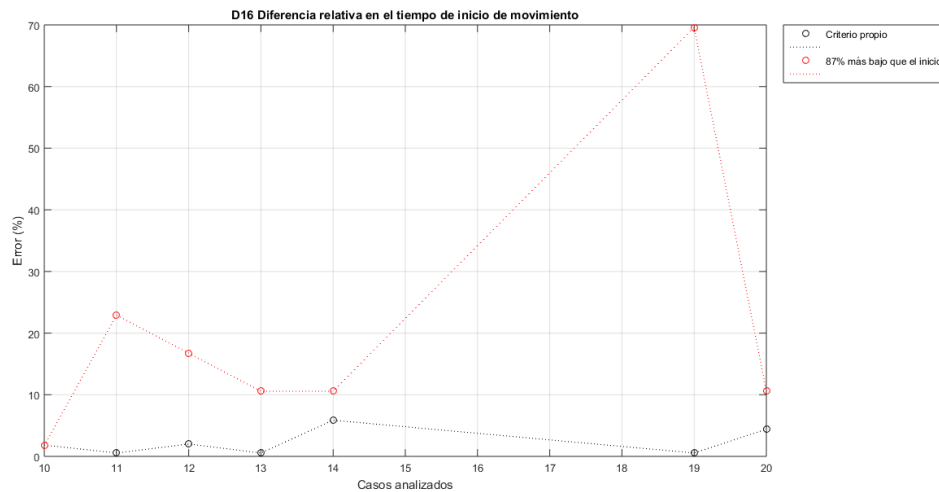
Gráfica 44. Diferencias relativas entre el tiempo de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 8 mm.

Para el caso del tiempo de inicio de movimiento (referenciado respecto el desprendimiento) en la superficie de 8 mm, se tiene una diferencia relativa máxima de menos de un 10 %. Como se puede ver, las diferencias en los radios son menores porque las variaciones que se producen en los mismos son de décimas.



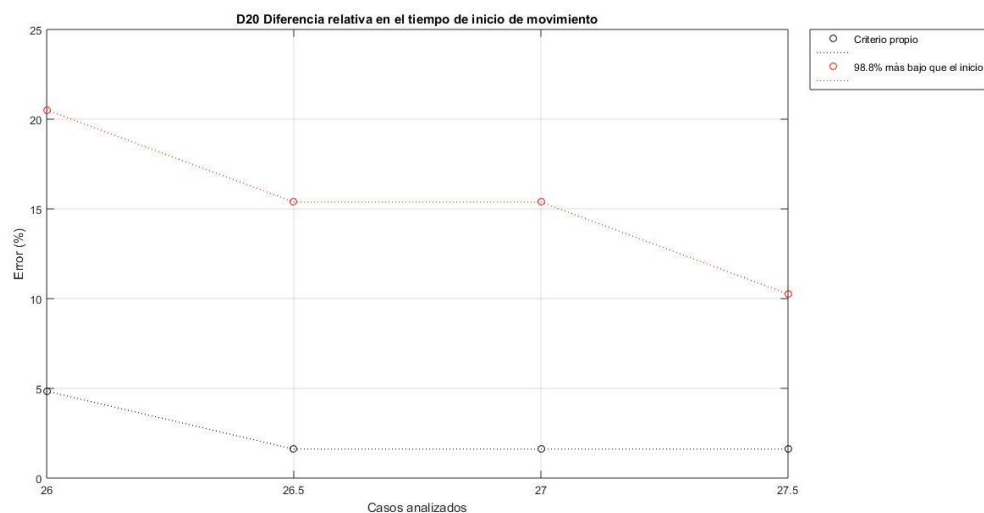
Gráfica 45. Diferencias relativas entre el tiempo de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 10 mm.

Para la superficie de 10 mm, se tiene una diferencia relativa máxima en el tiempo de inicio de movimiento de menos de un 10 %, como en el caso de 8 mm.



Gráfica 46. Diferencias relativas entre el tiempo de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 16 mm.

En la superficie de 16 mm, la diferencia relativa máxima es de menos de un 10 %, también como en las otras dos superficies. Este valor que se da en las tres superficies anteriores, está aceptado como el error relativo posible en estudios experimentales.



Gráfica 47. Diferencias relativas entre el tiempo de inicio de movimiento y su valor medio, diámetro 20 mm.

Por último, en la superficie de 20 mm existe una diferencia relativa máxima de 5 %, lo que se corresponde con la mitad de lo sucedido en anteriores superficies.

	Radio máximo (base) (mm)	Desviación típica (mm)	Tiempo (ms)	Desviación típica (ms)
8 mm	3.949	0.006	150	10
10 mm	4.75	0.04	62	3
16 mm	7.4	0.2	156	5
20 mm	7.87	0.08	124	4

Tabla 22. Valores medios y desviaciones típicas del radio y tiempo de inicio de movimiento.

En la Tabla 22, se analiza la validez de los valores medios obtenidos para el radio y tiempo de inicio de movimiento (referenciado respecto al desprendimiento), con los que se han comparado los valores obtenidos en cada caso de una misma superficie. En el caso de la desviación típica del radio, se puede afirmar que tiene un valor muy pequeño comparado con los propios valores del radio, no llegando en ningún caso a 1 mm. Por otro lado, la desviación típica en el tiempo de inicio del movimiento es bastante mayor, aunque comparándola con el valor correspondiente de tiempo sea pequeño. Por ejemplo, para la superficie de 8 mm, existe una desviación típica de casi 10 ms y si el valor medio del tiempo de inicio del movimiento es 146.5 ms, la diferencia relativa es de menos de un 7 %.

6. Conclusiones y trabajo futuro

La investigación se ha centrado en el estudio de los parámetros que influyen en el proceso de formación de una burbuja, sobre lo que existen numerosos artículos de investigación. Especialmente, se ha enfocado en el proceso de formación de burbujas en superficies hidrofóbicas, aunque la revisión bibliográfica se ha realizado de una forma más general. En este tipo de superficies es clave la dinámica de la línea de contacto y la histéresis del ángulo de contacto, ciertamente, en superficies con una buena mojabilidad estos parámetros también influyen, pero en este caso de una forma más acusada. La dinámica de la línea de contacto, en superficies hidrofóbicas se refiere a la expansión y contracción radial que sufre la base de la burbuja durante todo el proceso, por supuesto, también existe una expansión radial en la zona media de la burbuja. La histéresis del ángulo de contacto es la variación temporal que sufre el ángulo de contacto de la burbuja durante su formación, debido a las diferencias entre éste y el ángulo de contacto de equilibrio [7]. Estas diferencias se producen por el flujo forzado de la inyección, que insta a la interfase a moverse y existe cierta libertad para hacerlo a lo largo de la superficie de baja mojabilidad, en el caso de toberas la línea de contacto se encuentra anclada en el orificio.

El flujo forzado de inyección es otro de los parámetros más influyentes, debido a que se asume la existencia de un flujo constante, aunque en la práctica es muy difícil de conseguir. Esto se produce porque durante la variación de la posición de la línea de contacto, la base de la burbuja desciende desde un valor máximo, hasta ser del orden del orificio y después vuelve a crecer, lo que genera una sobrepresión que se transmite a la inyección, haciendo que el flujo varíe [6]. Para eliminar o reducir al máximo este comportamiento, se utilizan tubos capilares en la inyección de aire comprimido. El cálculo del volumen y su representación frente al tiempo demuestran la existencia o no de un caudal constante.

En todas las investigaciones anteriores, se destacan las diferencias entre los estudios teóricos y experimentales producidas por las diferentes suposiciones, sobre todo, geométricas, que se realizan en estos estudios teóricos. Aunque estas suposiciones no se realizan por una falta de rigor del investigador, sino por la ausencia de estudios experimentales de calidad, que provean a la simulaciones de condiciones

iniciales y de contorno [12, 19]. Por ello, la necesidad de realizar esta investigación de forma tan rigurosa y extensa.

La investigación realizada, se puede dividir en tres etapas. La primera de las etapas, es un estudio experimental en el que se realizaron ensayos y grabaciones del proceso de formación de una burbuja bajo condiciones de flujo constante y en varias superficies hidrofóbicas. Dichos ensayos fueron de dos tipos, grabación del proceso de formación de la burbuja, visualizando la burbuja completa y visualizando solo el borde de la misma con un gran zoom. Para llegar a la necesidad de la realización de una segunda categoría de vídeos, previamente, se tuvieron que dar numerosos problemas en el análisis de los vídeos de la burbuja completa. La segunda etapa consiste en el desarrollo de la técnica de procesado de imágenes por programación. En esta etapa se desarrollaron un gran número de códigos mediante el programa Matlab para el análisis de imágenes. Al mismo tiempo que la grabación se divide en dos tipos, se deben generar dos ramas de códigos que sirvan para analizar las diferentes imágenes. Los códigos se centran en la detección del contorno de la burbuja. Se puede decir que, en la primera rama de códigos, se obtiene el contorno completo de la burbuja y en la segunda rama de códigos, se busca el contorno del borde de la interfase de la burbuja. Por último, después de obtener los contornos necesarios, se comienza la tercera etapa, consistente en un post-procesado de datos y obtención de resultados. Se calcula el volumen de la burbuja, su ajuste a una regresión lineal, la variación temporal de la altura de la burbuja, su centroide y radio equivalente, para el caso del análisis de la burbuja completa. En los códigos para el borde de la burbuja, se obtiene el ángulo de contacto y el radio máximo de la base de la burbuja a lo largo del tiempo, además, de intentar detectar los puntos donde se inicia el retroceso de la interfase.

En cuanto a los resultados obtenidos, se puede destacar el ajuste sorprendente del volumen a una regresión lineal, obteniendo coeficientes de ajuste R^2 siempre mayores a 0.99, lo que es un valor excepcional en el caso de estudios experimentales. Por otro lado, las gráficas del centroide y altura máxima de la burbuja en función del tiempo, describen un claro comportamiento sin dispersión en los puntos. En los datos numéricos obtenidos, se menciona la baja desviación típica de los valores medios del volumen, diámetro equivalente o diámetro de la base, lo que indica la consistencia en

el proceso para una misma superficie. Siendo esta magnitud válida como valor de error, comprobado gracias a una comparación con el error, al medir una longitud, propagado al volumen. Por último, en los datos de la burbuja completa, se realiza una comparación entre las distintas superficies, destacando la comparación entre los volúmenes finales y volúmenes de Fritz. Se observa un claro aumento del volumen, cuanto mayor es la superficie hidrofóbica. Aunque en la superficie de 20 mm, se encuentra el límite del producto Neverwet, solo se consigue rellenar, aproximadamente, 16 mm de diámetro, según los análisis de los vídeos de detalle de la burbuja. En cuanto a la comparación con el volumen de Fritz, queda claro que este volumen nunca coincide con el final de la burbuja, como se indica en [6,7] donde solo había que sustituir el radio del orificio por el máximo de la base de la burbuja, aunque es cierto que son semejantes en alguno casos.

Analizando los resultados obtenidos a partir de los vídeos de detalle, se destaca el claro comportamiento de la variación del ángulo de contacto con el tiempo en las superficies de 8 y 10 mm. En ellas, la dispersión de los datos obtenidos es mínima. En la superficies de 16 y 20 mm, se observa un comportamiento ascendente, aunque la dispersión de los datos es mucho mayor. En cuanto a la variación del radio máximo, es importante mencionar que, en cualquiera de las superficies analizadas, la dispersión de los datos es mínima, existiendo una tendencia común en las superficies de 8 y 10 mm y otra semejante, en las superficies de 16 y 20 mm, aunque diferente en la etapa inicial de crecimiento radial, que se da solo en las superficies de 8 y 10 mm. La baja dispersión de los datos, que se considera un resultado muy bueno en investigaciones experimentales, se produce gracias al estudio de sensibilidad realizado. En dicho estudio, se obtienen todos los resultados para distintos tipos de interpolaciones y distinto número de puntos en cada una de ellas. Analizando posteriormente, cuál es la que proporciona una menor dispersión tanto en el ángulo, como en el radio. De este estudio se dirime que los mejores resultados, se obtienen de la interpolación lineal con todos los puntos depurados. Por último, se obtienen el radio máximo de la base y el tiempo en que se produce el inicio del retroceso de la entrefase en dirección al orificio, teniendo en cuenta que está referenciado al desprendimiento. Dando como resultado valores consistentes entre los distintos casos de una superficie, con máximas diferencias relativas en el radio de un 4 % y en el tiempo de un 10 %.

A pesar de haber obtenido numerosos datos y de gran calidad, se han tenido muchos problemas con las imágenes analizadas. Por tanto, un paso adelante y que puede realizarse en posteriores investigaciones, sería la introducción de un plano láser. Para ello, deberían incorporarse partículas en el agua circundante a la burbuja, así el plano láser las iluminaría y en la cámara se podría tener una mejor visualización del contorno de la burbuja en todas sus partes, incluyendo el borde, debido a que las partículas no pueden atravesar la interfase y, por tanto, el interior de la burbuja sería la única parte oscura en la imagen. Esto ayudaría a que la detección de la interfase fuera mucho mejor, evitando la incorporación de las rugosidades en el contorno, y así no tener que realizar una depuración del mismo.

Por otro lado, queda pendiente el estudio teórico de este problema. Este tipo de estudios se han realizado en superficies de buena mojabilidad y mala mojabilidad, pero sería recomendable centrarse en la investigación teórica del comportamiento de la burbuja sobre una superficie hidrofóbica, y así poder comparar los resultados experimentales obtenidos con los valores que, supuestamente, deberían tener teóricamente. Además, previamente, para mejorar la comprensión del problema, y poder comparar unos casos con otros, habría que mostrar los resultados de forma adimensional. Es conveniente señalar que, en el presente estudio, se ha trabajado de forma dimensional debido a las características del trabajo realizado.

El estudio experimental, se puede continuar con el análisis de otros tipos de geometrías en la superficie. En vez de circulares, se pueden realizar máscaras para superficies con diferentes geometrías, como triangulares o rectangulares, estudiando tanto el comportamiento en el proceso de formación de la burbuja, como la burbuja final obtenida. Este tipo de investigación, ya se inició en el grupo de investigación de fluidos TEP235, el mismo el que se ha completado este Trabajo fin de Grado, como puede observarse en la Figura 37.



Figura 37. Experimentos realizados en el Grupo TEP235 con geometrías triangulares y rectangulares. [Obtenidas de R. Bolaños Jiménez y M. Rubio Rubio].

7. Bibliografía

- [1] J Eggers. Nonlinear dynamics and breakup of free surface flows. Rev. Mod. Phys., 69:865-929, 1997.
- [2] Gustavo B., Ángela M. O., Paola G. D. Evaluación de la transferencia de oxígeno en un biorreactor convencional con aireador externo. Rev. Colomb. Biotecnol. Vol. XV No. 2 diciembre 2013 106-114.
- [3] CienciaEs.com ¿Por qué se forman columnas de burbujas en las copas de champán? <http://cienciaes.com/ciencianuestra/2010/01/06/burbujas-en-champán/>
- [4] Muñoz P. María J. Extracción de metales por hidrometalurgia: Procesamiento de cobre y cinc. Universidad Politécnica de Valencia.
- [5] J.A. Gutiérrez-Vázquez y J. Oñoro Revista de Metalurgia, 44 (5) septiembre-octubre 457-476, 2008.
- [6] Corchero G, Medina A, Higuera FJ, Colloid Surface A 290, 41-49 (2006).
- [7] Gnyloskurenko SV, Byakova AV, Raychenko OI, Nakamura T. Colloid Surface A 218, 73-87 (2003).
- [8] A.V. Byakova, S.V. Gnyloskurenko, T. Nakamura, O.I. Raychenko, Colloid Surf. A 229 (2003) 19.
- [9] J.F. Davidson, A.M.I. Mech, B.O.G. Shuler, Trans. Inst. Chem. Eng. 38 (1960) 144.
- [10] R. Kumar, N.R. Kuloor, Chem. Technol. 19 (1967) 733.
- [11] L. Davidson, E.H. Amick, AIChE J. 2 (1956) 337.
- [12] Y.Chen, R.Mertz, R.Kulenovic Multiphase Flow 35 (2009) 66-77.
- [13] Martínez Bazán J.C. Apuntes de clase.
- [14] Crespo Martínez A. (2006), *Mecánica de fluidos*, España, S.A. Ediciones Paraninfo.

- [15] Bolaños Jiménez R. (2011), *Dynamics of bubble formation in cylindrical and planar geometries*, PhDthesis, Universidad de Jaén.
- [16] Rodríguez Rodríguez J.R., Sevilla A., Martínez Bazán J.C., Gordillo J.M., Annu. Rev. Fluid Mech. 2015. 47:405–29
- [17] Bolaños Jiménez R., Sevilla A. Martínez Bazán J.C., Gordillo J.M., Phys. Fluids 20:112104 (2008)
- [18] Nobuyuki O. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol.SMC-9, No. 1 (1979)
- [19] Yucheng F., Yang L., Multiphase Flow 84 (2016) 217-228
- [20] Jiming W., Qiunan S., Zhongning S., Haifeng G., Multiphase Flow (2018)
- [21] Lebon M., Sebilleau J., Colin C., Physical Review Fluids 3, 073602 (2018)
- [22] Gerlach D., Biswas G., Durst F., Kolobaric V., Heat and Mass Transfer, 48 (2005) 425-438.
- [23] Bioagua Tratamineto de aguas, <http://www.bioaguachile.cl/2009/11/24/difusores-de-burbuja-fina/>
- [24] Azureus SL., <https://www.azureussl.com/microburbujas-en-los-acuarios-marinos-beneficiosas-daninas/>

8. Anexos

8.1. Códigos para el análisis de los vídeos de la burbuja completa.

8.1.1. Completa_general

```
clear all

lista={'Analizar vídeo individual','Comparación entre vídeos'};
[opca,tfa]=listdlg('ListSize',[180,40],'PromptString','Seleccione qué desea realizar:','SelectionMode','single','InitialValue',1,'ListString',lista);

carpresult_8=char('Resultados_d8_Burb_completa_1_1','Resultados_d8_Burb_completa_1_2',...
    'Resultados_d8_Burb_completa_1_3','Resultados_d8_Burb_completa_3');
carpresult_10=char('Resultados_d10_Burb_completa_1','Resultados_d10_Burb_completa_2_1',...
    'Resultados_d10_Burb_completa_2_2','Resultados_d10_Burb_completa_2_3');
carpresult_16=char('Resultados_d16_Burb_completa_1','Resultados_d16_Burb_completa_2_1',...
    'Resultados_d16_Burb_completa_2_2','Resultados_d16_Burb_completa_3');
carpresult_20=char('Resultados_d20_Burb_completa_1a','Resultados_d20_Burb_completa_3',...
    'Resultados_d20_Burb_completa_4','Resultados_d20_Burb_completa_5');

if tfa==1
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%
    if opca==1
        listvid={'Diámetro 16 mm, vídeo 1','Diámetro 10 mm, vídeo 1','Diámetro 10 mm, vídeo 2, burbuja 1',...
            'Diámetro 10 mm, vídeo 2, burbuja 2','Diámetro 10 mm, vídeo 2, burbuja 3',...
            'Diámetro 16 mm, vídeo 2, burbuja 1','Diámetro 16 mm, vídeo 2, burbuja 2',...
            'Diámetro 16 mm, vídeo 3','Diámetro 20 mm, vídeo 1a','Diámetro 20 mm, vídeo 3',...
            'Diámetro 20 mm, vídeo 4','Diámetro 20 mm, vídeo 5','Diámetro 8 mm, vídeo 1, burbuja 1',...
            'Diámetro 8 mm, vídeo 1, burbuja 2','Diámetro 8 mm, vídeo 1, burbuja 3',...
            'Diámetro 8 mm, vídeo 3'};
        [opcvid,tfvid]=listdlg('ListSize',[220,230],'PromptString','Seleccione qué vídeo desea analizar:','SelectionMode','single','InitialValue',length(listvid),'ListString',listvid);

        if tfvid~=0
            switch opcvid
                case 1
                    nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI matlab\Imagenes\Imagenes_d16_lente_1_burb_1\';
                    if isempty(find(carpresult_16(1,:)==' ', 1, 'first'))==1
                        carpresult=carpresult_16(1,:);
                    else
```

```

        carpresult=carpresult_16(1,1:find(carpresult_16(1,:)==' ',
1, 'first' )-1);
    end
    case 2
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_1\';
        if isempty(find(carpresult_10(1,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_10(1,:);
        else
            carpresult=carpresult_10(1,1:find(carpresult_10(1,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 3
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_2_1\';
        if isempty(find(carpresult_10(2,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_10(2,:);
        else
            carpresult=carpresult_10(2,1:find(carpresult_10(2,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 4
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_2_2\';
        if isempty(find(carpresult_10(3,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_10(3,:);
        else
            carpresult=carpresult_10(3,1:find(carpresult_10(3,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 5
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_2_3\';
        if isempty(find(carpresult_10(4,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_10(4,:);
        else
            carpresult=carpresult_10(4,1:find(carpresult_10(4,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 6
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_2_1\';
        if isempty(find(carpresult_16(2,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_16(2,:);
        else
            carpresult=carpresult_16(2,1:find(carpresult_16(2,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 7
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_2_2\';
        if isempty(find(carpresult_16(3,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_16(3,:);
        else
            carpresult=carpresult_16(3,1:find(carpresult_16(3,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 8
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_3\';
        if isempty(find(carpresult_16(4,:)==' ', 1, 'first' ))==1

```



```

        carpresult=carpresult_16(4,:);
    else
        carpresult=carpresult_16(4,1:find(carpresult_16(4,:)==' ',
1, 'first' )-1);
    end
    case 9
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_1a\';
        if isempty(find(carpresult_20(1,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_20(1,:);
        else
            carpresult=carpresult_20(1,1:find(carpresult_20(1,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 10
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_3\';
        if isempty(find(carpresult_20(2,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_20(2,:);
        else
            carpresult=carpresult_20(2,1:find(carpresult_20(2,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 11
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_4\';
        if isempty(find(carpresult_20(3,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_20(3,:);
        else
            carpresult=carpresult_20(3,1:find(carpresult_20(3,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 12
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_5\';
        if isempty(find(carpresult_20(4,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_20(4,:);
        else
            carpresult=carpresult_20(4,1:find(carpresult_20(4,:)==' ',
1, 'first' )-1);
        end
    case 13
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_1\';
        if isempty(find(carpresult_8(1,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_8(1,:);
        else
            carpresult=carpresult_8(1,1:find(carpresult_8(1,:)==' ', 1,
'first' )-1);
        end
    case 14
        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_2\';
        if isempty(find(carpresult_8(2,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_8(2,:);
        else
            carpresult=carpresult_8(2,1:find(carpresult_8(2,:)==' ', 1,
'first' )-1);
        end
    case 15

```

```

        nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_3\';
        if isempty(find(carpresult_8(3,:)==' ', 1, 'first' ))==1
            carpresult=carpresult_8(3,:);
        else
            carpresult=carpresult_8(3,1:find(carpresult_8(3,:)==' ', 1,
'first' )-1);
        end
        case 16
            nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_3\';
            if isempty(find(carpresult_8(4,:)==' ', 1, 'first' ))==1
                carpresult=carpresult_8(4,:);
            else
                carpresult=carpresult_8(4,1:find(carpresult_8(4,:)==' ', 1,
'first' )-1);
            end
        end
        archcargar=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\',carpresult,'\TODAS_1.mat'];

        listoper={'Realizar análisis del vídeo','Realizar gráficas','Realizar
cálculos','Guardar','Corregir escala'};
        [opcoper,tfoper]=listdlg('ListSize',[230,80],'PromptString','Seleccione
qué vídeo desea
analizar:','SelectionMode','single','InitialValue',2,'ListString',listoper)
;
        if tfoper==1
            switch opcoper
                case 1
                    close all
                    %clearvars -except list0 opc0 tf0 nom listoper opcoper tfoper
carpresult archcargar
                    completa_deteccion_burbuja;
                case 2
                    close all
                    %clearvars -except list0 opc0 tf0 nom listoper opcoper tfoper
carpresult archcargar
                    load(archcargar);
                    completa_graficas;
                case 3
                    %clearvars -except list0 opc0 tf0 nom listoper opcoper tfoper
carpresult archcargar
                    load(archcargar);
                    completa_graficas;
                case 4
                    load(archcargar);
                    completa_guardar;
                case 5
                    load(archcargar);
                    completa_correccion;
            end
        end
    end
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        if opca==2

```

```

listb={'Superficie de diámetro 8 mm','Superficie de diámetro 10
mm','Superficie de diámetro 16 mm','Superficie de diámetro 20
mm','Gráficas'};
[opcb,tfb]=listdlg('ListSize',[180,80],'PromptString','Seleccione qué desea
realizar:','SelectionMode','single','InitialValue',1,'ListString',listb);
if tfb==1
switch opcb
case 1 % 8 mm
[fcomp,ccomp]=size(carpresult_8);
contcomp=1;
for i=1:fcomp
if isempty(find(carpresult_8(i,:)==' ', 1, 'first'))==1
carpresult=carpresult_8(i,:);
completa_comparacion;
else
carpresult=carpresult_8(i,1:find(carpresult_8(i,:)==' ', 1,
'first')-1);
completa_comparacion;
end
end
case 2 % 10 mm
[fcomp,ccomp]=size(carpresult_10);
contcomp=1;
for i=1:fcomp
if isempty(find(carpresult_10(i,:)==' ', 1, 'first'))==1
carpresult=carpresult_10(i,:);
completa_comparacion;
else
carpresult=carpresult_10(i,1:find(carpresult_10(i,:)==' ',
1, 'first')-1);
completa_comparacion;
end
end
case 3 % 16 mm
[fcomp,ccomp]=size(carpresult_16);
contcomp=1;
for i=1:fcomp%%%-1
if isempty(find(carpresult_16(i,:)==' ', 1, 'first'))==1
carpresult=carpresult_16(i,:);
completa_comparacion;
else
carpresult=carpresult_16(i,1:find(carpresult_16(i,:)==' ',
1, 'first')-1);
completa_comparacion;
end
end
case 4 % 20 mm
[fcomp,ccomp]=size(carpresult_20);
contcomp=1;
for i=2:fcomp %%Empezamos en 2 porque el volumen final en el primer
vídeo de 20 mm sale muy pequeño
if isempty(find(carpresult_20(i,:)==' ', 1, 'first'))==1
carpresult=carpresult_20(i,:);
completa_comparacion;
else
carpresult=carpresult_20(i,1:find(carpresult_20(i,:)==' ',
1, 'first')-1);
completa_comparacion;
end
end
case 5

```

```

        close all
        completa_comparacion
end

end

end

end

```

8.1.2. Completa_deteccion_burbuja

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % clear all
% % close all
% % nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_1\';
% % carpresult='Resultados_d16_Burb_completa_1';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[ini,fin,av_caj,pix_inf,camb_mask,fr_lado,dif_lado,fr_borde,fr_curva,y_ana_
frborde,dif_x,y_ana_frcurva,fps,caudalteo,inilllenado,regla]=completa_parametros(nom);

listparo={'Parar en cada imagen','No parar en cada imagen'};
[paro,tfparo]=listdlg('ListSize',[250,50],'PromptString','Seleccione si desea analizar una por una:','SelectionMode','single','ListString',listparo);

escalavar=[];
for i=1:10
    nombrecalib=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\','regla'];
    imgcalib=imread(nombrecalib);
    figure(1)
    imshow(imgcalib)
    titcalib=['Seleccione la distancia a calibrar. ',num2str(i),'/10'];
    title(titcalib)
    [xcal,ycal]=ginput(2); %Matriz 2x2 formada por 2 vectores:
    xcal=round(xcal); %coordenada r de las dos esquinas opuestas,pix
    ycal=round(ycal); %coordenada z de las dos esquinas opuestas,pix
    distpix=abs(xcal(1)-xcal(2));
    distmm=input('Introduzca la equivalencia en milímetros: ');
    escalavar=[escalavar,distmm/distpix];
    close(figure(1));
end
escala=mean(escalavar);

%%%En dia si estamos analizando vídeos de 10, 16, 20 mm tenemos que poner +2
%%%y +3 pero si analizamos vídeos de 8 mm tenemos que poner +2 y +2.

```

```

dia=str2double(nom(find(nom=='d', 1, 'last') +2:find(nom=='d', 1, 'last')
)+3))*1e-3;
if dia==8e-3
    escala=0.018355046421084;
end
if dia==10e-3
    escala=0.017183908045977; %escala 10 mm
end
if dia==16e-3
    %escala=0.019704415954416; %escala 16 mm
    escala=0.0193483309143687; %escala 16 mm burb 3
end
if dia==20e-3
    escala=0.018391330891331; %escala 20 mm burb a
    %escala=0.020840579710145; %escala 20 mm burb 3 4 5
end
disp(num2str(escala));

nombre=[nom,num2str(ini),'.tif'];
imgini=imread(nombre);
figure(2)
imshow(imgini)
title('Seleccione la sección para analizar');
[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
close.figure(2));

if ini<camb_mask
figure(3)
imshow(imgini)
title('Seleccione la sección para ampliar izquierda')
[xfinal,yfinal]=ginput(2);
xfinal=round(xfinal);
yfinal=round(yfinal);
imgamp=imgini(yfinal(1):yfinal(2),xfinal(1):xfinal(2));
imshow(imgamp)
[bordezizq,bordeyizq]=ginput(1);
bordezizq=round(bordezizq)+xfinal(1)-1;
bordeyizq=round(bordeyizq)+yfinal(1)-1;

imshow(imgini)
title('Seleccione la sección para ampliar derecha')
[xfinal,yfinal]=ginput(2);
xfinal=round(xfinal);
yfinal=round(yfinal);
imgamp=imgini(yfinal(1):yfinal(2),xfinal(1):xfinal(2));
imshow(imgamp)
[bordexder,bordeyder]=ginput(1);
bordexder=round(bordexder)+xfinal(1)-1;
bordeyder=round(bordeyder)+yfinal(1)-1;
close.figure(3));
bordeini=[bordezizq,bordeyizq;bordexder,bordeyder];

if bordeyizq>pix_inf
    bordeyizq=pix_inf;
end
if bordeyder>pix_inf
    bordeyder=pix_inf;

```

```

end
end

altura_mm=[];
altura_px=[];
Volumen_pxder=[];
Volumen_mnder=[];
Volumen_pxizq=[];
Volumen_mmizq=[];
VolumenRo=[];
diametro_mm=[];
tt=0;
T=[];
clear nombre
pasos=(fin-ini)+1;

contornoI=zeros(1000,2,pasos);
contornoIref=zeros(1000,2,pasos);
contornoD=zeros(1000,2,pasos);
contornoDref=zeros(1000,2,pasos);
cont_contorno=1;

Mcentroide=[];
Mcentroideref=[];

for a=ini:fin
disp(a)

nombre=[nom,num2str(a),'.tif'];
img1=imread(nombre);

if yim(1)>av_caj
    yim(1)=yim(1)-av_caj;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if a>=camb_mask
    figure(2)
    imshow(img1)
    title('Seleccione la sección para analizar');
    [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
    close(ffigure(2));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
img=img1(yim(1):pix_inf,xim(1):xim(2));
boxul(1)=xim(1)-1;boxul(2)=yim(1)-1;
%ini:camb_mask-1
if a<camb_mask
    [BW,maskedImage] = segmentImage2(img);
end
%camb_mask:fin
if a>=camb_mask
    [BW,maskedImage] = segmentImage2v1(img);
end

bw=imcomplement(BW);

%figure(..)
%imshow(bw)

```

```

label=bwlabel(bw);
stats=regionprops(label,'Solidity','Area');
density=[stats.Solidity];
area=[stats.Area];

[max_area,pos]=max(area);
burbuja_label=find(area==max_area);

burbuja=ismember(label,burbuja_label);

se=strel('disk',1); %aproximación con círculos
burbuja=imdilate(burbuja,se);

[B,L]=bwboundaries(burbuja,'noholes');

%figure(4)
%imshow(img,[])
%hold on
%for i=1:length(B)
%    plot(B{i}(:,2),B{i}(:,1),'r','linewidth',1.5)
%end
%hold off

figure(5)
imshow(img1,[])
hold on
for i=1:length(B)
    plot(B{i}(:,2)+boxul(1),B{i}(:,1)+boxul(2),'r','linewidth',1)
%plot(x,y,símbolo)
end
hold off

%%Altura máxima
altura=[];
altura=1024-(B{1}(:,1)+boxul(2));
altura_px=[altura_px,max(altura)];
altura_mm=[altura_mm,max(altura)*escala];

%%Volumen
YY=[];
XX=[];
Xmax=0;
YYnewizq=[];
posYY=[];
XXnewizq=[];
YY=B{1}(:,1)+boxul(2);
XX=B{1}(:,2)+boxul(1);

[YYnewizq,posYY]=unique(YY);
XXnewizq=XX(posYY);
if a>fr_lado
    for i=2:length(XXnewizq)
        dif=abs(XXnewizq(i)-XXnewizq(i-1));
        if dif>dif_lado
            pto=YYnewizq(i);
            i=length(XXnewizq);
        end
    end
    if i==length(XXnewizq)

```

```

        break
    end
end
camb=find(pto==YYnewizq);
for i=camb:length(YYnewizq)
    doble=[];
    pto=YYnewizq(i);
    doble=find(pto==YY);
    for j=1:length(doble)
        if XX(doble(j))<XXnewizq(i)
            XXnewizq(i)=XX(doble(j));
        end
    end
end
end
end
%figure(6);
%hold on;
%cla
%plot(XX,YY,'r-');
%plot(XXnewizq,YYnewizq,'b-')
%hold off;

figure(7)
imshow(img1,[])
hold on
plot(XXnewizq,YYnewizq,'b-')
hold off

eliminar=[];
r=1;
s=1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
izq=1;
completa_mov_borde;
clear izq
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=2:length(YYnewizq)
    if a<fr_borde || YYnewizq(i)>y_ana_frborde
        if YYnewizq(i)>bordeyizq || XXnewizq(i)<bordexizq
            eliminar=[eliminar,i];
        end
    end
    if YYnewizq(i)<YYnewizq(r)
        eliminar=[eliminar,i];
    else
        r=r+1;
        while sum(eliminar==r)==1
            r=r+1;
        end
    end
    dif=abs(XXnewizq(s)-XXnewizq(i));
    if dif>dif_x
        eliminar=[eliminar,i];
    else
        s=s+1;
        while sum(eliminar==s)==1
            s=s+1;
        end
    end
end
end

```



```

end
YYnewizq(eliminar)=[];
XXnewizq(eliminar)=[];
if a<camb_mask
    YYnewizq=[YYnewizq;bordeyizq];
    XXnewizq=[XXnewizq;bordexizq];
end
t=1;
eliminar2=[];
cont=1;
for i=2:length(YYnewizq)
    if a<fr_curva
        if XXnewizq(i)>XXnewizq(t)
            eliminar2=[eliminar2,i];
        else
            t=t+1;
            while sum(eliminar2==t)==1
                t=t+1;
            end
        end
    else
        if YYnewizq(i)>=y_ana_frcurva
            if cont==1
                t=i-1;
            end
            cont=cont+1;
            if XXnewizq(i)>XXnewizq(t)
                eliminar2=[eliminar2,i];
            else
                t=t+1;
                while sum(eliminar2==t)==1
                    t=t+1;
                end
            end
        end
    end
end
YYnewizq(eliminar2)=[];
XXnewizq(eliminar2)=[];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

XXnewder=[];
YYnewder=[];
posXXnewder=[];
XXcambio=max(XXnewizq);
for i=1:length(XX)
    if XX(i)>XXcambio
        XXnewder=[XXnewder;XX(i)];
        posXXnewder=[posXXnewder,i];
    end
end
YYnewder=YY(posXXnewder);

%figure(6);
%hold on;
%cla
%plot(XX,YY,'r-');
%plot(XXnewder,YYnewder,'b-')

```

```

%hold off;

posYY=[];
eliminar=[];
r=1;
s=1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
izq=0;
completa_mov_borde;
clearvars izq
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=2:length(YYnewder)
    if a<fr_borde || YYnewder(i)>y_ana_frborde
        if YYnewder(i)>bordeyder || XXnewder(i)>bordexder
            eliminar=[eliminar,i];
        end
    end
    if YYnewder(i)<=YYnewder(r)
        eliminar=[eliminar,i];
    else
        r=r+1;
        while sum(eliminar==r)==1
            r=r+1;
        end
    end
    dif=abs(XXnewder(s)-XXnewder(i));
    if dif>dif_x
        eliminar=[eliminar,i];
    else
        s=s+1;
        while sum(eliminar==s)==1
            s=s+1;
        end
    end
end
YYnewder(eliminar)=[];
XXnewder(eliminar)=[];
if a<camb_mask
    YYnewder=[YYnewder;bordeyder];
    XXnewder=[XXnewder;bordexder];
end
t=1;
eliminar2=[];
cont=1;
for i=2:length(YYnewder)
    if a<fr_curva
        if XXnewder(i)<XXnewder(t)
            eliminar2=[eliminar2,i];
        else
            t=t+1;
            while sum(eliminar2==t)==1
                t=t+1;
            end
        end
    else
        if YYnewder(i)>=y_ana_frcurva
            if cont==1
                t=i-1;
            end
            cont=cont+1;
            if XXnewder(i)<XXnewder(t)

```

```

        eliminar2=[eliminar2,i];
    else
        t=t+1;
        while sum(eliminar2==t)==1
            t=t+1;
        end
    end
end
end
YYnewder(eliminar2)=[];
XXnewder(eliminar2)=[];

%figure(6);
%hold on;
%cla
%title(num2str(a));
%plot(XX,YY,'r-');
%plot(XXnewder,YYnewder,'b-')
%plot(XXnewizq,YYnewizq,'g-')
%hold off;

% figure(7)
% imshow(img1,[ ])
% title(num2str(a));
% hold on
% plot(XXnewder,YYnewder,'b-')
% plot(XXnewizq,YYnewizq,'r-')
% hold off

YYnew0der=[];
XXnew0der=[];
dz=[];
R=[];
%RY=[];
deltaXder=0;
deltaYder=0;
deltaXder=XXnewder(1);
deltaYder=YYnewder(1);
YYnew0der=YYnewder-deltaYder;
XXnew0der=XXnewder-deltaXder;

for i=2:length(YYnew0der)
    dz(i-1)=YYnew0der(i)-YYnew0der(i-1);
    %R(i-1)=(XXnew0(i)+XXnew0(i-1))/2;
    %R(i-1)=XXnew0(i-1);
    R(i-1)=XXnew0der(i);
    %RY(i-1)=(YYnew0(i)+YYnew0(i-1))/2;
    %RY(i-1)=YYnew0(i-1);
    %%RY(i-1)=YYnew0der(i);
end

Volder=0;
for i=1:length(dz)
    Volder=Volder+pi*R(i)^2*dz(i);
end
Volumen_pxder=[Volumen_pxder,Volder];
Volumen_mmder=[Volumen_mmder,Volder*escala^3];

Acentdter=[];
```

```

ycentder=[];
xcentder=[];
centroideXder=0;
centroideYder=0;
for i=1:length(YYnew0der)-1
    Acentder(i)=(YYnew0der(i+1)-YYnew0der(i))*XXnew0der(i);
    ycentder(i)=(YYnew0der(i)+YYnew0der(i+1))/2;
    xcentder(i)=XXnew0der(i)/2;
end
centroideXder=sum(xcentder.*Acentder)./sum(Acentder);
centroideYder=sum(ycentder.*Acentder)./sum(Acentder);

YYnew0izq=[];
XXnew0izq=[];
dz=[];
R=[];
%RY=[];
deltaXizq=0;
deltaYizq=0;
deltaXizq=XXnewizq(1);
deltaYizq=YYnewizq(1);
YYnew0izq=YYnewizq-deltaYizq;
XXnew0izq=XXnewizq-deltaXizq;

for i=2:length(YYnew0izq)
    dz(i-1)=YYnew0izq(i)-YYnew0izq(i-1);
    %R(i-1)=(XXnew0(i)+XXnew0(i-1))/2;
    %R(i-1)=XXnew0(i-1);
    R(i-1)=XXnew0izq(i);    %%%Da valores negativos !!!!!
    %RY(i-1)=(YYnew0(i)+YYnew0(i-1))/2;
    %RY(i-1)=YYnew0(i-1);
    %%%RY(i-1)=YYnew0izq(i);
end
Acentizq=[];
ycentizq=[];
xcentizq=[];
for i=1:length(YYnew0izq)-1
    Acentizq(i)=(YYnew0izq(i+1)-YYnew0izq(i))*XXnew0izq(i);
    ycentizq(i)=(YYnew0izq(i)+YYnew0izq(i+1))/2;
    xcentizq(i)=XXnew0izq(i)/2;
end
centroideXizq=sum(xcentizq.*Acentizq)/sum(Acentizq);
centroideYizq=sum(ycentizq.*Acentizq)/sum(Acentizq);

centroideXref=(centroideXizq+centroideXder)/2; %solo para representar en
una gráfica con el contorno en 0,0
centroideYref=(centroideYizq+centroideYder)/2; %solo para representar en
una gráfica con el contorno en 0,0
Mcentroideref=[Mcentroideref;centroideXref,centroideYref];

centroideX=(centroideXizq+deltaXizq+centroideXder+deltaXder)/2;
centroideY=(centroideYizq+deltaYizq+centroideYder+deltaYder)/2;
Mcentroide=[Mcentroide;centroideX,centroideY];

% figure(9)
% title(num2str(a));
% hold on
% plot(centroideXref,centroideYref,'k*')
% plot(XXnew0izq,YYnew0izq,'r-')
% plot(XXnew0der,YYnew0der,'b-')

```

```

% plot(centroideXizq,centroideYizq,'r*')
% plot(centroideXder,centroideYder,'b*')
% hold off

figure(8)
imshow(img1,[])
title(num2str(a));
hold on
plot(XXnewder,YYnewder,'b-')
plot(XXnewizq,YYnewizq,'r-')
plot(centroideXizq+deltaXizq,centroideYizq+deltaYizq,'r*')
plot(centroideXder+deltaXder,centroideYder+deltaYder,'b*')
plot(centroidx,centroidey,'w*')
hold off

Volizq=0;
for i=1:length(dz)
    Volizq=Volizq+pi*R(i)^2*dz(i);
end
Volumen_pxizq=[Volumen_pxizq,Volizq];
Volumen_mmizq=[Volumen_mmizq,Volizq*escala^3];

%%Volumen como Rocío
VolRo=0;
VolRo=pi*trapz(YYnew0izq,XXnew0izq.^2);
VolumenRo=[VolumenRo,VolRo*escala^3];

T=[T,tt];
tt=tt+fps;

if fin-ini>=4
    diametro=abs(bordexder-bordexizq);
    diametro_mm=[diametro_mm,diametro*escala];
end

[FI,CI]=size(YYnewizq);
[FD,CD]=size(YYnewder);
contornoI(1:FI,:,cont_contorno)=[XXnewizq,YYnewizq];
contornoIref(1:FI,:,cont_contorno)=[XXnew0izq,YYnew0izq];
contornoD(1:FD,:,cont_contorno)=[XXnewder,YYnewder];
contornoDref(1:FD,:,cont_contorno)=[XXnew0der,YYnew0der];
cont_contorno=cont_contorno+1;

if paro==1 && tfparo==1;
    disp('PULSE CUALQUIER TECLA')
    pause;
else
    pause(0.1);
end
end

%%Volumen medio
Volumen_mmmmed=(Volumen_mmizq+Volumen_mmdr)/2;

[ajust,bondad] = interpolacion1(T,Volumen_mmmmed);
coef=[ajust.p1,ajust.p2];
R=bondad.rsquare;
xaj=polyval(coef,T);
caudalexp=coef(1)*60;
errorQ=abs((caudalexp-caudalteo)/caudalteo)*100;

```

```

a=linspace(ini,fin,pasos);

%%Tiempo de llenado
pasosllenado=ini-inilllenado;
allenado=linspace(inilllenado,ini-1,pasosllenado);
tinilllenado=-fps*pasosllenado;
tllenado=sort(-fps:-fps:tinilllenado);

radioequi=((Volumen_mmmmed*3)./(4*pi)).^(1/3)); %mm

%%Guardar variables
listguardarvar={'Sí','No'};
[opcguardarvar,tfguardarvar]=listdlg('ListSize',[430,40],'PromptString','Se
lecciona si desea guardar todas las
variables:','SelectionMode','single','ListString',listguardarvar);

if tfguardarvar==1 && opcguardarvar==1 && ini~=fin
carpg=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\',carpresult,'\'];
clearvars list0 opc0 tf0 nom listoper opcofer tfofer carpresult archcargar
dia
    %Guardamos las variables
    gvar=[carpg,'TODAS_1'];
    save(gvar);
end

```

8.1.3. Completa_parametros

```

function
[ini,fin,av_caj,pix_inf,camb_mask,fr_lado,dif_lado,fr_borde,fr_curva,y_ana_
frborde,dif_x,y_ana_frcurva,fps,caudalteo,inilllenado,regla]=completa_parametros(nom)
%Explicación parámetros
%ini=frame de inicio de análisis del video; fin=frame final de análisis del
%vídeo.
%-----
%-----
%av_caj=avance de la caja de análisis.
%-----
%-----
%pix_inf=pixel inferior o base de la burbuja.
%-----
%-----
%camb_mask=cambio de la máscara, es decir, de usar la función segmentImage2
%o segmentImage2v1 (para burbujas total o prácticamente desprendidas).
%-----
%fr_lado=frame ;;;ANTERIOR!!! al que ocurre un error en la detección de
%unique y pasa
%de izquierda a derecha.
%-----
%-----
%dif_lado=diferencia en valor absoluto de coordenada X para el caso en que
%ocurre un error en la detección de unique y pasa de izquierda a derecha.
%-----
%-----
%fr_borde=frame a partir (incluido) del que existen coordenadas X que están
%más a la
%izquierda o derecha que el punto que indica el borde.

```

```

%-----
%-----
%y_ana_frborde=coordenada Y en la que, aunque estemos en los frames en que
%existen coordenadas X en la parte superior mayores que el borde
%(fr_borde), se analiza si existen puntos fuera del borde a partir de esa
%Y.
%-----
%-----
%dif_x=diferencia máxima entre dos coordenadas X seguidas.
%-----
%-----
%fr_curva=frame en el que se inicia el movimiento de la línea de contacto,
%por tanto, tenemos valores de x inferiores/superiores en la parte inferior
%de la burbuja que en la parte superior.
%-----
%-----
%y_ana_frcurva=coordenada Y en la que, aunque estemos en los frames en que
%ha
%cambiado la curvatura y tenemos en la parte inferior coordX diferentes que
%en la superior (fr_curva), realizamos el ANÁLISIS para ver si existen
%coordenadas X
%menores o mayores que la, inmediatamente, anterior.
%-----
%-----
%fps=sabiendo en número de frame per second del vídeo podemos saber el paso
%de tiempo entre dos frame 1000 fps -> fps=1; 500 fps -> fps=2; 250 fps ->
%fps=4;
%-----
%-----
%caudalteo=caudal medido con el caudalímetro y que viene indicado en el
%vídeo
%-----
%-----
%inilllenado=primer frame en el video en el que la burbuja anterior a la
%analizada
%se desprende.
%-----
%-----
%regla=nombre de la imagen de calibración del vídeo.
%-----
%-----

switch nom
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_1\'
        ini=290; fin=1074; av_caj=1; pix_inf=820; camb_mask=1073;
fr_lado=1060; dif_lado=200; fr_borde=1060; fr_curva=1060;
y_ana_frborde=780; dif_x=150; y_ana_frcurva=760; fps=2;
        caudalteo=10; inilllenado=2; regla='calib_d16000001.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_1\'
        ini=45; fin=672; av_caj=2; pix_inf=875; camb_mask=672;
fr_lado=667; dif_lado=200; fr_borde=668; fr_curva=658;
y_ana_frborde=840; dif_x=150; y_ana_frcurva=840; fps=2;
        caudalteo=10; inilllenado=2; regla='calib_d_10000001.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_2_1\';
    ini=55; fin=270; av_caj=4; pix_inf=874; camb_mask=270;
fr_lado=267; dif_lado=200; fr_borde=269; fr_curva=262;
y_ana_frborde=840; dif_x=150; y_ana_frcurva=840; fps=4;
    caudalteo=10; inilllenado=2; regla='calib_d_10000001.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_2_2\';
    ini=327; fin=538; av_caj=4; pix_inf=872; camb_mask=538;
fr_lado=535; dif_lado=200; fr_borde=536; fr_curva=531;
y_ana_frborde=840; dif_x=150; y_ana_frcurva=840; fps=4;
    caudalteo=10; inilllenado=270; regla='calib_d_10000001.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_2_3\';
    ini=597; fin=806; av_caj=6; pix_inf=874; camb_mask=806;
fr_lado=803; dif_lado=200; fr_borde=805; fr_curva=798;
y_ana_frborde=840; dif_x=150; y_ana_frcurva=840; fps=4;
    caudalteo=10; inilllenado=538; regla='calib_d_10000001.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_2_1\';
    ini=107; fin=400; av_caj=6; pix_inf=821; camb_mask=400;
fr_lado=396; dif_lado=200; fr_borde=397; fr_curva=395;
y_ana_frborde=790; dif_x=150; y_ana_frcurva=790; fps=4;
    caudalteo=10; inilllenado=2; regla='calib_d16000001.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_2_2\';
    ini=505; fin=798; av_caj=6; pix_inf=821; camb_mask=798;
fr_lado=794; dif_lado=200; fr_borde=796; fr_curva=792;
y_ana_frborde=790; dif_x=150; y_ana_frcurva=790; fps=4;
    caudalteo=10; inilllenado=400; regla='calib_d16000001.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_3\';
    ini=230; fin=992; av_caj=2; pix_inf=990; camb_mask=992;
fr_lado=985; dif_lado=200; fr_borde=986; fr_curva=981;
y_ana_frborde=904; dif_x=150; y_ana_frcurva=904; fps=2;
    caudalteo=10; inilllenado=2; regla='d_16_lente_1_burb_3_4_5.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_1a\';
    ini=150; fin=803; av_caj=2; pix_inf=940; camb_mask=803;
fr_lado=796; dif_lado=200; fr_borde=797; fr_curva=792;
y_ana_frborde=904; dif_x=150; y_ana_frcurva=904; fps=2;
    caudalteo=10; inilllenado=3; regla='calib_20_a.tif';

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_3\';
        ini=500; fin=1804; av_caj=4; pix_inf=990; camb_mask=1804;
fr_lado=1800; dif_lado=200; fr_borde=1801; fr_curva=1798;
y_ana_frborde=895; dif_x=150; y_ana_frcurva=895; fps=4;
        caudalteo=3.4; inilllenado=2; regla='d_20_lente_1_burb_3_4_5.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_4\';
        ini=350; fin=1649; av_caj=4; pix_inf=990; camb_mask=1649;
fr_lado=1642; dif_lado=200; fr_borde=1643; fr_curva=1638;
y_ana_frborde=922; dif_x=150; y_ana_frcurva=922; fps=2;
        caudalteo=8; inilllenado=2; regla='d_20_lente_1_burb_3_4_5.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_5\';
        ini=350; fin=1667; av_caj=4; pix_inf=990; camb_mask=1667;
fr_lado=1661; dif_lado=200; fr_borde=1662; fr_curva=1657;
y_ana_frborde=930; dif_x=150; y_ana_frcurva=930; fps=2;
        caudalteo=8; inilllenado=2; regla='d_20_lente_1_burb_3_4_5.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_1\';
        ini=30; fin=406; av_caj=6; pix_inf=974; camb_mask=406;
fr_lado=404; dif_lado=200; fr_borde=405; fr_curva=398;
y_ana_frborde=930; dif_x=150; y_ana_frcurva=930; fps=4;
        caudalteo=5; inilllenado=2; regla='d_8_lente_1_burb_1_2_3_4.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_2\';
        ini=440; fin=810; av_caj=6; pix_inf=974; camb_mask=810;
fr_lado=808; dif_lado=200; fr_borde=809; fr_curva=802;
y_ana_frborde=940; dif_x=150; y_ana_frcurva=940; fps=4;
        caudalteo=5; inilllenado=406; regla='d_8_lente_1_burb_1_2_3_4.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_3\';
        ini=845; fin=1215; av_caj=6; pix_inf=974; camb_mask=1215;
fr_lado=1212; dif_lado=200; fr_borde=1213; fr_curva=1207;
y_ana_frborde=940; dif_x=150; y_ana_frcurva=940; fps=4;
        caudalteo=5; inilllenado=810; regla='d_8_lente_1_burb_1_2_3_4.tif';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_3\';

```

8.1.4. Completa_mov_borde

153

```

        bordexder=bordexder-1;
    end
    if a>=665 && a<667
        bordexder=bordexder-3;
    end
    if a>=667 && a<=669
        bordexder=bordexder-17;
    end
    if a>=670 && a<=671
        bordexder=bordexder-36;
    end
end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_2_1\';
    if izq==1
        if a>=264 && a<267
            bordexizq=bordexizq+5;
        end
        if a>=267 && a<269
            bordexizq=bordexizq+29;
        end
        if a>=269 && a<270
            bordexizq=bordexizq+47;
        end
    else
        if a>=264 && a<267
            bordexder=bordexder-5;
        end
        if a>=267 && a<269
            bordexder=bordexder-26;
        end
        if a>=269 && a<270
            bordexder=bordexder-48;
        end
    end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_2_2\';
    if izq==1
        if a>=530 && a<535
            bordexizq=bordexizq+5;
        end
        if a>=535 && a<536
            bordexizq=bordexizq+24;
        end
        if a>=536 && a<537
            bordexizq=bordexizq+34;
        end
        if a>=537 && a<538
            bordexizq=bordexizq+42;
        end
    else
        if a>=533 && a<535
            bordexder=bordexder-5;
        end
        if a>=535 && a<536
            bordexder=bordexder-10;
        end
        if a>=536 && a<538
            bordexder=bordexder-37;
        end
        if a>=537 && a<538

```

```
        bordexder=bordexder-40;
    end
end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_10_lente_1_burb_2_3\';
    if izq==1
        if a>=800 && a<803
            bordexizq=bordexizq+6;
        end
        if a>=803 && a<804
            bordexizq=bordexizq+20;
        end
        if a>=804 && a<806
            bordexizq=bordexizq+39;
        end
    else
        if a>=800 && a<806
            bordexder=bordexder-5;
        end
        if a>=803 && a<804
            bordexder=bordexder-10;
        end
        if a>=804 && a<806
            bordexder=bordexder-32;
        end
    end
end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_16_lente_1_burb_2_1\';
    if izq==1
        if a>=383 && a<389
            bordexizq=bordexizq+8;
        end
        if a>=389 && a<395
            bordexizq=bordexizq+9;
        end
        if a>=395 && a<398
            bordexizq=bordexizq+24;
        end
        if a>=398 && a<399
            bordexizq=bordexizq+32;
        end
        if a>=399 && a<400
            bordexizq=bordexizq+52;
        end
    else
        if a>=383 && a<389
            bordexder=bordexder-4;
        end
        if a>=389 && a<396
            bordexder=bordexder-10;
        end
        if a>=396 && a<398
            bordexder=bordexder-24;
        end
        if a>=398 && a<399
            bordexder=bordexder-34;
        end
        if a>=399 && a<400
            bordexder=bordexder-52;
        end
    end
end
```

```
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_2_2\';
    if izq==1
        if a>=780 && a<798
            bordexizq=bordexizq+7;
        end
        if a>=791 && a<795
            bordexizq=bordexizq+11;
        end
        if a>=795 && a<797
            bordexizq=bordexizq+25;
        end
        if a>=797 && a<798
            bordexizq=bordexizq+40;
        end
    else
        if a>=781 && a<791
            bordexder=bordexder-5;
        end
        if a>=791 && a<795
            bordexder=bordexder-17;
        end
        if a>=795 && a<797
            bordexder=bordexder-29;
        end
        if a>=797 && a<798
            bordexder=bordexder-50;
        end
    end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_3\';
    if izq==1
        if a>=967 && a<978
            bordexizq=bordexizq+6;
        end
        if a>=978 && a<984
            bordexizq=bordexizq+8;
        end
        if a>=984 && a<987
            bordexizq=bordexizq+15;
        end
        if a>=987 && a<990
            bordexizq=bordexizq+20;
        end
        if a>=990 && a<991
            bordexizq=bordexizq+36;
        end
        if a>=991 && a<992
            bordexizq=bordexizq+42;
        end
    else
        if a>=967 && a<978
            bordexder=bordexder-4;
        end
        if a>=978 && a<984
            bordexder=bordexder-10;
        end
        if a>=984 && a<987
            bordexder=bordexder-15;
        end
        if a>=987 && a<990
```

```
        bordexder=bordexder-20;
    end
    if a>=990 && a<991
        bordexder=bordexder-39;
    end
    if a>=991 && a<992
        bordexder=bordexder-48;
    end
end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_1a\'
    if izq==1
        if a>=760 && a<785
            bordexizq=bordexizq+2;
        end
        if a>=785 && a<796
            bordexizq=bordexizq+10;
        end
        if a>=796 && a<800
            bordexizq=bordexizq+16;
        end
        if a>=800 && a<801
            bordexizq=bordexizq+34;
        end
        if a>=801 && a<803
            bordexizq=bordexizq+44;
        end
    else
        if a>=773 && a<785
            bordexder=bordexder-2;
        end
        if a>=785 && a<796
            bordexder=bordexder-6;
        end
        if a>=796 && a<800
            bordexder=bordexder-18;
        end
        if a>=800 && a<802
            bordexder=bordexder-28;
        end
        if a>=802 && a<803
            bordexder=bordexder-44;
        end
    end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_3\'
    if izq==1
        if a>=1700 && a<1760
            bordexizq=bordexizq+1;
        end
        if a>=1780 && a<1790
            bordexizq=bordexizq+5;
        end
        if a>=1790 && a<1798
            bordexizq=bordexizq+8;
        end
        if a>=1798 && a<1800
            bordexizq=bordexizq+12;
        end
        if a>=1800 && a<1802
            bordexizq=bordexizq+28;
        end
    end
end
```

```

end
if a>=1802 && a<1803
    bordexizq=bordexizq+56;
end
if a>=1803 && a<1804
    bordexizq=bordexizq+66;
end
else
    if a>=1700 && a<1760
        bordexder=bordexder-1;
    end
    if a>=1780 && a<1790
        bordexder=bordexder-2;
    end
    if a>=1790 && a<1798
        bordexder=bordexder-6;
    end
    if a>=1798 && a<1802
        bordexder=bordexder-24;
    end
    if a>=1802 && a<1803
        bordexder=bordexder-56;
    end
    if a>=1803 && a<1804
        bordexder=bordexder-66;
    end
end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_4\'
    if izq==1
        if a>=1500 && a<1626
            bordexizq=bordexizq+1;
        end
        if a>=1626 && a<1640
            bordexizq=bordexizq+4;
        end
        if a>=1640 && a<1643
            bordexizq=bordexizq+14;
        end
        if a>=1643 && a<1646
            bordexizq=bordexizq+19;
        end
        if a>=1646 && a<1649
            bordexizq=bordexizq+23;
        end
    else
        if a>=1530 && a<1630
            bordexder=bordexder-1;
        end
        if a>=1630 && a<1643
            bordexder=bordexder-6;
        end
        if a>=1642 && a<1648
            bordexder=bordexder-22;
        end
        if a>=1648 && a<1649
            bordexder=bordexder-24;
        end
    end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_1_burb_5\'

```

```

if izq==1
    if a>=1540 && a<1640
        bordexizq=bordexizq+1;
    end
    if a>=1640 && a<1650
        bordexizq=bordexizq+4;
    end
    if a>=1650 && a<1660
        bordexizq=bordexizq+8;
    end
    if a>=1660 && a<1664
        bordexizq=bordexizq+14;
    end
    if a>=1664 && a<1666
        bordexizq=bordexizq+24;
    end
    if a>=1666 && a<1667
        bordexizq=bordexizq+34;
    end
else
    if a>=1560 && a<1650
        bordexder=bordexder-1;
    end
    if a>=1650 && a<1660
        bordexder=bordexder-8;
    end
    if a>=1660 && a<1664
        bordexder=bordexder-16;
    end
    if a>=1664 && a<1666
        bordexder=bordexder-24;
    end
    if a>=1666 && a<1667
        bordexder=bordexder-34;
    end
end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_1\'
    if izq==1
        if a>=403 && a<406
            bordexizq=bordexizq+7;
        end
    else
        if a>=403 && a<406
            bordexder=bordexder-7;
        end
    end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_2\'
    if izq==1
        if a>=807 && a<810
            bordexizq=bordexizq+8;
        end
    else
        if a>=807 && a<810
            bordexder=bordexder-8;
        end
    end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_1_burb_1_3\'
    if izq==1

```



```

        if a>=1210 && a<1214
            bordexizq=bordexizq+6;
        end
        if a>=1214 && a<1215
            bordexizq=bordexizq+24;
        end
    else
        if a>=1210 && a<1214
            bordexder=bordexder-6;
        end
        if a>=1214 && a<1215
            bordexder=bordexder-20;
        end
    end
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_8_lente_1_burb_3\'
        if izq==1
            if a>=1067 && a<1070
                bordexizq=bordexizq+5;
            end
            if a>=1070 && a<1072
                bordexizq=bordexizq+15;
            end
        else
            if a>=1067 && a<1070
                bordexder=bordexder-5;
            end
            if a>=1070 && a<1072
                bordexder=bordexder-15;
            end
        end
    end
end
end

```

8.1.5. Completa_graficas

```

switch opcoper
    case 3
        %%Caudal con la pendiente de la curva de volumen
        res0='-----
        -----';
        res0=['El caudal obtenido a partir de las imágenes es:
        ',num2str(caudalexp),' ml/min siendo el caudal medido con el ',...
        'caudalímetro ',num2str(caudalteo) ' ml/min, por tanto, existe un error
        de ',num2str(errorQ),' %.'];
        res7=['El coeficiente R de ajuste es: ',num2str(R)];
        disp(res0);
        disp(res0);
        disp(res7);
        disp(res0);
        if fin>=camb_mask
            %%Volumen de Fritz
            %%Propiedades fluidos
            tens=72e-3;
            rho=998;
            g=9.81;

            %En dia si estamos analizando vídeos de 10, 16, 20 mm tenemos que poner +2
            %y +3 pero si analizamos vídeos de 8 mm tenemos que poner +2 y +2.
            dia=str2double(nom(find(nom=='d', 1, 'last') +2:find(nom=='d', 1, 'last')
            )+2))*1e-3;
            diarealvar=[];

```

```

clearvars nombre xcal ycal distpix

for i=1:10
    nombre=[nom,num2str(inilllenado),'.tif'];
    imgdia=imread(nombre);
    figure(100)
    imshow(imgdia)
    titdia=['Seleccione el diámetro de la superficie de Nerverwet.
',num2str(i), '/10'];
    title(titdia)
    [xcal,ycal]=ginput(2); %Matriz 2x2 formada por 2 vectores:
    xcal=round(xcal); %coordenada r de las dos esquinas opuestas,pix
    ycal=round(ycal); %coordenada z de las dos esquinas opuestas,pix
    distpix=abs(xcal(1)-xcal(2));
    diarealvar=[diarealvar,distpix*escala];
    close(ffigure(100))
end
close(ffigure(100))
diareal=mean(diarealvar)*1e-3;

% % if dia==8e-3
% %     diareal=0.008127323481117; % 8 mm burb 1
% %     %diareal=0.008033087705322; % 8 mm burb 3
% % end
% % if dia==10e-3
% %     diareal=0.009885786888869; % 10 mm
% % end
% % if dia==16e-3
% %     %diareal=0.015972481620298; % 16 mm
% %     %diareal=0.015201808266361; % 16 mm burb 3
% % end
% % if dia==20e-3
% %     %diareal=0.017470959941741; % 20 mm 1a
% %     diareal=0.020074871025670; % 20 mm 3
% % end

diaeq=(( (Volumen_mmmmed(length(Volumen_mmmmed))*3)/(4*pi))^(1/3))*2/1000;
diamax=max(diametro_mm)/1000;

volfin=Volumen_mmmmed(length(Volumen_mmmmed));
volFritzN=(2*pi*tens*(diareal/2))/(rho*g)*10^9;
volFritzM=(2*pi*tens*(diamax/2))/(rho*g)*10^9;

difN=abs((volfin-volFritzN)/volfin)*100;
difM=abs((volfin-volFritzM)/volfin)*100;

res1=['El volumen final de la burbuja en el desprendimiento es:
',num2str(volfin),' mm^3'];
res2=['El volumen de Fritz suponiendo un diámetro máximo nominal de
',num2str(diareal*1000),' mm es de ',num2str(volFritzN),' mm^3.'];
res3=['El volumen de Fritz suponiendo un diámetro máximo de
',num2str(diamax*1000),' mm es de ',num2str(volFritzM),' mm^3.'];
res4=['Diámetro equivalente de ',num2str(diaeq*1000),' mm.'];
res5=['La diferencia relativa respecto al volumen analizado para diámetro
máximo de ',num2str(diareal*1000),' mm es de ',num2str(difN),' %'];
res6=['La diferencia relativa respecto al volumen analizado para diámetro
máximo real de ',num2str(diamax*1000),' mm es de ',num2str(difM),' %'];
disp(res00);
mismalineas=['Diámetro ',num2str(dia*1e3),' mm.'];
disp(mismalineas);

```

```

disp(res1);
disp(res2);
disp(res3);
disp(res4);
disp(res5);
disp(res6);
end
disp(res00);
carpg=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\',carpresult,'\'];
titulodat=[carpg, 'Calculos_',carpresult, '.dat'];
fid=fopen(titulodat, 'w');
fprintf(fid, '%s\r\n', res0, res7, res00, mismalinea, res1, res2, res3, res4, res5, res6, res00);
fclose(fid);
case 2
%%Si queremos añadir gráficas siempre al final, a partir de la 18
figure(10)
hold on;
title('Altura en función del tiempo', 'FontSize', 14);
plot(T, altura_mm, 'o');
ylabel('Altura (mm)', 'FontSize', 14); xlabel('Tiempo (ms)', 'FontSize', 14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

figure(11)
hold on;
title('Volumen en función del tiempo V2(trapz)', 'FontSize', 14);
plot(T, VolumenRo, 'o');
ylabel('Volumen (mm^3)', 'FontSize', 14); xlabel('Tiempo (ms)', 'FontSize', 14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

figure(12)
hold on;
title('Volumen en función del tiempo derecha', 'FontSize', 14);
plot(T, Volumen_mmder, 'o');
ylabel('Volumen (mm^3)', 'FontSize', 14); xlabel('Tiempo (ms)', 'FontSize', 14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

figure(13)
hold on;
title('Volumen en función del tiempo izquierda', 'FontSize', 14);
plot(T, Volumen_mmizq, 'o');
ylabel('Volumen (mm^3)', 'FontSize', 14); xlabel('Tiempo (ms)', 'FontSize', 14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

figure(14)

```

```

hold on;
title('Volumen medio en función del tiempo','FontSize',14);
plot(T,Volumen_mmmmed,'o');
plot(T,xaj,'r-');
ylabel('Volumen (mm^3)','FontSize',14); xlabel('Tiempo
(ms)','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
legend('Volumen medio','Ajuste lineal','Location','southeast');
lgd.FontSize =11;
box on;
grid on;
hold off;

Errortrapz=(Volumen_mmizq-VolumenRo)./Volumen_mmizq*100;
figure(15)
hold on;
title('Error entre rectángulos y trapz (izquierda)','FontSize',14);
plot(a>Errortrapz,'o');
ylabel('Error (%)','FontSize',14); xlabel('Imagen','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

Error=abs(Volumen_mmizq-Volumen_mmderr)./Volumen_mmizq*100;
figure(16)
hold on;
title('Error entre volumen izq y der','FontSize',14);
plot(a>Error,'o');
ylabel('Error (%)','FontSize',14); xlabel('Imagen','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

%%Variación temporal de la altura y el radio cerca del orificio
velocidad_h=zeros(length(altura_mm),1);
velocidad_h(1)=(altura_mm(2)-altura_mm(1))/fps;
velocidad_h(length(altura_mm))=(altura_mm(length(altura_mm))-
altura_mm(length(altura_mm)-1))/fps;
velocidad_h(2:length(altura_mm)-1)=(altura_mm(3:length(altura_mm))-
altura_mm(1:length(altura_mm)-2))/(2*fps);

aceleracion_h=zeros(length(velocidad_h),1);
aceleracion_h(1)=(velocidad_h(2)-velocidad_h(1))/fps;
aceleracion_h(length(velocidad_h))=(velocidad_h(length(velocidad_h))-
velocidad_h(length(velocidad_h)-1))/fps;
aceleracion_h(2:length(velocidad_h)-1)=(velocidad_h(3:length(velocidad_h))-
velocidad_h(1:length(velocidad_h)-2))/(2*fps);

figure(17)
hold on;
title('Velocidad altura','FontSize',14)
plot(T,velocidad_h,'o');
ylabel('Velocidad (mm/ms)','FontSize',14); xlabel('Tiempo
(ms)','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

```

```

figure(18)
hold on;
title('Aceleración altura','FontSize',14)
plot(T,aceleracion_h,'o');
ylabel('Aceleración (mm/ms^2)','FontSize',14); xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

figure(19)
hold on;
title('Diámetro línea de contacto en función del tiempo','FontSize',14);
plot(T,diametro_mm,'o');
ylabel('Diámetro (mm)','FontSize',14); xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

figure(20)
hold on;
title('Radio equivalente en función del tiempo','FontSize',14);
plot(T,radioequi,'o');
ylabel('Diámetro (mm)','FontSize',14); xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

figure(21)
hold on;
title('Posición del centroide','FontSize',14);
plot(Mcentroide0_mm(:,1),Mcentroide0_mm(:,2),'o');
ylabel('Posición Y (mm)','FontSize',14); xlabel('Posición X (mm)','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;

figure(22)
hold on;
title('Posición del centroide en función del tiempo','FontSize',14);
plot(T,Mcentroide0_mm(:,1),'*r');
plot(T,Mcentroide0_mm(:,2),'ob');
ylabel('Posición centroide (mm)','FontSize',14); xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',14);
legend('Posición Xc','Posición Yc','Location','northwest');
set(gca, 'fontsize', 12)
box on;
grid on;
hold off;
end

```

8.1.6. Completa_guardar

```

%load('G:\Mi unidad\TFG\TFG Memoria\Gráficas_Originales\Gráficas d16\Burb
completa seguridad\TODAS_1.mat')
%nom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_1\';
%carpresult='Resultados_d16_Burb_completa_1';

% switch nom
%     case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_1_burb_1\'
%         carpresult='Resultados_d16_Burb_completa_1';
%     case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_10_lente_1_burb_1\'
%         carpresult='Resultados_d10_Burb_completa_1';
% end

carpg=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\',carpresult,'\'];

listguardar={'Guardar gráficas','Guardar archivo de datos','Todo'};
[opcguardar,tfguardar]=listdlg('ListSize',[280,50],'PromptString','Seleccio
ne si desea guardar el archivo de
datos:','SelectionMode','single','ListString',listguardar);
if tfguardar==1
    if (opcguardar==1 || opcguardar==3) && ishandle(10)==1
        %Título de las gráficas o figuras que se obtienen en el
programa
        %completa_graficas, son las figuras de la 10 a la 18; si
hacemos más
        %gráficas habrá que añadirlas aquí, siempre al final del
vector.

titulograf=char('Altura_tiempo','Volumen_trapz_izquierda','Volumen_derecha'
,'Volumen_izquierda',...

'Volumen_media','Error_Volizq_Voltrapz','Error_Volizq_Volder','Velocidad_al
tura','Aceleracion_altura',...

'Diametro_inferior','Radio_equivalente','Centroide','Centroide_tiempo');
[fg,cg]=size(titulograf);
for i=1:fg
    espq=find(titulograf(i,:)==' ', 1, 'first' );
    carpresg=titulograf(i,:);
carpresg(espq:length(carpresg))=[];
    filename=[carpg,carpresg];
    saveas(figure(i+9),filename);
    saveas(figure(i+9),filename,'jpg');
end
else
    disp('No se han guardado las gráficas.')
end
if opcguardar==2 || opcguardar==3
    %La matriz M son los datos que se guardan en el .dat, podemos
%crear otra matriz, siempre debemos situar los datos ordenados
%en filas. Primer número distancia desde la izquierda del folio
%y segundo número, decimales

titulodat=[carpg,'frame_t_Vb_Xc_Yc_Req_Df_h_',carpresult,'.dat'];

```

```

Mllenado=[allenido;(tllenado)*1e-
3;zeros(1,length(allenido));zeros(1,length(allenido));zeros(1,length(allenido));zeros(1,length(allenido));zeros(1,length(allenido))];
Mresto=[a;(T)*1e-3;Volumen_mmmmed*1e-9;Mcentroide0_mm'*1e-
3;radioequi*1e-3;diametro_mm*1e-3;altura_mm*1e-3];
M=[Mllenado,Mresto];
fid=fopen(titulodat,'w');
fprintf(fid,'%6d %8.4f %18.10e %16.4e %12.4e %16.4e %18.4e
%20.6e\r\n',M);
fclose(fid);
else
    disp('No se ha guardado el archivo.')
end
else
    disp('No se guardará nada')
end
end

```

8.1.7. Completa_correccion

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% MODIFICACIÓN DE TODOS LOS VALORES AFECTADOS POR LA ESCALA %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
escalavar=[];
for i=1:10
    nombrecalib=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\' ,regla];
    imgcalib=imread(nombrecalib);
    figure(1)
    imshow(imgcalib)
    titcalib=['Seleccione la distancia a calibrar. ',num2str(i), '/10'];
    title(titcalib)
    [xcal,ycal]=ginput(2); %Matriz 2x2 formada por 2 vectores:
    xcal=round(xcal); %coordenada r de las dos esquinas opuestas,pix
    ycal=round(ycal); %coordenada z de las dos esquinas opuestas,pix
    distpix=abs(xcal(1)-xcal(2));
    distmm=input('Introduzca la equivalencia en milímetros: ');
    escalavar=[escalavar,distmm/distpix];
    close(figure(1));
end
escala2=mean(escalavar);

disp(['La escala antigua es: ',num2str(escala,'%10f')])
disp(['La escala nueva es: ',num2str(escala2,'%10f')])
disp('PULSE')
pause;
altura_mm=altura_mm/escala*escala2;
Volumen_mmdr=Volumen_mmdr/escala^3*escala2^3;
Volumen_mmizq=Volumen_mmizq/escala^3*escala2^3;
Volumen_mmmmed=(Volumen_mmizq+Volumen_mmdr)/2;
VolumenRo=VolumenRo/escala^3*escala2^3;
diametro_mm=diametro_mm/escala*escala2;
[ajust,bondad] = interpolacion1(T,Volumen_mmmmed);
coef=[ajust.p1,ajust.p2];
R=bondad.rsquare;
xaj=polyval(coef,T);
caudalex=coef(1)*60;
errorQ=abs((caudalex-caudalteo)/caudalteo)*100;
radioequi=((Volumen_mmmmed*3)/(4*pi)).^(1/3);
escala_mal=escala;
escala=escala2;

```

```

save(archcargar,'escala','escala_mal','altura_mm','Volumen_mmder',...
'Volumen_mmizq','Volumen_mmmmed','VolumenRo','diametro_mm','radioequi','ajus
t',...
'bondad','coef','R','xaj','caudalexp','errorQ','-append');
%'escalavar',

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% CORRECCIÓN DEL CENTROIDE %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nombrecent=[nom,num2str(camb_mask-1),'.tif'];
imgcent=imread(nombrecent);

cero=zeros(1,10);
for i=1:10
    figure(1)
    tit0=['Seleccione la distancia a calibrar. ',num2str(i),'/10'];
    title(tit0)
    imshow(imgcent)
    [x0,~]=ginput(2);
    cero(i)=round(x0(1)+x0(2))/2;
close(1);
end
y0=pix_inf;
x0=mean(cero);

Mcentroide0=[Mcentroide(:,1)-x0,y0-Mcentroide(:,2)];
Mcentroide0_mm=Mcentroide0*escala;
Mcentroide_mm=Mcentroide*escala;

save(archcargar,'x0','y0','Mcentroide0','Mcentroide0_mm','Mcentroide_mm','-
append');

```

8.1.8. Completa_comparacion

```

if (opcb==1) || (opcb==2) || (opcb==3) || (opcb==4)
archcargar=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\',carpresult,'\TODAS_1.mat'];
load(archcargar);
tens=72e-3;
rho=998;
g=9.81;
if contcomp==1
    switch opcb %%Diámetros superficie de Neverwet
    case 1 % 8 mm
        D_nominal=[0.008127323481117,0.008033087705322];
        Dg=8;
    case 2 % 10 mm
        D_nominal=0.009885786888869;
        Dg=10;
    case 3 % 16 mm
        D_nominal=[0.015972481620298,0.015201808266361];
        Dg=16;
    case 4 % 20 mm
        Dg=20;
        D_nominal=0.020074871025670; %0.017470959941741,
    end
    D_nominal_medio=mean(D_nominal);
    D_nominal_desv=std(D_nominal);
    V_fritz_nominal=(2*pi*tens*(D_nominal./2))./(rho*g);

```



```

V_fritz_nominal_medio=mean(V_fritz_nominal);
V_fritz_nominal_desv=std(V_fritz_nominal);
if (opcb==4) %%%|| (opcb==3)
    D_real=zeros(1,fcomp-1);
    V=zeros(1,fcomp-1);
    V_fritz_real=zeros(1,fcomp-1);
else
    D_real=zeros(1,fcomp);
    V=zeros(1,fcomp);
    V_fritz_real=zeros(1,fcomp);
end
end
D_real(contcomp)=max(diametro_mm)/1000;
V(contcomp)=Volumen_mmmed(length(Volumen_mmmed))*1e-9;
V_fritz_real(contcomp)=(2*pi*tens*(D_real(contcomp)./2))./(rho*g);
ERV(contcomp)=4*pi*(radioequi(end))^2*1*escala*1e-9;
R_equiv(contcomp)=radioequi(end)*1e-3;
if length(D_real)==contcomp
    D_real_medio=mean(D_real);
    D_real_desv=std(D_real);
    V_medio=mean(V);
    V_desv=std(V);
    V_fritz_real_medio=mean(V_fritz_real);
    V_fritz_real_desv=std(V_fritz_real);
    ERVmed=mean(ERV);
    R_equivmed=mean(R_equiv);
    R_equivdesv=std(R_equiv);

    listgcomp={'Guardar variables','Guardar archivo'};

[opcgcomp,tfgcomp]=listdlg('ListSize',[220,40],'PromptString','Seleccione
qué desea
guardar:','SelectionMode','single','InitialValue',1,'ListString',listgcomp)
;
    if tfgcomp==1
        archcomparacion0='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados_Completa_Comparacion\';
        switch opcgcomp
            case 1
                archcomparacion=[archcomparacion0,num2str(Dg)];

save(archcomparacion,'D_nominal','D_nominal_desv','D_nominal_medio','D_real
','D_real_desv',...

'D_real_medio','V','V_desv','V_fritz_nominal','V_fritz_nominal_desv','V_fri
tz_nominal_medio',...

'V_fritz_real','V_fritz_real_desv','V_fritz_real_medio','V_medio','Dg','ten
s','rho','g','archcargar');

save(archcomparacion,'ERV','ERVmed','R_equiv','R_equivmed','R_equivdesv','-'
append');
            case 2

titulocomp=[archcomparacion0,'DNmed_DNdesv_Drealmed_Drealdesv_Requivmed_Re
quivdesv_Vm_Vdesv_VfritzN_VfritzNdesv_VfritzReal_VfritzRealdesv.dat'];

Mcomp=[D_nominal_medio,D_nominal_desv,D_real_medio,D_real_desv,R_equivmed,R
_equivdesv,V_medio,V_desv,V_fritz_nominal_medio,...

V_fritz_nominal_desv,V_fritz_real_medio,V_fritz_real_desv];

```

```

        fidcomp=fopen(titulocomp,'a');
        fprintf(fidcomp,'%6.4e %12.5e %12.4e %12.5e %12.4e %12.5e
%18.10e %18.11e %18.10e %18.11e %18.10e %18.11e\r\n',Mcomp);
        fclose(fidcomp);

        titulocomp2=[archcomparacion0,'Vdesv_Error.dat'];
        Mcomp2=[V_desv,ERVmed];
        fidcomp=fopen(titulocomp2,'a');
        fprintf(fidcomp,'%6.6e %12.6e\r\n',Mcomp2);
        fclose(fidcomp);

    end
end
end
contcomp=contcomp+1;
end
if opcb==5
    DN_graf=cell(1,4);
    DR_graf=cell(1,4);
    DNmed_graf=cell(1,4);
    DRmed_graf=cell(1,4);
    DNdesv_graf=cell(1,4);
    DRdesv_graf=cell(1,4);
    V_graf=cell(1,4);
    Vmed_graf=cell(1,4);
    Vdesv_graf=cell(1,4);
    VFN_graf=cell(1,4);
    VFNmed_graf=cell(1,4);
    VFNdesv_graf=cell(1,4);
    VFR_graf=cell(1,4);
    VFRmed_graf=cell(1,4);
    VFRdesv_graf=cell(1,4);
    Req_graf=cell(1,4);
    Reqmed_graf=cell(1,4);
    Reqdesv_graf=cell(1,4);

    load('G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados_Completa_Comparacion\8.mat');
    DN_graf{1}=D_nominal; DR_graf{1}=D_real; DNmed_graf{1}=D_nominal_medio;
    DRmed_graf{1}=D_real_medio; DNdesv_graf{1}=D_nominal_desv;
    DRdesv_graf{1}=D_real_desv;
    V_graf{1}=V; Vmed_graf{1}=V_medio; VFN_graf{1}=V_fritz_nominal;
    VFNmed_graf{1}=V_fritz_nominal_medio; Vdesv_graf{1}=V_desv;
    VFNdesv_graf{1}=V_fritz_nominal_desv; VFRdesv_graf{1}=V_fritz_real_desv;
    VFR_graf{1}=V_fritz_real; VFRmed_graf{1}=V_fritz_real_medio;
    Req_graf{1}=R_equiv; Reqmed_graf{1}=R_equivmed;
    Reqdesv_graf{1}=R_equivdesv;
    load('G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados_Completa_Comparacion\10.mat');
    DN_graf{2}=D_nominal; DR_graf{2}=D_real; DNmed_graf{2}=D_nominal_medio;
    DRmed_graf{2}=D_real_medio; DNdesv_graf{2}=D_nominal_desv;
    DRdesv_graf{2}=D_real_desv;
    V_graf{2}=V; Vmed_graf{2}=V_medio; VFN_graf{2}=V_fritz_nominal;
    VFNmed_graf{2}=V_fritz_nominal_medio; Vdesv_graf{2}=V_desv;
    VFNdesv_graf{2}=V_fritz_nominal_desv; VFRdesv_graf{2}=V_fritz_real_desv;
    VFR_graf{2}=V_fritz_real; VFRmed_graf{2}=V_fritz_real_medio;
    Req_graf{2}=R_equiv; Reqmed_graf{2}=R_equivmed;
    Reqdesv_graf{2}=R_equivdesv;
    load('G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados_Completa_Comparacion\16.mat');

```

```

DN_graf{3}=D_nominal; DR_graf{3}=D_real; DNmed_graf{3}=D_nominal_medio;
DRmed_graf{3}=D_real_medio; DNdesv_graf{3}=D_nominal_desv;
DRdesv_graf{3}=D_real_desv;
V_graf{3}=V; Vmed_graf{3}=V_medio; VFN_graf{3}=V_fritz_nominal;
VFNmed_graf{3}=V_fritz_nominal_medio; Vdesv_graf{3}=V_desv;
VFNdesv_graf{3}=V_fritz_nominal_desv; VFRdesv_graf{3}=V_fritz_real_desv;
VFR_graf{3}=V_fritz_real; VFRmed_graf{3}=V_fritz_real_medio;
Req_graf{3}=R_equiv; Reqmed_graf{3}=R_equivmed;
Reqdesv_graf{3}=R_equivdesv;
load('G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados_Completa_Comparacion\20.mat');
DN_graf{4}=D_nominal; DR_graf{4}=D_real; DNmed_graf{4}=D_nominal_medio;
DRmed_graf{4}=D_real_medio; DNdesv_graf{4}=D_nominal_desv;
DRdesv_graf{4}=D_real_desv;
V_graf{4}=V; Vmed_graf{4}=V_medio; VFN_graf{4}=V_fritz_nominal;
VFNmed_graf{4}=V_fritz_nominal_medio; Vdesv_graf{4}=V_desv;
VFNdesv_graf{4}=V_fritz_nominal_desv; VFRdesv_graf{4}=V_fritz_real_desv;
VFR_graf{4}=V_fritz_real; VFRmed_graf{4}=V_fritz_real_medio;
Req_graf{4}=R_equiv; Reqmed_graf{4}=R_equivmed;
Reqdesv_graf{4}=R_equivdesv;

% %      save('G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados_Completa_Comparacion\8_10_16_20.mat','DN_graf'
,'DR_graf','DNmed_graf',...
% %
'DRmed_graf','V_graf','Vmed_graf','VFN_graf','VFNmed_graf','VFR_graf','VFRm
ed_graf','Req_graf','Reqmed_graf','Reqdesv_graf')

figure(1)
hold on;
title('Diámetros','FontSize',14);
errorbar([8e-3,10e-3,16e-3,20e-
3],[DNmed_graf{1},DNmed_graf{2},DNmed_graf{3},DNmed_graf{4}],[DNdesv_graf{1
},DNdesv_graf{2},DNdesv_graf{3},DNdesv_graf{4}], '*g');
errorbar([8e-3,10e-3,16e-3,20e-
3],[DRmed_graf{1},DRmed_graf{2},DRmed_graf{3},DRmed_graf{4}],[DRdesv_graf{1
},DRdesv_graf{2},DRdesv_graf{3},DRdesv_graf{4}], '*m');
ylabel('Diámetro (m)','FontSize',14); xlabel('Diámetro máscara
(m)','FontSize',14);
legend('Diámetro nominal medio','Diámetro real
medio','Location','eastoutside');
set(gca, 'fontsize', 12)
lgd.FontSize =11;
box on;
grid on;
axis([6e-3 22e-3 6e-3 22e-3])
hold off;

figure(2)
hold on;
title('Radio equivalente','FontSize',14);
errorbar([8e-3,10e-3,16e-3,20e-
3],[Reqmed_graf{1},Reqmed_graf{2},Reqmed_graf{3},Reqmed_graf{4}],[Reqdesv_g
raf{1},Reqdesv_graf{2},Reqdesv_graf{3},Reqdesv_graf{4}], 'ok');
ylabel('Radio equivalente (m)','FontSize',14); xlabel('Diámetro máscara
(m)','FontSize',14);
set(gca, 'fontsize', 12)
lgd.FontSize =11;
box on;
grid on;
axis([6e-3 22e-3 3e-3 5e-3])

```

```

hold off;

figure(3)
hold on;
title('Volúmenes','FontSize',14);
errorbar([8e-3,10e-3,16e-3,20e-
3],[Vmed_graf{1},Vmed_graf{2},Vmed_graf{3},Vmed_graf{4}],[Vdesv_graf{1},Vdesv_graf{2},Vdesv_graf{3},Vdesv_graf{4}]./2,[Vdesv_graf{1},Vdesv_graf{2},Vdesv_graf{3},Vdesv_graf{4}]./2,'ok');%[DRdesv_graf{1},DRdesv_graf{2},DRdesv_graf{3},DRdesv_graf{4}]./2,[DRdesv_graf{1},DRdesv_graf{2},DRdesv_graf{3},DRdesv_graf{4}]./2,
errorbar([8e-3,10e-3,16e-3,20e-
3],[VFNmed_graf{1},VFNmed_graf{2},VFNmed_graf{3},VFNmed_graf{4}],[VFNdesv_graf{1},VFNdesv_graf{2},VFNdesv_graf{3},VFNdesv_graf{4}], '*g');
errorbar([8e-3,10e-3,16e-3,20e-
3],[VFRmed_graf{1},VFRmed_graf{2},VFRmed_graf{3},VFRmed_graf{4}],[VFRdesv_graf{1},VFRdesv_graf{2},VFRdesv_graf{3},VFRdesv_graf{4}], '*m');
ylabel('Volumen (m^3)','FontSize',14); xlabel('Diámetro máscara (m)','FontSize',14);
legend('Volumen medio','Volumen de Fritz nominal','Volumen de Fritz real','Location','eastoutside');
set(gca, 'fontsize', 12)
lgd.FontSize =11;
box on;
grid on;
axis([6e-3 22e-3 1e-7 5.5e-7])
hold off;

end

```

8.2. Códigos para el análisis de los vídeos de detalle del borde de la burbuja.

8.2.1. Detalle_general

```

clear all
close all

listgena={'Analizar vídeo individual','Analizar resultados vídeos'};
[opcgena,tfgena]=listdlg('ListSize',[180,40],'PromptString','Seleccione qué desea realizar','SelectionMode','single','InitialValue',2,'ListString',listgena);

if tfgena==1
    switch opcgena
        case 1
            listgen0={'Diámetro 10 mm','Diámetro 16 mm','Diámetro 8 mm','Diámetro 20 mm'};

            [opcggen0,tfggen0]=listdlg('ListSize',[250,60],'PromptString','Seleccione qué superficie quiere analizar','SelectionMode','single','ListString',listgen0);
            if tfggen0~=0
                listgen1={'Video 6','Video 8','Video 15','Video 16','Video 17','Video 18'};
            end
        case 2
            listgen1={'Video 6','Video 8','Video 15','Video 16','Video 17','Video 18'};
        case 3
            listgen1={'Video 6','Video 8','Video 15','Video 16','Video 17','Video 18'};
        case 4
            listgen1={'Video 6','Video 8','Video 15','Video 16','Video 17','Video 18'};
    end
end

```

```

listgen2={'Video 10','Video 11','Video 12','Video
13','Video 14','Video 19','Video 20'};
listgen3={'Video 21 1','Video 21 2','Video 22 1','Video 22
2'};
listgen4={'Video 26 1','Video 26 2','Video 27 1','Video 27
2'};

%Directorio general de resultados.
dirgen='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\';
%Vector de resultados de los análisis del diámetro 10 mm.
d_10gen={'Resultados angulo video 6','Resultados angulo
video 8',...
'Resultados angulo video 15','Resultados angulo video
16',...
'Resultados angulo video 17','Resultados angulo video
18'};
%Vector de resultados de los análisis del diámetro 16 mm.
d_16gen={'Resultados angulo video 10','Resultados angulo
video 11',...
'Resultados angulo video 12','Resultados angulo video
13',...
'Resultados angulo video 14','Resultados angulo video
19',...
'Resultados angulo video 20'};
%Vector de resultados de los análisis del diámetro 8 mm.
d_8gen={'Resultados angulo video 21_1','Resultados angulo
video 21_2',...
'Resultados angulo video 22_1','Resultados angulo video
22_2'};
%Vector de resultados de los análisis del diámetro 20 mm.
d_20gen={'Resultados angulo video 26_1','Resultados angulo
video 26_2',...
'Resultados angulo video 27_1','Resultados angulo video
27_2'};

switch opcgen0
case 1

[opcgen,tfgen]=listdlg('ListSize',[200,140],'PromptString','Seleccione qué
video quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',listgen1);
if tfgen==1
nom=[dirgen,d_10gen{opcgen}];
detalle_deteccion;
end
case 2

[opcgen,tfgen]=listdlg('ListSize',[200,140],'PromptString','Seleccione qué
video quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',listgen2);
if tfgen==1
nom=[dirgen,d_16gen{opcgen}];
detalle_deteccion;
end
case 3

[opcgen,tfgen]=listdlg('ListSize',[200,140],'PromptString','Seleccione qué
video quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',listgen3);
if tfgen==1
nom=[dirgen,d_8gen{opcgen}];
detalle_deteccion;
end
case 4

```

```

[opcgen,tfggen]=listdlg('ListSize',[200,140],'PromptString','Selecione qué
video quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',listgen4);
    if tfggen==1
        nom=[dirgen,d_20gen{opcgen}];
        detalle_deteccion;
    end
end
end
case 2
    detalle_comparacion;
end
else
    disp('NO HA SELECCIONADO NINGUNA OPCIÓN')
end

```

8.2.2. Detalle_deteccion

```

[ini,fin,nom1,prueba,escala,ic,inom,ac,sig,DD,fps,inddif]=detalle_deteccion
_parametros(nom);

```

```

carpfig=nom;

```

```

if isempty(escala)==1
    escalavar=[];
    for i=1:10
        imgcalib=imread(ic);
        figure(1)
        imshow(imgcalib)
        titcalib=['Selecione la distancia a calibrar. ',num2str(i),'/10'];
        title(titcalib)
        [xcal,ycal]=ginput(2); %Matriz 2x2 formada por 2 vectores:
        xcal=round(xcal); %coordenada r de las dos esquinas opuestas,pix
        ycal=round(ycal); %coordenada z de las dos esquinas opuestas,pix
        distpix=abs(xcal(1)-xcal(2));
        distmm=input('Introduzca la equivalencia en milímetros: ');
        escalavar=[escalavar,distmm/distpix];
        close(figure(1));
    end
    escala=mean(escalavar);
end

```

```

pasos=(fin-ini)+1;

```

```

result=[];
angulo=[];
imp=[];
puntos=[];
posx=[];
Rmax=[];
cont=1;
time=0;
T=[];
nom2=[];

```

```

for a=ini:fin
    x=[];
    y=[];
    X=[];
    Y=[];

```

```

XX=[];
YY=[];

disp([num2str(a),'/',num2str(fin)])

nombre=[inom,'\ ',num2str(a),'.tif'];
img1=imread(nombre);

deteccion_caja;

img=img1(yim(1):yim(2),xim(1):xim(2));
boxul(1)=xim(1)-1;boxul(2)=yim(1)-1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1)
imshow(img1*ac,[])
hold on
title(num2str(a));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[cy,cx]=size(img);
[Max,pos]=max(img,[],2);

for i=1:length(pos)
    Y(i)=i;
    X(i)=pos(i);
end
Y=Y+boxul(2);
X=X+boxul(1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x=X;
y=Y;
for i=1:length(x)
    plot(x,y,'w.') %plot(x,y,símbolo)
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if inddif==0
    deteccion_dif;
end

for i=1:length(x)
    %plot(x,y,'m.') %plot(x,y,símbolo)
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
XX=x;
YY=y;
tt=1;
eliminar=[];
for i=2:length(XX)
    if sign(XX(i)-XX(tt))==sig
        eliminar=[eliminar,i];
    else
        tt=tt+1;
        while sum(eliminar==tt)==1
            tt=tt+1;
        end
    end
end
YY(eliminar)=[];

```

```

XX(eliminar)=[ ];

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
if inddif==1
    deteccion_dif
end
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
for i=1:length(XX)
    plot(XX,YY,'y.') %plot(x,y,símbolo)
end

puntos=[puntos,length(XX)];

yaj=linspace(yim(1),yim(2),100);

%[ajust1,bondad1] = interpolacion2(y, x);
%coef1=[ajust1.p1,ajust1.p2,ajust1.p3];
%R1=bondad1.rsquare;
%xaj1=polyval(coef1,yaj);
%plot(xaj1,yaj,'w-');

%[ajust2,bondad2] = interpolacion2(Y, X);
%coef2=[ajust2.p1,ajust2.p2,ajust2.p3];
%R2=bondad2.rsquare;
%xaj2=polyval(coef2,yaj);
%plot(xaj2,yaj,'m-');

[ajust3,bondad3] = interpolacion2(YY, XX);
coef3=[ajust3.p1,ajust3.p2,ajust3.p3];
R3=bondad3.rsquare;
xaj3=polyval(coef3,yaj);
plot(xaj3,yaj,'y-');
%result=[result;R1,R2,R3,length(x),length(X),length(XX)];
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
[ajust4,bondad4] = interpolacion1(y, x);
coef4=[ajust4.p1,ajust4.p2];
R4=bondad4.rsquare;
xaj4=polyval(coef4,yaj);
% plot(xaj4,yaj,'r-');
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
[ajust5,bondad5] = interpolacion1(YY, XX);
coef5=[ajust5.p1,ajust5.p2];
R5=bondad5.rsquare;
xaj5=polyval(coef5,yaj);
plot(xaj5,yaj,'b-');

[ajust6,bondad6] = interpolacion1(yaj(length(yaj)-4:length(yaj)),
xaj3(length(xaj3)-4:length(xaj3)));
coef6=[ajust6.p1,ajust6.p2];
R6=bondad6.rsquare;
xaj6=polyval(coef6,yaj(length(yaj)-4:length(yaj)));
plot(xaj6,yaj(length(yaj)-4:length(yaj)),'g-');
if length(XX)>=20
[ajust7,bondad7] = interpolacion1(YY(length(YY)-19:length(YY)),
XX(length(XX)-19:length(XX)));

```



```

coef7=[ajust7.p1,ajust7.p2];
R7=bondad7.rsquare;
xaj7=polyval(coef7,yaj(length(yaj)-19:length(yaj)));
plot(xaj7,yaj(length(yaj)-19:length(yaj)),'c-');
else
    R7=0;
    coef7=[0,0];
    xaj7=0;
    imp=[imp;20,a];
end
if length(XX)>=10
    [ajust8,bondad8] = interpolacion1(YY(length(YY)-9:length(YY)),
    XX(length(XX)-9:length(XX)));
    coef8=[ajust8.p1,ajust8.p2];
    R8=bondad8.rsquare;
    xaj8=polyval(coef8,yaj(length(yaj)-9:length(yaj)));
    plot(xaj8,yaj(length(yaj)-9:length(yaj)),'m-');
else
    R8=0;
    coef8=[0,0];
    xaj8=0;
    imp=[imp;10,a];
end
if length(XX)>=5
    [ajust9,bondad9] = interpolacion1(YY(length(YY)-4:length(YY)),
    XX(length(XX)-4:length(XX)));
    coef9=[ajust9.p1,ajust9.p2];
    R9=bondad9.rsquare;
    xaj9=polyval(coef9,yaj(length(yaj)-4:length(yaj)));
    plot(xaj9,yaj(length(yaj)-4:length(yaj)),'w-');
else
    R9=0;
    coef9=[0,0];
    xaj9=0;
    imp=[imp;5,a];
end
%%result=[R_amarilla,R_verde,0,R_azul,0,R_cián(20),R_magenta(10),R_blanca(5),0,0,
%%,longitud_verde==5,longitud_total_XY(ama y
azul),longitud_cián,longitud_magenta,longitud_blanca];
result=[result;R3,R6,0,R5,0,R7,R8,R9,0,0,5,length(XX),20,10,5];

%%angulo=[Azul_inter1_XXYY,Amarilla_inter2==Verde_inter1_XXYY,Cián_inter1_2
0XXYY,Magenta_inter1_10XXYY,Blanco_inter1_5XXYY,Rojo_inter1_xy];
angulo=[angulo;180-abs(atan(coef5(1))*180/pi),0,180-
abs(atan(coef6(1))*180/pi),0,180-abs(atan(coef7(1))*180/pi),0,180-
abs(atan(coef8(1))*180/pi),0,180-abs(atan(coef9(1))*180/pi),180-
abs(atan(coef4(1))*180/pi)];
[fa,ca]=size(angulo);
if a~=ini
    for i=1:ca
        if round(angulo(cont,i))==180
            angulo(cont,i)=angulo(cont-1,i);
        end
        %if fa>1 && round(angulo(1,i))==180
        %    angulo(1,i)=angulo(2,i);
        %end
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
box on;

```

```

grid on;
hold off;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Rmax=[máx de todos los puntos XYY, máx de verde==amarilla,máx de azul,máx
de cián,máx de magenta,máx de blanco,max línea roja sin <]
if sig==1

posx=[posx;min (XX),min (xaj6),min (xaj5),min (xaj7),min (xaj8),min (xaj9),min (xaj4)];
else

posx=[posx;max (XX),max (xaj6),max (xaj5),max (xaj7),max (xaj8),max (xaj9),max (xaj4)];
end
[fp,cp]=size(posx);
if a~=ini
    for i=1:cp
        if round(posx(cont,i))==0
            posx(cont,i)=posx(cont-1,i);
        end
        %if fp>1 && round(posx(1,i))==0
        %    posx(1,i)=posx(2,i);
        %end
    end
end

cont=cont+1;

T=[T,time];
time=time+fps;
if ini~=fin
    pause(0.1);
end
end

[radiocalib,radiocalib_esc,rango]=detalle_calib_radio(DD,escala);
aref=fin-rango;
apos=aref-ini+1;
posx1=posx(apos,:);
centro=posx1+sig*radiocalib;
for i=1:fp
    Rmax=[Rmax;abs(-posx(i,:)+centro)*escala];
end

%%error relativo respecto de la curva azul con todos los XYY
errorang=[abs(angulo(:,1)-angulo(:,3))./angulo(:,1),abs(angulo(:,1)-angulo(:,5))./angulo(:,1),abs(angulo(:,1)-angulo(:,7))./angulo(:,1),abs(angulo(:,1)-angulo(:,9))./angulo(:,1),abs(angulo(:,1)-angulo(:,10))./angulo(:,1)]*100;
[maxVeang,posVeang]=sort(errorang(:,1)); [maxCiang,posCiang]=sort(errorang(:,2)); [maxMaang,posMaang]=sort(errorang(:,3));
[maxBlang,posBlang]=sort(errorang(:,4));
errorrad=[abs(Rmax(:,3)-Rmax(:,1))./Rmax(:,3),abs(Rmax(:,3)-Rmax(:,2))./Rmax(:,3),abs(Rmax(:,3)-Rmax(:,4))./Rmax(:,3),abs(Rmax(:,3)-Rmax(:,5))./Rmax(:,3),abs(Rmax(:,3)-Rmax(:,6))./Rmax(:,3),abs(Rmax(:,3)-Rmax(:,7))./Rmax(:,3)]*100;
[maxXXrad,posXXrad]=sort(errorrad(:,1)); [maxVerad,posVerad]=sort(errorrad(:,2)); [maxCirad,posCirad]=sort(errorrad(:,3));
[maxMarad,posMarad]=sort(errorrad(:,4));
[maxBlrad,posBlrad]=sort(errorrad(:,5));

```

```

a=linspace(ini,fin,pasos);

figure(2);
hold on;
plot(T,angulo(:,1),'b. ');
plot(T,angulo(:,3),'g. ');
plot(T,angulo(:,5),'c. ');
plot(T,angulo(:,7),'m. ');
%plot(T,angulo(:,10),'r. ');
%plot(T,angulo(:,9),'k. ');
title('Ángulos con las distintas aproximaciones');
legend('Línea azul','Línea verde==amarilla','Línea cián (20)','Línea magenta (10)','Location','eastoutside'); %,'Línea blanca (5)'
ylabel('Ángulo (°)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
hold off;
nom_2='Ángulos';

figure(3)
hold on;
plot(a,errorang(:,1),'g. ');
plot(a,errorang(:,2),'c. ');
plot(a,errorang(:,3),'m. ');
%plot(a,errorang(:,5),'r. ');
%plot(a,errorang(:,4),'k. ');
title('Error de las distintas aproximaciones respecto a la línea azul');
legend('Línea verde==amarilla','Línea cián (20)','Línea magenta (10)','Location','eastoutside'); %,'Línea blanca (5)'
ylabel('Error (%)'); xlabel('Imagen');
box on;
grid on;
hold off;
nom_3='Error ángulos';

figure(4)
plot(a,puntos,'o')
title('Número de puntos analizados en cada imagen');
ylabel('Número de puntos'); xlabel('Imagen');
box on;
grid on;
nom_4='Puntos analizados';

figure(5)
hold on;
plot(T,Rmax(:,1),'y. ');
plot(T,Rmax(:,2),'g. ');
plot(T,Rmax(:,3),'b. ');
plot(T,Rmax(:,4),'c. ');
plot(T,Rmax(:,5),'m. ');
%plot(T,Rmax(:,7),'r. ');
%plot(T,Rmax(:,6),'k. ');
title('Radio máximo');
legend('Puntos amarillos XYY','Línea verde==amarilla','Línea azul','Línea cián (20)','Línea magenta (10)','Location','eastoutside'); %,'Línea blanca (5)'

```

```

ylabel('Radio máximo (mm)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
hold off;
nom_5='Radio máximo';

figure(6)
hold on;
plot(T,posx(:,1)*escala,'y. ');
plot(T,posx(:,2)*escala,'g. ');
plot(T,posx(:,3)*escala,'b. ');
plot(T,posx(:,4)*escala,'c. ');
plot(T,posx(:,5)*escala,'m. ');
%plot(T,posx(:,7)*escala,'r. ');
%plot(T,Rmax(:,6)*escala,'k. ');
title('Radio máximo, en coordenadas absolutas');
legend('Puntos amarillos XYY', 'Línea verde==amarilla', 'Línea azul', 'Línea
cián (20)', 'Línea magenta (10)', 'Location', 'eastoutside'); %, 'Línea blanca
(5)'
ylabel('Posición absoluta en X (mm)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
hold off;
nom_6='Radio máximo coordenadas absolutas';

figure(7)
hold on;
plot(a,errorrad(:,1), 'y. ');
plot(a,errorrad(:,2), 'g. ');
plot(a,errorrad(:,3), 'c. ');
plot(a,errorrad(:,4), 'm. ');
%plot(a,errorrad(:,6), 'r. ');
%plot(a,errorrad(:,5), 'k. ');
title('Error entre los valores de radio máximo');
legend('Puntos amarillos XYY', 'Línea verde==amarilla', 'Línea cián
(20)', 'Línea magenta (10)', 'Location', 'eastoutside'); %, 'Línea blanca (5)'
ylabel('Error (%)'); xlabel('Imágenes');
box on;
grid on;
hold off;
nom_7='Error radio';

if ~isempty(imp);
    figure(8)
    plot(imp(:,2),imp(:,1), 'o');
    title('Imágenes donde no podemos calcular alguna de las interpolaciones
por falta de puntos')
    ylabel('Interpolación no realizada'); xlabel('Imagen');
    box on;
    grid on;
end
nom_8='No interpolación';

%%Rmax=[máx de todos los puntos XYY,máx de verde==amarilla,máx de azul,máx
de cián,máx de magenta,máx de blanco,max rojo]
[fR,cR]=size(Rmax);
velR=zeros(fR,cR);

```

```

for i=1:cR
    velR(1,i)=(Rmax(2,i)-Rmax(1,i))/fps;
    velR(fR,i)=(Rmax(fR,i)-Rmax(fR-1,i))/fps;
    velR(2:fR-1,i)=(Rmax(3:fR,i)-Rmax(1:(fR-2),i))/(2*fps);
end
[fV,cV]=size(velR);
acR=zeros(fV,cV);
for j=1:cR
    acR(1,j)=(velR(2,j)-velR(1,j))/fps;
    %acR(1,i)=(Rmax(3,i)-2*Rmax(2,i)+Rmax(1,i))/(fps^2);
    %acR(f,i)=(Rmax(f,i)-2*Rmax(f-1,i)+Rmax(f-2,i))/(fps^2);
    %acR(2:f-1,i)=(Rmax(3:f,i)-2*Rmax(2:f-1,i)+Rmax(1:(f-2),i))/(fps^2);
    acR(2:fV,j)=(velR(2:fV,j)-velR(1:fV-1,j))/fps;
end

figure(9)
hold on;
plot(T,velR(:,1),'y. ');
plot(T,velR(:,2),'g. ');
plot(T,velR(:,3),'b. ');
plot(T,velR(:,4),'c. ');
plot(T,velR(:,5),'m. ');
%plot(T,velR(:,6),'k. ');
title('Velocidad radio máximo');
legend('Puntos amarillos XXYY','Línea verde==amarilla','Línea azul','Línea
cián (20)','Línea magenta (10)','Location','eastoutside'); %,'Línea blanca
(5) '
ylabel('Velocidad radio máximo (mm/ms)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
hold off;
nom_9='Velocidad radio';

figure(10)
hold on;
plot(T,acR(:,1),'y. ');
plot(T,acR(:,2),'g. ');
plot(T,acR(:,3),'b. ');
plot(T,acR(:,4),'c. ');
plot(T,acR(:,5),'m. ');
%plot(T,acR(:,6),'k. ');
title('Aceleración radio máximo');
legend('Puntos amarillos XXYY','Línea verde==amarilla','Línea azul','Línea
cián (20)','Línea magenta (10)','Location','eastoutside'); %,'Línea blanca
(5) '
ylabel('Aceleración radio máximo (mm/ms^2)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
axis;
hold off;
nom_10='Aceleración radio';
%%Rmax=[máx de todos los puntos XXYY,máx de verde==amarilla,máx de azul,máx
de cián,máx de magenta,máx de blanco]
figure(11)
hold on;
plot(T,acR(:,3),'b. ');
title('Aceleración radio máximo');
legend('Línea azul');
ylabel('Aceleración radio máximo (mm/ms^2)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;

```

```

axis;
hold off;
nom_11='Aceleración radio azul';

figure(12)
hold on;
plot(T, (velR(:,3)), 'b. ');
title('Velocidad radio máximo');
legend('Línea azul');
ylabel('Velocidad radio máximo (mm/ms)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
hold off;
nom_12='Velocidad radio azul';

acR2=zeros(fV,cV);
for j=1:cR
    %acR2(1,j)=(velR(2,j)-velR(1,j))/fps;
    acR2(1,j)=(Rmax(3,j)-2*Rmax(2,i)+Rmax(1,j))/(fps^2);
    acR2(fV,j)=(Rmax(fV,j)-2*Rmax(fV-1,j)+Rmax(fV-2,j))/(fps^2);
    acR2(2:fV-1,j)=(Rmax(3:fV,j)-2*Rmax(2:fV-1,j)+Rmax(1:(fV-
2),j))/(fps^2);
    %acR2(2:fV,j)=(velR(2:fV,j)-velR(1:fV-1,j))/fps;
end
figure(13)
hold on;
plot(T,acR(:,3), 'b. ');
plot(T,acR2(:,3), 'r. ');
title('comparación');
legend('Aceleración con velocidad','Aceleración con radio');
box on;
grid on;
hold off;
nom_13='Comparación aceleración';

clearvars listgena opcgena tfgena listgen0 opcgen0 tfgen0 listgen1
listgen2...
listgen3 listgen4 dirgen d_10gen d_16gen d_8gen d_20gen opcgen tfgen
nom

%nom2 tiene que tener el mismo número de elementos como figuras
nom2=char(nom_2,nom_3,nom_4,nom_5,nom_6,nom_7,nom_8,nom_9,nom_10,nom_11,nom
_12,nom_13);
[fi,ci]=size(nom2);
for i=1:fi %%cambiar si añadimos
    filename=[carpfig,'\ ',nom1,nom2(i,:), '_ ',prueba];
    saveas(figure(i+1),filename);
    saveas(figure(i+1),filename,'jpg');
end
gvar=[carpfig,'\TODAS_',prueba];
save(gvar);

```

8.2.3. Detalle_deteccion_parametros

```

function
[ini,fin,nom1,prueba,escala,ic,inom,ac,sig,DD,fps,inddif]=detalle_deteccion
_parametros(nom)

switch nom
    %Diámetro 10 mm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 6'
            ini=60; fin=1021; nom1='Video d_10_lente_2_detalle_6_'; prueba='1';
            escala=0.007320738514384; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_10_lente_2_detalle_6_calib.tif';
            inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_10_lente_2_detalle_6';
            ac=4; sig=-1; DD=10.1; fps=1;inddif=1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 8'
            ini=101; fin=1899; nom1='Video d_10_lente_2_detalle_8_';
prueba='1';
            escala=0.00621118012422360; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_10_lente_2_detalle_8_calib.tif';
            inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_10_lente_2_detalle_8';
            ac=6; sig=-1; DD=10; fps=2;inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 15'
            ini=1; fin=1886; nom1='Video d_10_lente_2_detalle_15_'; prueba='1';
            escala=0.007092198581560; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_10_lente_2_detalle_15_calib.tif';
            inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_10_lente_2_detalle_15';
            ac=4; sig=-1; DD=10; fps=2;inddif=1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 16'
            ini=1; fin=2002; nom1='Video d_10_lente_2_detalle_16_'; prueba='1';
            escala=0.007042253521127; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_10_lente_2_detalle_16_17_calib.tif';
            inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_10_lente_2_detalle_16';
            ac=4; sig=-1; DD=10; fps=2;inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 17'
            ini=1; fin=2016; nom1='Video d_10_lente_2_detalle_17_'; prueba='1';
            escala=0.007042253521127; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_10_lente_2_detalle_16_17_calib.tif';

```

```

    inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_10_lente_2_detalle_17';
    ac=4; sig=-1; DD=10; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 18'
        ini=1; fin=2046; nom1='Video d_10_lente_2_detalle_18_'; prueba='1';
        escala=0.007142857142857; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_10_lente_2_detalle_18_calib.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_10_lente_2_detalle_18';
        ac=4; sig=-1; DD=10; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    %Diámetro 16 mm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 10'
        ini=60; fin=1431; nom1='Video d_16_lente_2_detalle_10_';
prueba='1';
        escala=0.007936507936508; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_16_lente_2_detalle_10_calib.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_16_lente_2_detalle_10';
        ac=4; sig=-1; DD=16.1; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 11'
        ini=1; fin=1967; nom1='Video d_16_lente_2_detalle_11_'; prueba='1';
        escala=0.007936507936508; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_16_lente_2_detalle_10_calib.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_16_lente_2_detalle_11';
        ac=4; sig=-1; DD=16; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 12'
        ini=150; fin=1910; nom1='Video d_16_lente_2_detalle_12_';
prueba='1';
        escala=0.007936507936508; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_16_lente_2_detalle_10_calib.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_16_lente_2_detalle_12';
        ac=4; sig=-1; DD=16; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 13'
        ini=120; fin=2010; nom1='Video d_16_lente_2_detalle_13_';
prueba='1';

```



```

    escala=0.007936507936508; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_16_lente_2_detalle_10_calib.tif';
    inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_2_detalle_13';
    ac=4; sig=-1; DD=16; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 14'
        ini=140; fin=1908; nom1='Video d_16_lente_2_detalle_14_';
prueba='1';
        escala=0.007936507936508; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_16_lente_2_detalle_10_calib.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_2_detalle_14';
        ac=4; sig=-1; DD=16; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 19'
        ini=1; fin=1855; nom1='Video d_16_lente_2_detalle_19_'; prueba='1';
        escala=0.011904761904762; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_16_lente_2_detalle_19_20_calib.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_2_detalle_19';
        ac=4; sig=-1; DD=16; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 20'
        ini=200; fin=1914; nom1='Video d_16_lente_2_detalle_20_';
prueba='1';
        escala=0.011904761904762; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_16_lente_2_detalle_19_20_calib.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_16_lente_2_detalle_20';
        ac=4; sig=-1; DD=16; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 21_1'
        ini=60; fin=930; nom1='Video d_8_lente_2_detalle_21_1_';
prueba='1';
        escala=0.006753124171440; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_8_lente_2_detalle_21_22_23_24_calib.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_2_detalle_21_1';
        ac=4; sig=+1; DD=8; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 21_2'

```

```

ini=989; fin=1859; nom1='Video d_8_lente_2_detalle_21_2_';
prueba='1';
escala=0.006753124171440; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_8_lente_2_detalle_21_22_23_24_calib.tif';
inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_2_detalle_21_2_';
ac=4; sig=+1; DD=8; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 22_1'
ini=60; fin=923; nom1='Video d_8_lente_2_detalle_22_1_';
prueba='1';
escala=0.006753124171440; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_8_lente_2_detalle_21_22_23_24_calib.tif';
inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_2_detalle_22_1_';
ac=4; sig=+1; DD=8; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 22_2'
ini=982; fin=1845; nom1='Video d_8_lente_2_detalle_22_2_';
prueba='1';
escala=0.006753124171440; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_8_lente_2_detalle_21_22_23_24_calib.tif';
inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_8_lente_2_detalle_22_2_';
ac=4; sig=+1; DD=8; fps=2; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Diámetro 20 mm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 26_1'
ini=260; fin=779; nom1='Video d_20_lente_2_detalle_26_1_';
prueba='1';
escala=0.011703731414118; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_20_lente_2_detalle_25_26_27_28_29_30.tif';
inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_2_detalle_26_1_';
ac=4; sig=+1; DD=20; fps=4; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 26_2'
ini=1037; fin=1556; nom1='Video d_20_lente_2_detalle_26_2_';
prueba='1';
escala=0.011703731414118; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imágenes\d_20_lente_2_detalle_25_26_27_28_29_30.tif';
inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_2_detalle_26_2_';
ac=4; sig=+1; DD=20; fps=4; inddif=0;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 27_1'
        ini=263; fin=782; nom1='Video_d_20_lente_2_detalle_27_1_';
prueba='1';
        escala=0.011703731414118; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_20_lente_2_detalle_25_26_27_28_29_30.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_20_lente_2_detalle_27_1';
        ac=4; sig=+1; DD=20; fps=4; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 27_2'
        ini=1045; fin=1564; nom1='Video_d_20_lente_2_detalle_27_2_';
prueba='1';
        escala=0.011703731414118; ic='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis
documentos\MI matlab\Imagenes\d_20_lente_2_detalle_25_26_27_28_29_30.tif';
        inom='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imagenes\Imagenes_d_20_lente_2_detalle_27_2';
        ac=4; sig=+1; DD=20; fps=4; inddif=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end

```

8.2.4. Deteccion_caja

```

switch nom
    %Diámetro 10 mm
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 6'
        xim(1)=245;xim(2)=920;yim(1)=515;yim(2)=574;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 8'
        xim(1)=560;xim(2)=971;yim(1)=590;yim(2)=649;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 15'
        xim(1)=500;xim(2)=1010;yim(1)=670;yim(2)=720;
        if a>=1880,yim(1)=650;end
        if a>=1884,yim(1)=686;end
        if a==1886,yim(1)=691;xim(2)=648;end
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 16'
        xim(1)=500;xim(2)=960;yim(1)=661;yim(2)=698;
        if a>=2001,yim(1)=675;end
        if a==994,yim(1)=670;end
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 17'
        xim(1)=500;xim(2)=972;yim(1)=661;yim(2)=712;
        if a==2016,yim(1)=675;end
        if a==1572,yim(1)=667;end
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 18'
        xim(1)=400;xim(2)=972;yim(1)=605;yim(2)=673;
        if a>=2040,yim(1)=626;end

    %Diámetro 16 mm

```

```

case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 10'
    xim(1)=270;xim(2)=1224;yim(1)=606;yim(2)=675;
    if a>=1427,yim(1)=650;end
    if a==1430,xim(2)=638;end
    if a==1431,xim(2)=540;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 11'
    xim(1)=270;xim(2)=1224;yim(1)=650;yim(2)=737;
    if a>=1955,yim(1)=660;end
    if a>=1961,yim(1)=706;end
    if a>=1965,yim(1)=711;xim(2)=701;end
    if a==1966,xim(2)=670;end
    if a==1967,yim(1)=714;xim(2)=633;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 12'
    xim(1)=270;xim(2)=1224;yim(1)=650;yim(2)=737;
    if a>=1900,yim(1)=685;end
    if a>=1906,yim(1)=694;end
    if a>=1907,xim(2)=730;yim(1)=716;end
    if a==1910,xim(2)=597;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 13'
    xim(1)=270;xim(2)=1224;yim(1)=550;yim(2)=665;
    if a>=1990,yim(1)=570;end
    if a>=2003,yim(1)=626;end
    if a>=2009,yim(1)=632;xim(2)=685;end
    if a>=2010,xim(2)=602;yim(1)=640;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 14'
    xim(1)=270;xim(2)=1224;yim(1)=550;yim(2)=665;
    if a>=1900,yim(1)=602;end
    if a>=1905,yim(1)=626;xim(2)=789;end
    if a>=1907,xim(2)=660;end
    if a==1908,xim(2)=571;yim(1)=639;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 19'
    xim(1)=289;xim(2)=1045;yim(1)=635;yim(2)=691;
    if a>=1843,yim(1)=654;end
    if a>=1849,yim(1)=665;xim(2)=704;end
    if a>=1853,yim(1)=667;xim(2)=621;end
    if a>=1854,xim(2)=576;end
    if a==1855,xim(2)=494;end
    if a==1163 || a==1552 || a==1807,yim(1)=644;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 20'
    xim(1)=289;xim(2)=1045;yim(1)=635;yim(2)=690;
    if a>=1870,yim(1)=642;end
    if a>=1906,yim(1)=666;xim(2)=786;end
    if a>=1910,xim(2)=703;end
    if a>=1912,xim(2)=614;end
    if a>=1913,yim(1)=669;end
    if a==1914,xim(2)=490;yim(1)=673;end
    if a==1713,yim(1)=646;end
%Díámetro 8 mm
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 21_1'
    xim(1)=680;xim(2)=1000;yim(1)=667;yim(2)=708;
    if a==930,xim(1)=849;yim(1)=677;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 21_2'

```

```

xim(1)=680;xim(2)=1000;yim(1)=667;yim(2)=708;
if a==1858,xim(1)=808;yim(1)=672;end
if a==1859,xim(1)=839;yim(1)=675;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 22_1'
xim(1)=680;xim(2)=1000;yim(1)=669;yim(2)=708;
if a==923,xim(1)=849;yim(1)=677;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 22_2'
xim(1)=680;xim(2)=1000;yim(1)=670;yim(2)=708;
if a==1845,xim(1)=820;yim(1)=677;end
%Díámetro 20 mm
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 26_1'
xim(1)=476;xim(2)=1200;yim(1)=636;yim(2)=698;
if a>=730,yim(1)=664;end
if a>=762,yim(1)=670;end
if a>=770,yim(1)=687;xim(1)=644;end
if a>=773,yim(1)=674;xim(1)=701;end
if a>=777,yim(1)=682;xim(1)=845;end
if a>=778,xim(1)=937;end
if a>=779,yim(1)=678;xim(1)=1083;yim(2)=687;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 26_2'
xim(1)=476;xim(2)=1200;yim(1)=637;yim(2)=698;
if a>=1507,yim(1)=664;end
if a>=1539,yim(1)=679;end
if a>=1545,yim(1)=658;end
if a>=1547,yim(1)=687;xim(1)=643;end
if a>=1550,yim(1)=677;xim(1)=692;end
if a>=1554,yim(1)=678;xim(1)=825;end
if a>=1555,yim(1)=679;xim(1)=914;end
if a>=1556,yim(1)=669;xim(1)=1011;yim(2)=694;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 27_1'
xim(1)=476;xim(2)=1200;yim(1)=642;yim(2)=698;
if a>=733,yim(1)=664;end
if a>=765,yim(1)=670;end
if a>=768,yim(1)=679;end
if a>=770,yim(1)=681;end
if a>=772,yim(1)=686;xim(1)=636;end
if a>=775,yim(1)=676;xim(1)=701;end
if a>=778,yim(1)=678;end
if a>=779,xim(1)=805;end
if a>=781,xim(1)=937;end
if a>=782,yim(1)=683;xim(1)=1035;end
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 27_2'
xim(1)=476;xim(2)=1200;yim(1)=642;yim(2)=698;
if a>=1515,yim(1)=664;end
if a>=1545,yim(1)=673;end
if a>=1549,yim(1)=678;end
if a>=1551,yim(1)=681;end
if a>=1554,yim(1)=687;xim(1)=636;end
if a>=1557,yim(1)=676;xim(1)=701;end
if a>=1559,yim(1)=677;end
if a>=1561,xim(1)=805;end
if a>=1562,yim(1)=685;xim(1)=878;end
if a>=1563,yim(1)=683;xim(1)=957;yim(2)=696;end
if a>=1564,yim(1)=680;xim(1)=1095;yim(2)=692;end
end

```

8.2.5. Deteccion_dif

```

switch nom
    %Diámetro 10 mm
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 6'
        tt=1;
        eliminar=[];
        for i=2:length(XX)
            dif=abs(XX(i)-XX(tt));
            if YY(i)<=563
                valida=24;
            else
                valida=17;
            end
            if dif>valida
                eliminar=[eliminar,i];
            else
                tt=tt+1;
                while sum(eliminar==tt)==1
                    tt=tt+1;
                end
            end
        end
        YY(eliminar)=[];
        XX(eliminar)=[];
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 8'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 15'
        tt=1;
        eliminar=[];
        for i=2:length(XX)
            dif=abs(XX(i)-XX(tt));
            if YY(i)<=696
                valida=50;
            else
                valida=28;
            end
            if dif>valida
                eliminar=[eliminar,i];
            else
                tt=tt+1;
                while sum(eliminar==tt)==1
                    tt=tt+1;
                end
            end
        end
        YY(eliminar)=[];
        XX(eliminar)=[];
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 16'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 17'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 18'
        %nada
    %Diámetro 16 mm

```

```

    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 10'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 11'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 12'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 13'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 14'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 19'
        %nada
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 20'
        %nada
    %Diámetro 8 mm
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 21_1'
        t=1;
        eliminar=[];
        dif=abs(x(1)-x(2));
        if dif>9
            [xmin,posxmin]=min([x(1),x(2)]);
            eliminar=[eliminar,posxmin];
        end
        y(eliminar)=[];
        x(eliminar)=[];
        t=1;
        eliminar=[];
        for i=2:length(x)
            dif=abs(x(i)-x(t));
            if a>=926
                difok=60;
            elseif a<=300
                difok=20;
            else
                difok=9;
            end
            if dif>difok
                eliminar=[eliminar,i];
            else
                t=t+1;
                while sum(eliminar==t)==1
                    t=t+1;
                end
            end
        end
        y(eliminar)=[];
        x(eliminar)=[];
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 21_2'
        t=1;
        eliminar=[];
        dif=abs(x(1)-x(2));
        if dif>8

```

```

        [xmin,posxmin]=min([x(1),x(2)]);
        eliminar=[eliminar,posxmin];
    end
    y(eliminar)=[];
    x(eliminar)=[];
    t=1;
    eliminar=[];
    for i=2:length(x)
        dif=abs(x(i)-x(t));
        if a>=1858
            difok=50;
        elseif a<=1212
            difok=20;
        else
            difok=9;
        end
        if dif>difok
            eliminar=[eliminar,i];
        else
            t=t+1;
            while sum(eliminar==t)==1
                t=t+1;
            end
        end
    end
    y(eliminar)=[];
    x(eliminar)=[];
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 22_1'
        t=1;
        eliminar=[];
        dif=abs(x(1)-x(2));
        if dif>9
            [xmin,posxmin]=min([x(1),x(2)]);
            eliminar=[eliminar,posxmin];
        end
        y(eliminar)=[];
        x(eliminar)=[];
        t=1;
        eliminar=[];
        for i=2:length(x)
            dif=abs(x(i)-x(t));
            if a>=917
                difok=50;
            elseif a<=279
                difok=20;
            else
                difok=9;
            end
            if dif>difok
                eliminar=[eliminar,i];
            else
                t=t+1;
                while sum(eliminar==t)==1
                    t=t+1;
                end
            end
        end
    end
    y(eliminar)=[];
    x(eliminar)=[];

```



```

case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 22_2'
    t=1;
    eliminar=[];
    dif=abs(x(1)-x(2));
    if dif>7
        [xmin,posxmin]=min([x(1),x(2)]);
        eliminar=[eliminar,posxmin];
    end
    y(eliminar)=[];
    x(eliminar)=[];
    t=1;
    eliminar=[];
    for i=2:length(x)
        dif=abs(x(i)-x(t));
        if a>=1839
            difok=15;%Para no aplicar esto
        elseif a<=1210
            difok=16;%mejor 18
        else
            difok=9;
        end
        if dif>difok
            eliminar=[eliminar,i];
        else
            t=t+1;
            while sum(eliminar==t)==1
                t=t+1;
            end
        end
    end
    y(eliminar)=[];
    x(eliminar)=[];
    %Diámetro 20 mm
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 26_1'
        t=1;
        eliminar=[];
        for i=2:length(x)
            dif=abs(x(i)-x(t));
            if (a>=266)&&(a<=336)
                difok=45;%Para no aplicar esto
            else
                difok=32;
            end
            if dif>difok
                eliminar=[eliminar,i];
            else
                t=t+1;
                while sum(eliminar==t)==1
                    t=t+1;
                end
            end
        end
        disp(difok)
        y(eliminar)=[];
        x(eliminar)=[];
        case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 26_2'
            t=1;
            eliminar=[];

```

```

for i=2:length(x)
    dif=abs(x(i)-x(t));
    if ((a>=1043)&&(a<=1113)) || ((a>=1545)&&(a<=1555))
        difok=45;%Para no aplicar esto
    elseif a==1556
        difok=12;
    else
        difok=32;
    end
    if dif>difok
        eliminar=[eliminar,i];
    else
        t=t+1;
        while sum(eliminar==t)==1
            t=t+1;
        end
    end
end
disp(difok)
y(eliminar)=[];
x(eliminar)=[];
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 27_1'
    %nada
case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 27_2'
    %nada
end

```

8.2.6. Detalle_calib_radio

```

function [radiocalib,radiocalib_esc,rango]=detalle_calib_radio(DD,esc)
switch DD
case 8
    %Diámtetro de la superficie 8 mm
    rango=365; %desde el final a la que queremos
    escala=0.006753124171440;
    fin=1974;
    imR=fin-rango;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %RESULTADOS detalle 21, 22 y 24%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    radiocalib=5.872454545454545e+02;
    radiocalib_esc=3.965741473659179;
    x1=5.934545454545455e+02;
    x1vec=[596 594 594 594 592 592 594 594 594 592 592];
    centrovec=[1180 1180 1179 1180 1180 1180 1181 1181 1181 1182 1183];
    centro=1.180700000000000e+03;
case 10
    %Diámtetro de la superficie 10 mm
    rango=775; %desde el final a la que queremos
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%RESULTADOS detalle
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    radiocalib_esc=9.5970/2;
    radiocalib=radiocalib_esc/esc;
case 10.1
    %Diámtetro de la superficie 10 mm primer vídeo grabado a 1000 fps
    rango=261; %desde el final a la que queremos
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%RESULTADOS detalle

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
radiocalib_esc=9.5970/2;
radiocalib=radiocalib_esc/esc;
case 16
%Díametro de la superficie 16 mm
rango=600; %desde el final a la que queremos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%RESULTADOS detalle
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
radiocalib_esc=15.412/2;
radiocalib=radiocalib_esc/esc;
case 16.1
%Díametro de la superficie 16 mm
rango=496; %desde el final a la que queremos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%RESULTADOS detalle
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
radiocalib_esc=15.412/2;
radiocalib=radiocalib_esc/esc;
case 20
%Díametro de la superficie 20 mm
rango=261; %desde el final a la que queremos
escala=0.011703731414118;
fin=1492;
imR=fin-rango;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%RESULTADOS detalle 26, 27
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
radiocalib=6.847545454545455e+02;
radiocalib_esc=8.014183284596456;
x1=4.255454545454546e+02;
x1vec=[427 424 436 432 414 422 424 426 428 422 426];
centrovec=[1110 1112 1110 1110 1111 1110 1110 1109 1110 1111];
centro=1.110300000000000e+03;

end

% % a=fin;
% % centrovec=zeros(1,10);
% % for i=1:10
% %     disp(a)
% %     nombrecentro=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_2_detalle_29\',num2str(a),'.tif'];
% %     imgcentro=imread(nombrecentro);
% %     imshow(imgcentro*4)
% %     titcentro=['Seleccione los límites del cuello. ',num2str(i),'/10'];
% %     title(titcentro)
% %     [xim,~]=ginput(2);
% %     xim=round(xim);
% %     centrovec(i)=(xim(1)+xim(2))/2;
% % end
% % centro=mean(centrovec);
% %
% % x1vec=zeros(1,11);
% % i=0;
% % for a=imR-50:10:imR+50
% %     i=i+1;
% %     disp(a)
% %     nombre=['G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Imágenes\Imágenes_d_20_lente_2_detalle_29\',num2str(a),'.tif'];
% %     img1=imread(nombre);
% %     imshow(img1*3)

```

```
% %      titl=['Seleccione los límites del cuello. ',num2str(i),'/11'];
% %      title(titl)
% %      [xim,~]=ginput(1);
% %      xim=round(xim);
% %      x1vec(i)=xim;
% % end
% % x1=mean(x1vec);
% %
% % radiocalib=abs(centro-x1);
% % radiocalib_esc=radiocalib*escala;
```

8.2.7. Detalle_comparacion

```
close all
%%iiiiiiii;CADA VEZ QUE AÑADAMOS UNA VARIABLE HAY QUE PONERLA EN LAS
%%EXCEPCIONES PARA QUE NO SE BORREN!!!!!!!!!!!!!!
list0={'Diámetro 10 mm','Diámetro 16 mm','Diámetro 8 mm','Diámetro 20
mm','Todos los diámetros'};
[opc0,tf0]=listdlg('ListSize',[250,80],'PromptString','Seleccione qué
superficie quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',list0);
if tf0~=0
listparo={'Sí','No'};
[opcparo,tfparo]=listdlg('ListSize',[430,40],'PromptString','Seleccione si
desea ver las gráficas de cada video cuando se analice más de
uno:','SelectionMode','single','ListString',listparo);
list1={'Video 6','Video 8','Video 15','Video 16','Video 17','Video
18','Todos'}; %Debemos poner el mismo número
%de opciones que valores introduzcamos en el vector de nombres de
%las carpetas.
list2={'Video 10','Video 11','Video 12','Video 13','Video 14','Video
19','Video 20','Todos'}; %Debemos poner el mismo número
%de opciones que valores introduzcamos en el vector de nombres de
%las carpetas.
list3={'Video 21 1','Video 21 2','Video 22 1','Video 22 2','Todos'};
%Debemos poner el mismo número
%de opciones que valores introduzcamos en el vector de nombres de
%las carpetas.
list4={'Video 26 1','Video 26 2','Video 27 1','Video 27 2','Todos'};
%Debemos poner el mismo número
%de opciones que valores introduzcamos en el vector de nombres de
%las carpetas.
switch opc0
case 1
[opc1,tf1]=listdlg('ListSize',[200,140],'PromptString','Seleccione
qué video quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',list1);
opc3=0; tf3=0; opc2=0; tf2=0; opc4=0; tf4=0;
case 2
[opc2,tf2]=listdlg('ListSize',[200,140],'PromptString','Seleccione
qué video quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',list2);
opc1=0; tf1=0; opc3=0; tf3=0; opc4=0; tf4=0;
case 3
[opc3,tf3]=listdlg('ListSize',[200,140],'PromptString','Seleccione
qué video quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',list3);
opc1=0; tf1=0; opc2=0; tf2=0; opc4=0; tf4=0;
case 4
[opc4,tf4]=listdlg('ListSize',[200,140],'PromptString','Seleccione
qué video quiere analizar:','SelectionMode','single','ListString',list4);
opc1=0; tf1=0; opc2=0; tf2=0; opc3=0; tf3=0;
```

```

case 5
    opc1=length(list1); tf1=1;
    opc2=length(list2); tf2=1;
    opc3=length(list3); tf3=1;
    opc4=length(list4); tf4=1;
end

%Directorio general de resultados.
dirgen='G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI matlab\Resultados\';
%Vector de resultados de los análisis del diámetro 10 mm.
d_10=char('Resultados angulo video 6\TODAS_1.mat','Resultados angulo video
8\TODAS_1.mat',...
'Resultados angulo video 15\TODAS_1.mat','Resultados angulo video
16\TODAS_1.mat',...
'Resultados angulo video 17\TODAS_1.mat','Resultados angulo video
18\TODAS_1.mat'); %Debemos asegurarnos que tenemos
%el mismo número de valores que en la lista de opciones.
%Vector de resultados de los análisis del diámetro 16 mm.
d_16=char('Resultados angulo video 10\TODAS_1.mat','Resultados angulo video
11\TODAS_1.mat',...
'Resultados angulo video 12\TODAS_1.mat','Resultados angulo video
13\TODAS_1.mat',...
'Resultados angulo video 14\TODAS_1.mat','Resultados angulo video
19\TODAS_1.mat',...
'Resultados angulo video 20\TODAS_1.mat');
%Vector de resultados de los análisis del diámetro 8 mm.
d_8=char('Resultados angulo video 21_1\TODAS_100.mat','Resultados angulo
video 21_2\TODAS_1.mat',...
'Resultados angulo video 22_1\TODAS_1.mat','Resultados angulo video
22_2\TODAS_1.mat');
%Vector de resultados de los análisis del diámetro 20 mm.
d_20=char('Resultados angulo video 26_1\TODAS_1.mat','Resultados angulo
video 26_2\TODAS_1.mat',...
'Resultados angulo video 27_1\TODAS_1.mat','Resultados angulo video
27_2\TODAS_1.mat');
casos10=[6 8 15 16 17 18];
casos16=[10 11 12 13 14 19 20];
casos8=[21 21.5 22 22.5];
casos20=[26 26.5 27 27.5];

%guardar=input('Desea guardar las gráficas (Si o No): ','s');
guardar='No'; %%%Si queremos guardar alguna gráfica indicar Si

radio10a=[]; radio10b=[]; TT10a=[]; TT10b=[]; [f10,c10]=size(d_10);
radio16a=[]; radio16b=[]; TT16a=[]; TT16b=[]; [f16,c16]=size(d_16);
radio8a=[]; radio8b=[]; TT8a=[]; TT8b=[]; [f8,c8]=size(d_8);
radio20a=[]; radio20b=[]; TT20a=[]; TT20b=[]; [f20,c20]=size(d_20);
%%%%%%Empieza código para diámetro 10
if tf1==1
    if opc1~=length(list1)
        in=opc1;
        out=opc1;
    else
        in=1;
        out=f10;
    end
    for II=in:out
        clearvars -except II dirgen d_10 d_16 radio10a radio10b radio16a...
            radio16b f10 c10 f16 c16 guardar in out opc1 opc2 list1
list2...

```

```

        tf1 tf2 opcparo tfparo listparo TT10a TT10b TT16a TT16b
casos10...
        casos16 list3 list4 opc3 opc4 tf3 tf4 d_8 d_20 casos8
casos20...
        TT8a TT8b TT20a TT20b radio8a radio8b radio20a radio20b f8
c8...
        f20 c20...
        mediaradio10a desvradio10a mediaradio10b desvradio10b
mediaTT10a desvTT10a mediaTT10b desvTT10b...
        mediaradio16a desvradio16a mediaradio16b desvradio16b
mediaTT16a desvTT16a mediaTT16b desvTT16b...
        mediaradio8a desvradio8a mediaradio8b desvradio8b mediaTT8a
desvTT8a mediaTT8b desvTT8b...
        mediaradio20a desvradio20a mediaradio20b desvradio20b
mediaTT20a desvTT20a mediaTT20b desvTT20b
        esp=find(d_10(II,:)=='t', 1, 'last' );    esp=esp+1;
        carpres=d_10(II,:);    carpres(esp:length(carpres))=[];
        nom=[dirgen,carpres];    load(nom);
        detalle_calculos;
        if strcmp(guardar,'Si')==1
            esp=find(d_10(II,:)=='\ ', 1, 'last' );
            carpresg=d_10(II,:);    carpresg(esp+1:length(carpresg))=[];
            for i=1:9 %%cambiar si añadimos gráficas en el programa
detalle_calculos !!!!!!!!!!!!!!!
                filename=[dirgen,carpresg,'figurap_',num2str(i)];
                saveas(ffigure(i),filename,'jpg');
                saveas(ffigure(i),filename);
            end
        end
        if in~=out
            radio10a=[radio10a,Rmov(1)];
            radio10b=[radio10b,Rmov2(1)];
            TT10a=[TT10a,((Tmov(end)+fps/2)-Tmov(1))];
            TT10b=[TT10b,((Tmov(end)+fps/2)-Tmov2(1))];
        end
        if opc1==length(list1) && opcparo==1;
            disp(';;;PULSE UNA TECLA!!!!')
            pause
        end
    end
end
if ~isempty(radio10a);
    clear errora errorb errorc errord
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    noval0=5;
    radio10a(noval0)=[];
    radio10b(noval0)=[];
    TT10a(noval0)=[];
    TT10b(noval0)=[];
    casos10(noval0)=[];
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    mediaradio10a=mean(radio10a); desvradio10a=std(radio10a);
    mediaradio10b=mean(radio10b); desvradio10b=std(radio10b);
    mediaTT10a=mean(TT10a); desvTT10a=std(TT10a);
    mediaTT10b=mean(TT10b); desvTT10b=std(TT10b);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    errora=abs(radio10a(1:length(radio10a))-
mean(radio10a))./(mean(radio10a))*100;
    errorb=abs(radio10b(1:length(radio10b))-
mean(radio10b))./(mean(radio10b))*100;
    errorc=abs(TT10a(1:length(TT10a))-mean(TT10a))./(mean(TT10a))*100;
    errord=abs(TT10b(1:length(TT10b))-mean(TT10b))./(mean(TT10b))*100;

```

```

figure(10)
hold on;
plot(casos10,errora,'ko',casos10,errora,'k:');
plot(casos10,errorb,'ro',casos10,errorb,'r:');
title('D10 Diferencia relativa en el radio de inicio de
movimiento')
ylabel('Error (%)'); xlabel('Casos analizados');
legend('Criterio propio','','99.9% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
box on;
grid on;
hold off;

figure(11)
hold on;
plot(casos10,errorc,'ko',casos10,errorc,'k:');
plot(casos10,errord,'ro',casos10,errord,'r:');
title('D10 Diferencia relativa en el tiempo de inicio de
movimiento')
ylabel('Error (%)'); xlabel('Casos analizados');
legend('Criterio propio','','99.9% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
box on;
grid on;
hold off;

figure(12)
hold on;
plot(casos10,radio10a,'ko',casos10,radio10a,'k:');
plot(casos10,radio10b,'ro',casos10,radio10b,'r:');
title('D10 Radio de inicio de movimiento')
ylabel('Radio (mm)'); xlabel('Casos analizados');
legend('Criterio propio','','99.9% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
box on;
grid on;
hold off;

figure(13)
hold on;
plot(casos10,TT10a,'ko',casos10,TT10a,'k:');
plot(casos10,TT10b,'ro',casos10,TT10b,'r:');
title('D10 Tiempo de inicio de movimiento respecto del final')
ylabel('Tiempo (ms)'); xlabel('Casos analizados');
legend('Criterio propio','','99.9% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
box on;
grid on;
hold off;

end
end
%%%%%%Empieza código para diámetro 16
if tf2==1
    if opc2~=length(list2)
        in=opc2;
        out=opc2;
    else
        in=1;
        out=f16;
    end
end

```

```

for II=in:out
    clearvars -except II dirgen d_10 d_16 radio10a radio10b radio16a...
        radio16b f10 c10 f16 c16 guardar in out opc1 opc2 list1
list2...
    tf1 tf2 opcpaaro tfpara listpara TT10a TT10b TT16a TT16b
casos10...
    casos16 list3 list4 opc3 opc4 tf3 tf4 d_8 d_20 casos8
casos20...
    TT8a TT8b TT20a TT20b radio8a radio8b radio20a radio20b f8
c8...
    f20 c20...
        mediaradio10a desvradio10a mediaradio10b desvradio10b
mediatT10a desvTT10a mediatT10b desvTT10b...
        mediaradio16a desvradio16a mediaradio16b desvradio16b
mediatT16a desvTT16a mediatT16b desvTT16b...
        mediaradio8a desvradio8a mediaradio8b desvradio8b mediatT8a
desvTT8a mediatT8b desvTT8b...
        mediaradio20a desvradio20a mediaradio20b desvradio20b
mediatT20a desvTT20a mediatT20b desvTT20b
    esp=find(d_16(II,:)=='t', 1, 'last' ); esp=esp+1;
    carpres=d_16(II,:); carpres(esp:length(carpres))=[];
    nom=[dirgen,carpres]; load(nom);
    detalle_calculos;
    if strcmp(guardar,'Si')==1
        espq=find(d_16(II,:)=='\ ', 1, 'last' );
        carpresq=d_16(II,:); carpresq(espq+1:length(carpresq))=[];
        for i=1:9 %%cambiar si añadimos gráficas en el programa
detalle_calculos !!!!!!!!!!!!!!!
            filename=[dirgen,carpres,'figurap_',num2str(i)];
            saveas(ffigure(i),filename,'jpg');
            saveas(ffigure(i),filename);
        end
    end
end
if in~=out
    radio16a=[radio16a;Rmov(1)];
    radio16b=[radio16b;Rmov2(1)];
    TT16a=[TT16a,((Tmov(end)+fps/2)-Tmov(1))];
    TT16b=[TT16b,((Tmov(end)+fps/2)-Tmov2(1))];
end
if opc2==length(list2) && opcpaaro==1;
    disp(';;;PULSE UNA TECLA!!!!')
    pause
end
end
if ~isempty(radio16a);
    clear errora errorb errorc errord
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% %
% %    noval6=[5,6,7];
% %
% %    radio16a(noval6)=[];
% %
% %    radio16b(noval6)=[];
% %
% %    TT16a(noval6)=[];
% %
% %    TT16b(noval6)=[];
% %
% %    casos16(noval6)=[];
% %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    mediaradio16a=mean(radio16a); desvradio16a=std(radio16a);
    mediaradio16b=mean(radio16b); desvradio16b=std(radio16b);
    mediatT16a=mean(TT16a); desvTT16a=std(TT16a);
    mediatT16b=mean(TT16b); desvTT16b=std(TT16b);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    errora=abs(radio16a(1:length(radio16a))-
mean(radio16a))./(mean(radio16a))*100;

```



```

        errorb=abs(radio16b(1:length(radio16b))-
mean(radio16b))./(mean(radio16b))*100;
        errorc=abs(TT16a(1:length(TT16a))-mean(TT16a))./(mean(TT16a))*100;
        errord=abs(TT16b(1:length(TT16b))-mean(TT16b))./(mean(TT16b))*100;

        figure(14)
        hold on;
        plot(casos16,errora,'ko',casos16,errora,'k:');
        plot(casos16,errorb,'ro',casos16,errorb,'r:');
        title('D16 Diferencia relativa en el radio de inicio de
movimiento')
        ylabel('Error (%)'); xlabel('Casos analizados');
        legend('Criterio propio','','87% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
        box on;
        grid on;
        hold off;

        figure(15)
        hold on;
        plot(casos16,errorc,'ko',casos16,errorc,'k:');
        plot(casos16,errord,'ro',casos16,errord,'r:');
        title('D16 Diferencia relativa en el tiempo de inicio de
movimiento')
        ylabel('Error (%)'); xlabel('Casos analizados');
        legend('Criterio propio','','87% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
        box on;
        grid on;
        hold off;

        figure(16)
        hold on;
        plot(casos16,radio16a,'ko',casos16,radio16a,'k:');
        plot(casos16,radio16b,'ro',casos16,radio16b,'r:');
        title('D16 Radio de inicio de movimiento')
        ylabel('Radio (mm)'); xlabel('Casos analizados');
        legend('Criterio propio','','87% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
        box on;
        grid on;
        hold off;

        figure(17)
        hold on;
        plot(casos16,TT16a,'ko',casos16,TT16a,'k:');
        plot(casos16,TT16b,'ro',casos16,TT16b,'r:');
        title('D16 Tiempo de inicio de movimiento respecto del final')
        ylabel('Tiempo (ms)'); xlabel('Casos analizados');
        legend('Criterio propio','','87% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
        box on;
        grid on;
        hold off;
    end
end
%%%%%%Empieza código para diámetro 8
if tf3==1
    if opc3~=length(list3)
        in=opc3;
        out=opc3;

```

```

else
    in=1;
    out=f8;
end
for II=in:out
    clearvars -except II dirgen d_10 d_16 radio10a radio10b radio16a...
        radio16b f10 c10 f16 c16 guardar in out opc1 opc2 list1
list2...
    tf1 tf2 opcpa ro tfpa ro listpa ro TT10a TT10b TT16a TT16b
casos10...
    casos16 list3 list4 opc3 opc4 tf3 tf4 d_8 d_20 casos8
casos20...
    TT8a TT8b TT20a TT20b radio8a radio8b radio20a radio20b f8
c8...
    f20 c20...
        mediaradio10a desvradio10a mediaradio10b desvradio10b
mediaTT10a desvTT10a mediaTT10b desvTT10b...
        mediaradio16a desvradio16a mediaradio16b desvradio16b
mediaTT16a desvTT16a mediaTT16b desvTT16b...
        mediaradio8a desvradio8a mediaradio8b desvradio8b mediaTT8a
desvTT8a mediaTT8b desvTT8b...
        mediaradio20a desvradio20a mediaradio20b desvradio20b
mediaTT20a desvTT20a mediaTT20b desvTT20b
    esp=find(d_8(II,:)=='t', 1, 'last' ); esp=esp+1;
    carpres=d_8(II,:); carpres(esp:length(carpres))=[];
    nom=[dirgen,carpres]; load(nom);
    DD=8;
    detalle_calculos;
    if strcmp(guardar,'Si')==1
        esp=find(d_8(II,:)=='\ ', 1, 'last' );
        carpresg=d_8(II,:); carpresg(esp+1:length(carpresg))=[];
        for i=1:9 %%cambiar si añadimos gráficas en el prgrama
detalle_calculos !!!!!!!!!!!!!!!
            filename=[dirgen,carpresg,'figurap_',num2str(i)];
            saveas(ffigure(i),filename,'jpg');
            saveas(ffigure(i),filename);
        end
    end
    if in~=out
        radio8a=[radio8a;Rmov(1)];
        radio8b=[radio8b;Rmov2(1)];
        TT8a=[TT8a, ((Tmov(end)+fps/2)-Tmov(1))];
        TT8b=[TT8b, ((Tmov(end)+fps/2)-Tmov2(1))];
    end
    if opc2==length(list2) && opcpa ro==1;
        disp(';;;PULSE UNA TECLA!!!!')
        pause
    end
end
end
if ~isempty(radio8a);
    clear errora errorb errorc errord
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    mediaradio8a=mean(radio8a); desvradio8a=std(radio8a);
    mediaradio8b=mean(radio8b); desvradio8b=std(radio8b);
    mediaTT8a=mean(TT8a); desvTT8a=std(TT8a);
    mediaTT8b=mean(TT8b); desvTT8b=std(TT8b);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    errora=abs(radio8a(1:length(radio8a))-
mean(radio8a))./(mean(radio8a))*100;
    errorb=abs(radio8b(1:length(radio8b))-
mean(radio8b))./(mean(radio8b))*100;

```

```

errorc=abs(TT8a(1:length(TT8a))-mean(TT8a))./(mean(TT8a))*100;
errord=abs(TT8b(1:length(TT8b))-mean(TT8b))./(mean(TT8b))*100;

figure(18)
hold on;
plot(casos8,errora,'ko',casos8,errora,'k:');
plot(casos8,errorb,'ro',casos8,errorb,'r:');
title('D8 Diferencia relativa en el radio de inicio de movimiento')
ylabel('Error (%)'); xlabel('Casos analizados');
legend('Criterio propio','','98.8% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
box on;
grid on;
hold off;

figure(19)
hold on;
plot(casos8,errorc,'ko',casos8,errorc,'k:');
plot(casos8,errord,'ro',casos8,errord,'r:');
title('D8 Diferencia relativa en el tiempo de inicio de
movimiento')
ylabel('Error (%)'); xlabel('Casos analizados');
legend('Criterio propio','','98.8% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
box on;
grid on;
hold off;

figure(20)
hold on;
plot(casos8,radio8a,'ko',casos8,radio8a,'k:');
plot(casos8,radio8b,'ro',casos8,radio8b,'r:');
title('D8 Radio de inicio de movimiento')
ylabel('Radio (mm)'); xlabel('Casos analizados');
legend('Criterio propio','','98.8% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
box on;
grid on;
hold off;

figure(21)
hold on;
plot(casos8,TT8a,'ko',casos8,TT8a,'k:');
plot(casos8,TT8b,'ro',casos8,TT8b,'r:');
title('D8 Tiempo de inicio de movimiento respecto del final')
ylabel('Tiempo (ms)'); xlabel('Casos analizados');
legend('Criterio propio','','98.8% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
box on;
grid on;
hold off;
end
end
%%%%%%Empieza código para diámetro 20
if tf4==1
    if opc4~=length(list4)
        in=opc4;
        out=opc4;
    else
        in=1;
        out=f20;
    end
end

```

```

end
for II=in:out
    clearvars -except II dirgen d_10 d_16 radio10a radio10b radio16a...
        radio16b f10 c10 f16 c16 guardar in out opc1 opc2 list1
list2...
    tf1 tf2 opcparo tfparo listparo TT10a TT10b TT16a TT16b
casos10...
    casos16 list3 list4 opc3 opc4 tf3 tf4 d_8 d_20 casos8
casos20...
    TT8a TT8b TT20a TT20b radio8a radio8b radio20a radio20b f8
c8...
    f20 c20...
        mediaradio10a desvradio10a mediaradio10b desvradio10b
mediaTT10a desvTT10a mediaTT10b desvTT10b...
        mediaradio16a desvradio16a mediaradio16b desvradio16b
mediaTT16a desvTT16a mediaTT16b desvTT16b...
        mediaradio8a desvradio8a mediaradio8b desvradio8b mediaTT8a
desvTT8a mediaTT8b desvTT8b...
        mediaradio20a desvradio20a mediaradio20b desvradio20b
mediaTT20a desvTT20a mediaTT20b desvTT20b
    esp=find(d_20(II,:)=='t', 1, 'last' ); esp=esp+1;
    carpres=d_20(II,:); carpres(esp:length(carpres))=[];
    nom=[dirgen,carpres]; load(nom);
    DD=20;
    detalle_calculos;
    if strcmp(guardar,'Si')==1
        esp=find(d_20(II,:)=='\ ', 1, 'last' );
        carpresg=d_20(II,:); carpresg(esp+1:length(carpresg))=[];
        for i=1:9 %%cambiar si añadimos gráficas en el programa
detalle_calculos !!!!!!!!!!!!!!!
            filename=[dirgen,carpresg,'figurap_',num2str(i)];
            saveas(ffigure(i),filename,'jpg');
            saveas(ffigure(i),filename);
        end
    end
end
if in~=out
    radio20a=[radio20a;Rmov(1)];
    radio20b=[radio20b;Rmov2(1)];
    TT20a=[TT20a, ((Tmov(end)+fps/2)-Tmov(1))];
    TT20b=[TT20b, ((Tmov(end)+fps/2)-Tmov2(1))];
end
if opc2==length(list2) && opcparo==1;
    disp(';;;PULSE UNA TECLA!!!!')
    pause
end
end
if ~isempty(radio20a);
    clear errora errorb errorc errord
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    mediaradio20a=mean(radio20a); desvradio20a=std(radio20a);
    mediaradio20b=mean(radio20b); desvradio20b=std(radio20b);
    mediaTT20a=mean(TT20a); desvTT20a=std(TT20a);
    mediaTT20b=mean(TT20b); desvTT20b=std(TT20b);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    errora=abs(radio20a(1:length(radio20a))-
mean(radio20a))./(mean(radio20a))*100;
    errorb=abs(radio20b(1:length(radio20b))-
mean(radio20b))./(mean(radio20b))*100;
    errorc=abs(TT20a(1:length(TT20a))-mean(TT20a))./(mean(TT20a))*100;
    errord=abs(TT20b(1:length(TT20b))-mean(TT20b))./(mean(TT20b))*100;

```

```

        figure(23)
        hold on;
        plot(casos20,errora,'ko',casos20,errora,'k:');
        plot(casos20,errorb,'ro',casos20,errorb,'r:');
        title('D20 Diferencia relativa en el radio de inicio de
movimiento')
        ylabel('Error (%)'); xlabel('Casos analizados');
        legend('Criterio propio','','98.8% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
        box on;
        grid on;
        hold off;

        figure(24)
        hold on;
        plot(casos20,errorc,'ko',casos20,errorc,'k:');
        plot(casos20,errorb,'ro',casos20,errorb,'r:');
        title('D20 Diferencia relativa en el tiempo de inicio de
movimiento')
        ylabel('Error (%)'); xlabel('Casos analizados');
        legend('Criterio propio','','98.8% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
        box on;
        grid on;
        hold off;

        figure(25)
        hold on;
        plot(casos20,radio20a,'ko',casos20,radio20a,'k:');
        plot(casos20,radio20b,'ro',casos20,radio20b,'r:');
        title('D20 Radio de inicio de movimiento')
        ylabel('Radio (mm)'); xlabel('Casos analizados');
        legend('Criterio propio','','98.8% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
        box on;
        grid on;
        hold off;

        figure(26)
        hold on;
        plot(casos20,TT20a,'ko',casos20,TT20a,'k:');
        plot(casos20,TT20b,'ro',casos20,TT20b,'r:');
        title('D20 Tiempo de inicio de movimiento respecto del final')
        ylabel('Tiempo (ms)'); xlabel('Casos analizados');
        legend('Criterio propio','','98.8% más bajo que el
inicio','','Location','northeastoutside');
        box on;
        grid on;
        hold off;
    end
end
else
    disp('NO HA SELECCIONADO NINGÚN VALOR')
end

```

8.2.8. Detalle_calculos

```

close (figure(1), figure(2), figure(3), figure(4), figure(5), figure(6), figure(7)
, figure(8), figure(9))
[x1,x2,y1,y2,z1,z2,iniR,dif11,dif12,dif2,fps]=detalle_parametros(nom);

angulo2=smooth(angulo(:,1));
figure(1)
plot(T,angulo(:,1), 'r.', T, angulo2, 'b. ');
title('Ángulo');
ylabel('Ángulo (°)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;

Rmax2=smooth(Rmax(:,3));
x=mean(Rmax2(x1:x2));

figure(2)
hold on
plot(T, (Rmax(:,3)), 'r. ');
plot(T, Rmax2, 'b. ');
plot(T, x, 'k. ');
title('Radio')
ylabel('Radio (mm)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
hold off

figure(3)
e=abs(smooth(Rmax(:,3))-Rmax(:,3))./Rmax(:,3)*100;
plot(T,e, 'b. ')
title('Error radio suavizado')

[fR,cR]=size(Rmax);
velR2=zeros(fR,1);
velR2(1)=(Rmax2(2)-Rmax2(1))/fps;
velR2(fR)=(Rmax2(fR)-Rmax2(fR-1))/fps;
velR2(2:fR-1)=(Rmax2(3:fR)-Rmax2(1:(fR-2)))/(2*fps);
y= mean(velR2(y1:y2));

figure(4)
hold on
%Modificado para hacer eje Y logarítmico
plot(T,abs(velR(:,3)), 'r. ')
plot(T,abs(velR2), 'b. ');
plot(T,abs(y), 'k. ');
title('Velocidad')
ylabel('Velocidad (mm/ms)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
hold off

%figure(84)
%ee=abs(velR(:,3)-velR2./velR(:,3))*100;
%plot(T,ee, 'b. ')
%title('Error velocidad suavizada')

[fV,cV]=size(velR2);
acR5=zeros(fV,1);

```

```

acR3=zeros(fV,1);
acR4=zeros(fV,1);
acR5(1)=(velR2(2)-velR2(1))/fps;
acR5(2:fV)=(velR2(2:fV)-velR2(1:fV-1))/fps;
acR3(1)=(velR2(2)-velR2(1))/fps;
acR3(2:fV-1)=(velR2(3:fV)-velR2(1:(fV-2)))/(2*fps);
acR3(fV)=(velR2(fV)-velR2(fV-1))/fps;
acR4(1)=(Rmax2(3)-2*Rmax2(2)+Rmax2(1))/(fps^2);
acR4(2:fV-1)=(Rmax2(3:fV)-2*Rmax2(2:fV-1)+Rmax2(1:(fV-2)))/(fps^2);
acR4(fV)=(Rmax2(fV)-2*Rmax2(fV-1)+Rmax2(fV-2))/(fps^2);

z= mean(acR5(z1:z2));
figure(5)
hold on
plot(T,acR5,'r.');
plot(T,acR3,'b.');
plot(T,z,'k.');
%plot(T,acR4,'c.');
%plot(T,acR(:,3),'r.')
title('Aceleración')
legend('Suavizada, der(vel) hacia delante','Suavizada, der(vel) centrada','media acR2')
ylabel('Aceleración (mm/ms^2)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
hold off

cont=1;
%saco máximos
for i=iniR:length(Rmax2)
    if Rmax2(i)>Rmax2(i+1:length(Rmax2))
        rmov(cont)=Rmax2(i);
        tmov(cont)=T(i);
        cont=cont+1;
    end
end
rmov(cont)=Rmax2(end);
tmov(cont)=T(end);

figure(6)
plot(tmov,rmov,'k.');
title('Radio. Zona de movimiento')
ylabel('Radio (mm)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;

introT=[];
introR=[];
%saco puntos intermedios eliminados antes
for i=2:length(rmov)
    dif=abs(tmov(i)-tmov(i-1));
    if dif>=difl1 && dif<=difl2
        tt=tmov(i-1)+fps;
        while tt~=tmov(i)
            pos=find(tt==T);
            introT=[introT,T(pos)];
            introR=[introR,Rmax2(pos)];
            tt=tt+fps;
        end
    end
end
end

```

```

cont=1;
%introduzco los puntos eliminados
for i=1:length(rmov)
    Rmov(cont)=rmov(i);
    Tmov(cont)=tmov(i);
    for j=1:length(introT)
        if (Tmov(cont)+fps)==introT(j)
            cont=cont+1;
            Rmov(cont)=introR(j);
            Tmov(cont)=introT(j);
        end
    end
    cont=cont+1;
end
dif=0;
eliminar=[];
s=length(Rmov);
%elimino los puntos que consideramos no deben estar en Rmov y que gracias
%a dif12 no hemos intrucido puntos intermedios
for i=length(Rmov)-1:-1:1
    dif=abs(Tmov(s)-Tmov(i));
    if dif>dif2
        eliminar=[eliminar,i];
    else
        s=s-1;
        while sum(eliminar==s)==1
            s=s-1;
        end
    end
end
Rmov(eliminar)=[];
Tmov(eliminar)=[];

figure(7)
hold on
plot(T,Rmax2,'r. ');
plot(Tmov,Rmov,'k. ');
title('Radio')
ylabel('Radio (mm)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
legend('Radio suavizado','Zona movimiento','Location','southwest')
hold off

figure(8)
plot(Tmov,Rmov,'k. ');
title('Radio. Zona de movimiento')
ylabel('Rádio (mm)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;

%%%%%%%%%%Intento de conseguir un tiempo de movimiento constante
if DD==10 || DD==10.1
    percent=0.999;
elseif DD==16 || DD==16.1
    percent=0.87;
elseif DD==8
    percent=0.988;
elseif DD==20
    percent=0.988;
end

```



```

cont=1;
for i=iniR:length(Rmax2)
    if (Rmax2(i:length(Rmax2))) < percent*Rmax2(1)
        Rmov2(cont)=Rmax2(i);
        Tmov2(cont)=T(i);
        cont=cont+1;
    end
end
%rmov(cont)=Rmax2(end);
%tmov(cont)=T(end);
figure(9)
hold on
plot(T,Rmax2,'r. ');
plot(Tmov2,Rmov2,'k. ');
title('Radio (%)')
ylabel('Radio (mm)'); xlabel('Tiempo (ms)');
box on;
grid on;
legend('Radio suavizado','Zona movimiento','Location','southwest')
hold off;
disp('-----')
disp('-----')
disp('-----')
disp(carpres)
res1=['Radio en el que comienza el movimiento = ',num2str(Rmov(1)),' mm y ',...
    'ocurre en el tiempo ',num2str(Tmov(1)),' ms o referenciado al final ',...
    num2str((Tmov(end)+fps/2)-Tmov(1)),' ms.'];
disp(res1);
res2=['La burbuja se desprende en el tiempo: ',num2str(Tmov(end)+fps/2),' ms.'];
disp(res2);
res3=['La velocidad al inicio del movimiento es: ',num2str(abs(velR2(Tmov(1)==T))),' mm/ms, sabiendo que cero sería ',num2str(y),' mm/ms.'];
disp(res3);
res4=['La velocidad máxima es: ',num2str(abs(min(velR2))),' mm/ms.'];
disp(res4);
res5=['La aceleración máxima es: ',num2str(abs(min(acR3))),' mm/ms^2.'];
disp(res5);

res6=['Radio en el que comienza el movimiento = ',num2str(Rmov2(1)),' mm y ',...
    'ocurre en el tiempo ',num2str(Tmov2(1)),' ms o referenciado al final ',...
    num2str((Tmov(end)+fps/2)-Tmov2(1)),' ms.'];
disp(res6);

```

8.2.9. Detalle_parametros

```

function
[x1,x2,y1,y2,z1,z2,iniR,dif11,dif12,dif2,fps]=detalle_parametros(nom)

switch nom
    %Diámetro 10 mm
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 6\TODAS_1.mat'

x1=300;x2=800;y1=200;y2=700;z1=200;z2=700;iniR=892;dif11=1;dif12=3;dif2=3;f
ps=1;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 8\TODAS_1.mat'

x1=1000;x2=1500;y1=500;y2=1500;z1=500;z2=1500;iniR=1500;dif11=2;dif12=6;dif
2=6;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 15\TODAS_1.mat'

x1=1000;x2=1500;y1=500;y2=1500;z1=500;z2=1500;iniR=1500;dif11=2;dif12=22;di
f2=24;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 16\TODAS_1.mat'

x1=1000;x2=1500;y1=500;y2=1500;z1=500;z2=1500;iniR=1971;dif11=2;dif12=32;di
f2=32;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 17\TODAS_1.mat'

x1=1000;x2=1500;y1=500;y2=1500;z1=500;z2=1500;iniR=1978;dif11=2;dif12=40;di
f2=40;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 18\TODAS_1.mat'

x1=1000;x2=1500;y1=500;y2=1500;z1=500;z2=1500;iniR=2015;dif11=2;dif12=22;di
f2=24;fps=2;
    %Diámetro 16 mm
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 10\TODAS_1.mat'

x1=750;x2=1000;y1=250;y2=1000;z1=250;z2=1000;iniR=1296;dif11=2;dif12=22;dif
2=24;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 11\TODAS_1.mat'

x1=750;x2=1500;y1=250;y2=1500;z1=250;z2=1500;iniR=1870;dif11=2;dif12=34;dif
2=34;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 12\TODAS_1.mat'

x1=750;x2=1500;y1=250;y2=1500;z1=250;z2=1500;iniR=1662;dif11=2;dif12=36;dif
2=36;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 13\TODAS_1.mat'

x1=750;x2=1500;y1=250;y2=1500;z1=250;z2=1500;iniR=1814;dif11=2;dif12=36;dif
2=36;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 14\TODAS_1.mat'

```

```
x1=750;x2=1500;y1=250;y2=1500;z1=250;z2=1500;iniR=1687;dif11=2;dif12=28;dif2=28;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 19\TODAS_1.mat'

x1=750;x2=1500;y1=250;y2=1500;z1=250;z2=1500;iniR=1761;dif11=2;dif12=12;dif2=12;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 20\TODAS_1.mat'

x1=750;x2=1500;y1=250;y2=1500;z1=250;z2=1500;iniR=1641;dif11=2;dif12=50;dif2=50;fps=2;
    %Diámetro 8 mm
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 21_1\TODAS_100.mat'

x1=500;x2=750;y1=500;y2=750;z1=500;z2=750;iniR=750;dif11=2;dif12=28;dif2=28;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 21_2\TODAS_1.mat'

x1=500;x2=750;y1=500;y2=750;z1=500;z2=750;iniR=750;dif11=2;dif12=24;dif2=24;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 22_1\TODAS_1.mat'

x1=500;x2=750;y1=500;y2=750;z1=500;z2=750;iniR=790;dif11=2;dif12=20;dif2=20;fps=2;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 22_2\TODAS_1.mat'

x1=500;x2=750;y1=500;y2=750;z1=500;z2=750;iniR=750;dif11=2;dif12=24;dif2=24;fps=2;
    %Diámetro 20 mm
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 26_1\TODAS_1.mat'

x1=250;x2=376;y1=250;y2=376;z1=250;z2=376;iniR=376;dif11=2;dif12=36;dif2=36;fps=4;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 26_2\TODAS_1.mat'

x1=250;x2=376;y1=250;y2=376;z1=250;z2=376;iniR=376;dif11=2;dif12=14;dif2=14;fps=4;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 27_1\TODAS_1.mat'

x1=250;x2=376;y1=250;y2=376;z1=250;z2=376;iniR=376;dif11=2;dif12=22;dif2=22;fps=4;
    case 'G:\Mi unidad\TFG\TFG mis documentos\MI
matlab\Resultados\Resultados angulo video 27_2\TODAS_1.mat'

x1=250;x2=376;y1=250;y2=376;z1=250;z2=376;iniR=376;dif11=2;dif12=26;dif2=26;fps=4;
end
```