



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA GENERACIÓN Y DESARROLLO DEL CHORRO DE WORTHINGTON TRAS EL IMPACTO DE UN DISCO SOBRE UN LÍQUIDO

Alumno/a: **Fernández Liétor, Israel**

Tutor/a: Prof. D. Rocío Bolaños Jiménez
Dpto.: Mecánica de Fluidos

Julio, 2018



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Mecánica de Fluidos

D. Rocío Bolaños Jiménez, tutora del Proyecto Fin de Carrera titulado: ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA GENERACIÓN Y DESARROLLO DEL CHORRO DE WORTHINGTON TRAS EL IMPACTO DE UN DISCO SOBRE UN LÍQUIDO, que presenta Fernández Liétor, Israel, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Julio de 2018

El alumno:

Los tutores:

Fernández Liétor, Israel

Rocío Bolaños Jiménez

Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Objetivos	11
1.2. Motivación y justificación del trabajo.....	12
1.3. Estudios previos: estado del arte del problema	13
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	19
2.1. Instalación experimental y metodología.....	19
2.2. Parámetros adimensionales	24
3. PROCESADO DE IMÁGENES.....	33
3.1. Conceptos de análisis de imágenes	33
3.1.1. Adquisición de imágenes	34
3.1.2. Preprocesado.....	36
3.1.3. Detección de bordes	48
3.1.4. Segmentación	53
3.1.5. Reconocimiento, localización y extracción de objetos	59
3.2. Validación código	61
3.3. Código para obtener características del cierre de la cavidad.....	71
3.4. Código para obtener características del chorro	77
4. RESULTADOS.....	83
4.1. Cierre de la cavidad	84
4.2. Chorro de Worthington	94
4.3. Análisis de resultados: efecto de los parámetros.....	102
4.3.1. Cierre de la cavidad	104
4.3.2. Formación chorro	108
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	115
Bibliografía	119
6. Anexos.....	121
6.1. Anexo I. Validación código	121
6.2. Anexo II. Código para obtener características cavidad	123
6.3. Anexo III. Código para obtener características chorro	125
6.4. Anexo V. Función “segCroissRegion”	128
6.5. Anexo VI. Función “objectTracking”	128

6.6.	Anexo VII. Función “dibujarLineas”	129
6.7.	Anexo VIII. Función “minCavidad”	129
6.8.	Anexo VIII. Función “maxChorro”	131
6.9.	Anexo IX. Resto de resultados de los ensayos.....	132

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1 Ensayo realizado por Antkowiak et al. 2007	16
Ilustración 1.2 Ensayo realizado por Bartolo et al. 2006	16
Ilustración 1.3 Ensayo realizado por Bergmann et al. 2009	17
Ilustración 1.4 Ensayo realizado por Gekle et al. 2010	17
Ilustración 2.1 Esquema depósito y motor linear (extraída de Bergmann JFM 2009).....	19
Ilustración 2.2 Instalación para la recogida de imágenes.....	21
Ilustración 2.3 Calculo rango matriz con Mathematica	27
Ilustración 3.1 Análisis de imágenes.....	33
Ilustración 3.2 Histograma imagen a analizar	36
Ilustración 3.3 Imagen ecualizada	38
Ilustración 3.4 Operación diferencia entre imágenes	39
Ilustración 3.5 Operación de apertura (erosión y dilatación)	41
Ilustración 3.6 Ejemplo mascara filtro de media.....	42
Ilustración 3.7 Ejemplo filtro de media	43
Ilustración 3.8 Mascara para filtro Gaussiano	44
Ilustración 3.9 Ejemplo filtro Gaussiano.....	44
Ilustración 3.10 Ejemplo filtro Laplaciana.....	45
Ilustración 3.11 Ejemplo filtro Laplaciana con suavizado por Gauss.....	46
Ilustración 3.12 Ejemplo filtro Prewitt.....	46
Ilustración 3.13 Ejemplo filtro Sobel.....	47
Ilustración 3.14 Mascara para detección bordes mediante Roberts.....	49
Ilustración 3.15 Mascara para detección bordes mediante Prewitt	49
Ilustración 3.16 Ejemplo detección bordes con Prewitt	50
Ilustración 3.17 Ejemplo detección bordes con Sobel.....	50
Ilustración 3.18 Mascara para detección bordes con laplaciana	51
Ilustración 3.19 Mascara genérica para detección bordes con laplaciana.....	51
Ilustración 3.20 Ejemplo detección bordes con laplaciana	52
Ilustración 3.21 Ejemplo detección bordes con Canny.....	53
Ilustración 3.22 Ejemplo segmentación con la transformada de Hough	54
Ilustración 3.23 Ejemplo direcciones más repetidas en la transformada de Hough.....	55
Ilustración 3.24 Dibujado de las líneas de las direcciones más repetidas en la transformada de Hough.....	56
Ilustración 3.25 Ejemplo segmentación por umbral	57
Ilustración 3.26 Ejemplo segmentación con crecimiento de regiones	58
Ilustración 3.27 Ejemplo detección bordes a partir de crecimiento de regiones	59
Ilustración 3.28 Pasos a seguir en el procesado de imágenes	60
Ilustración 3.29 Ejemplo función “ginput”	63
Ilustración 3.30 Ejemplo para sacar factor conversión.....	63
Ilustración 3.31 Ejemplo imagen con información parte inferior	65
Ilustración 3.32 Ejemplo validación código	68
Ilustración 3.33 Gráfica altura-tiempo	69
Ilustración 3.34 Grafica velocidad.....	69
Ilustración 4.1 Ejemplo cierre cavidad con imagen binarizada	84
Ilustración 4.2 Ejemplo cierre cavidad con imagen original.....	85
Ilustración 4.3 Ensayo 1, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad.....	87

Ilustración 4.4 Ensayo 1 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	88
Ilustración 4.5 Ensayo 23, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	90
Ilustración 4.6 Ensayo 23 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	90
Ilustración 4.7 Ejemplo crecimiento chorro con imagen original	94
Ilustración 4.8 Ensayo 1, a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	97
Ilustración 4.9 Ensayo 24 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	99
Ilustración 4.10 Tiempo de colapso adimensional frente al Re	104
Ilustración 4.11 Tiempo de colapso adimensional frente al Re	105
Ilustración 4.12 Tiempo de colapso adimensional frente al Fr	105
Ilustración 4.13 Profundidad adimensional frente al Re	106
Ilustración 4.14 Profundidad adimensional frente al Re	107
Ilustración 4.15 Profundidad adimensional frente al Fr	107
Ilustración 4.16 Altura máxima del chorro adimensional frente al Re	108
Ilustración 4.17 Altura máxima del chorro adimensional frente al Re	109
Ilustración 4.18 Altura máxima del chorro adimensional frente al Fr	109
Ilustración 4.19 Velocidad máxima del chorro adimensional frente al Re	110
Ilustración 4.20 Velocidad máxima del chorro adimensional frente al Re	111
Ilustración 4.21 Velocidad máxima del chorro adimensional frente al Fr	111
Ilustración 4.22 Volumen del chorro adimensional frente al Re	112
Ilustración 4.23 Volumen del chorro adimensional frente al Re	113
Ilustración 4.24 Volumen del chorro adimensional frente al Fr	113
Ilustración 6.1 Ensayo 2, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	132
Ilustración 6.2 Ensayo 2 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	132
Ilustración 6.3 Ensayo 2 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	133
Ilustración 6.4 Ensayo 3 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	134
Ilustración 6.5 Ensayo 4, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	135
Ilustración 6.6 Ensayo 4 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	135
Ilustración 6.7 Ensayo 4 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	136
Ilustración 6.8 Ensayo 5, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	137
Ilustración 6.9 Ensayo 5 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	137
Ilustración 6.10 Ensayo 5 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	138
Ilustración 6.11 Ensayo 6 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	139

Ilustración 6.12 Ensayo 7 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	139
Ilustración 6.13 Ensayo 8, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad.....	140
Ilustración 6.14 Ensayo 8 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	140
Ilustración 6.15 Ensayo 8 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	141
Ilustración 6.16 Ensayo 9, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad.....	142
Ilustración 6.17 Ensayo 9 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	142
Ilustración 6.18 Ensayo 9 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.	143
Ilustración 6.19 Ensayo 10, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	144
Ilustración 6.20 Ensayo 10 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	144
Ilustración 6.21 Ensayo 10 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	145
Ilustración 6.22 Ensayo 11 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	145
Ilustración 6.23 Ensayo 12 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	146
Ilustración 6.24 Ensayo 13 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	147
Ilustración 6.25 Ensayo 14, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	147
Ilustración 6.26 Ensayo 14 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	148
Ilustración 6.27 Ensayo 14 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	148
Ilustración 6.28 Ensayo 15 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	149
Ilustración 6.29 Ensayo 16, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	149
Ilustración 6.30 Ensayo 16 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	150
Ilustración 6.31 Ensayo 16 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	150
Ilustración 6.32 Ensayo 17 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	151
Ilustración 6.33 Ensayo 18, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	151
Ilustración 6.34 Ensayo 18 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	152
Ilustración 6.35 Ensayo 19, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	152

Ilustración 6.36 Ensayo 19 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	153
Ilustración 6.37 Ensayo 19 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	153
Ilustración 6.38 Ensayo 20, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	154
Ilustración 6.39 Ensayo 20 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	154
Ilustración 6.40 Ensayo 20 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	155
Ilustración 6.41 Ensayo 21, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	155
Ilustración 6.42 Ensayo 21 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	156
Ilustración 6.43 Ensayo 21 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	156
Ilustración 6.44 Ensayo 22, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad	157
Ilustración 6.45 Ensayo 22 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.	157
Ilustración 6.46 Ensayo 22 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.....	158

Índice de tablas

Tabla 2.1 Equivalencia parámetros motor con velocidad real	22
Tabla 2.2 Parámetros según el ensayo	23
Tabla 2.3 Variables utilizadas para el estudio de la formación de la cavidad	26
Tabla 2.4 Variables con dimensiones independientes	26
Tabla 2.5 Matriz entre variables y variables con dimensiones independientes	26
Tabla 2.6 Matriz entre variables y variables con dimensiones independientes	28
Tabla 2.7 Valores de Re y Fr según el ensayo	32
Tabla 4.1 Tabla resultados ensayos para la cavidad	93
Tabla 4.2 Tabla resultados ensayos para el desarrollo del chorro	101
Tabla 4.3 Tabla resumen ensayos.....	103

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del impacto de objetos sobre superficies líquidas es un fenómeno que requiere de conceptos de mecánica de fluidos moderna y clásica. El estudio de cuerpos impactando en líquidos se inició hace un siglo (Worthington, 1908), donde se observaron los diferentes tipos de cavidades y chorros que se pueden generar en el impacto de un objeto en el agua. Desde entonces, se han hecho investigaciones teniendo en cuenta la fuerza que genera el agua sobre el objeto y se han dado explicaciones sobre la geometría de la cavidad de aire con diferentes condiciones para hacer el estudio de este fenómeno.

El fenómeno que sucede es que cuando un objeto golpea el agua por ejemplo, el líquido no siempre se cierra directamente sobre él. Lo que ocurre es que el agua formará un cráter alrededor del impacto del objeto. A medida que el agua vuelve a su lugar, algunas gotas son expulsadas al aire y estas gotas se convierten en lo que se llama el chorro de Worthington estas pueden dispararse muy por encima de la altura desde la que se cayó el objeto, por lo que cuando tiramos una roca en una piscina, el chorro resultante puede empaparnos.

El cráter producido en el líquido después del impacto, es lo suficientemente profundo, por lo que su cierre conduce a un chorro que surge de su centro. Este chorro de alta velocidad puede luego fragmentarse enviando una o más gotas hacia arriba a una velocidad de impacto aún mayor.

A día de hoy este problema ha generado una gran cantidad de trabajos, aunque poco se conoce sobre el impacto de sólidos sobre líquidos de alta viscosidad. Aunque a priori, se puede pensar que la viscosidad podría amortiguar ese tipo de fenómenos, se mostrará que cuando el fluido es viscoso, se forma un chorro muy definido que avanza a gran velocidad.

1.1. Objetivos

El objeto del trabajo es la investigación experimentalmente el chorro formado por el colapso de una cavidad creada por el impacto de un objeto (en este caso un disco) en un depósito con un líquido el cual se ira variando su viscosidad para ver la influencia de esta. Se mostrará que los chorros pueden surgir con formas y velocidades muy diferentes, según los parámetros de impacto, generando así chorros y gotas con varios tamaños y velocidades distintas.

En este trabajo, se realizará la caracterización de la dinámica de chorro. Para ello se definirán los parámetros adecuados más relevantes para realizar un análisis dimensional, se considera que el impacto de un disco a velocidad constante sobre una superficie líquida plana.

Después de se tratará de observar cual es la velocidad del chorro y la variación del radio como una función de los parámetros de impacto así como el radio de la cavidad que se forma antes de que esta colapse, seguidamente se discutirá la influencia de los parámetros del líquido en la velocidad y dimensiones de la cavidad y del chorro.

El efecto de la viscosidad del líquido en la dinámica del chorro se cuantificará ya que se harán experimentos con agua y glicerina y se verá el efecto contrario a lo que la intuición diría sobre el comportamiento de la velocidad del chorro con la viscosidad.

1.2. Motivación y justificación del trabajo

Desde las primeras fotografías tomadas hace más de cien años, seguidas de las famosas cámaras de alta velocidad, y hasta las secuencias de anuncios mundialmente famosas de una gota cayendo en el café, el chorro que resulta de una gota que impacta en una superficie líquida es una de las imágenes más icónicas de la mecánica de fluidos. Esta fama entre el público en general se debe sin duda a su gran atractivo estético, pero el impacto también tiene un gran campo de aplicaciones como pueden ser:

- Impresión de inyección de tinta.
- Microfabricación de objetos tridimensionales.
- Ruido bajo el agua de la lluvia.
- Forense: análisis del patrón de manchas de sangre.
- Cráteres de impacto.
- Sprays
- El olor a tierra, conocido como petrichor, presente después de una lluvia en un día caluroso.

La diversidad de estos ejemplos explica por qué el impacto de la caída ha sido estudiado por muchos autores. Sin embargo, un aspecto ha sido apenas caracterizado hasta ahora: la dinámica del chorro y los aerosoles posteriores producidos por un impacto de caída. Esta La pregunta es crucial en diferentes situaciones, como la transmisión de enfermedades y la atomización de líquidos o su contribución al rocío del mar cuando una gota impacta el océano.

Lo que justifica la realización de este Trabajo Final de Master es que en los estudios realizados anteriormente no se ha sacado suficiente información sobre el impacto de solidos sobre líquidos viscosos, por lo que se trataría de una condición impuesta de este trabajo.

1.3. Estudios previos: estado del arte del problema

Se han tomado fotografías de los impactos de una gota esférica de agua impactando sobre la superficie libre y estudiado desde los primeros experimentos de Worthington a finales del siglo XIX. Ya que luego, se han realizado numerosos estudios sobre los impactos y la dinámica de fluidos resultante.

Los estudios realizados son sobre los chorros del impacto de una gota cayendo en líquidos, objetos sólidos impactando sobre materiales granulares y objetos sólidos sobre depósitos o tanques líquidos de diferentes dimensiones se han examinado a fondo, y muchos modelos para las cavidades y chorros resultantes.

Worthington comenzó a estudiar los impactos tomando imágenes de los chorros en la década de 1890. Su trabajo reveló la diferencia entre el impacto de una esfera lisa y la de una rugosa con la superficie libre, y en sus experimentos encontró que incluso las esferas "pulidas" o hidrofílicas producen cavidades cuando se caen desde una altura suficientemente grande, mientras que las esferas "ásperas" o hidrofóbicas siempre producen cavidades.

La investigación sobre la física de estas cavidades superficiales transitorias comenzó a principios del siglo 20, cuando A. M. Worthington publicó su famoso trabajo 'Un estudio de salpicaduras' (Worthington 1908). Sus fotografías revelaron una riqueza de fenómenos de complejidad no anticipada (Worthington & Cole 1897). A pesar de que se ha contribuido mucho a la comprensión de estos fenómenos, muchos de las preguntas intrigantes planteadas por las fotografías de Worthington resuenan hasta el día de hoy (Rein 1993; Fedorchenko y Wang 2004).

Todas las investigaciones desde los estudios de Worthington implicaron experimentos con un libre objeto que cae impactando sobre la superficie libre. Para obtener más información sobre dicho impacto, se construye una configuración en la que se adjunta el objeto impactante a un motor lineal, como se verá en el apartado 2.1. De esta forma, se tiene un control total sobre la velocidad de impacto, que ahora pasa de ser un respuesta observable en el parámetro de control clave del sistema. La dinámica de una cavidad superficial es de enorme importancia práctica en muchos procesos naturales e industriales. Las gotas de lluvia que caen sobre el

océano arrastran aire (Oguz y Prosperetti 1990; Oguz, Prosperetti y Kolaini 1995; Prosperetti y Oguz 1997) y es este mecanismo uno de los principales sumideros de dióxido de carbono de la atmósfera. El impacto de la gota y el posterior colapso del vacío también son una fuente significativa de sonido bajo el agua (Prosperetti, Crum & Pumphrey 1989) y una comprensión profunda es por lo tanto crucial en la investigación del sonar. Agua a alta velocidad impactos y la formación de cavidades submarinas son, además, de relevancia para las operaciones militares (Gilbarg & Anderson 1948; Lee, Longoria & Wilson 1997; Duclaux et al. 2007; Aristoff y Bush 2009). En el contexto de las aplicaciones industriales, impacto de caída y la posterior formación de espacios vacíos son cruciales en la pirometalurgia (Liow et al., 1996; Morton, Liow y Rudman 2000), en la industria alimentaria, y en el contexto del chorro de tinta impresión (Le 1998; Chen y Basaran 2002; de Jong et al., 2006a, b). Una serie similar de eventos como en el agua incluso se pueden observar cuando una bola de acero impacta en muy fina y arena blanda (Thoroddsen & Shen 2001; Lohse et al., 2004; Royer et al., 2005; Caballero et al. 2007).

Otras investigaciones más recientes tratan ensayos como el de dejar caer un tubo de ensayo con líquido para ver el comportamiento de la superficie libre (Antkowiak et al. 2007) el propósito del estudio es dilucidar el papel de las corrugaciones de superficie libre, no solo se asocia con meniscos, también con ondas estacionarias o con burbujas en la dinámica de la interfaz inicial.

Otro tipo de investigaciones es dejar caer una gota sobre una superficie sólida (Bartolo et al. 2006) con esto lo que se pretende es el control de la dinámica de impacto en la deposición de gotas, es un factor clave en muchos procesos industriales, los ejemplos más destacados son la impresión por chorro de tinta, el bombardeo iónico, la pintura en aerosol, la deposición de plaguicidas en hojas de plantas, etc. Para la mayoría, si no todas, de las aplicaciones, se desea depositar gotas, sin derramar sobre el material de las gotas y sin atrapar burbujas de aire.

El caso de estudio que sería el impacto de un disco sujeto a una varilla con movimiento lineal, lo que da lugar al colapso de una cavidad de aire axisimétrica en el agua se caracteriza por un tiempo finito. La energía cinética del flujo se enfoca en un pequeño volumen que desaparece con una velocidad cuya magnitud diverge a medida que se acerca el momento de pinzamiento. Varios escenarios

experimentales y teóricos que se han considerado recientemente en el estudio de este problema: una burbuja que se eleva desde un capilar (Longuet-Higgins, Kerman y Lunde 1991; Oguz & Prosperetti 1993; Burton, Waldrep y Taborek 2005; Thoroddsen, Etoh y Takehara 2007), burbujas en un líquido que fluye en forma conjunta (Gordillo, Sevilla, Rodríguez- Rodríguez & Martínez-Bazan 2005; Bergmann, Andersen, van der Meer & Bohr 2009), un cuello inicialmente burbuja (Eggers, Fontelos, Leppinen & Snoeijer 2007) y cavidades creadas a través del impacto (Bergmann, van der Meer, Stijnman, Sandtke, Prosperetti y Lohse 2006; Gekle, van der Bos, Bergmann, van der Meer & Lohse 2008; Bergmann, van der Meer, Gekle, van der Bos Y Lohse 2009). Dependiendo del caso, el colapso puede ser iniciado por la tensión superficial, flujo externo o presión hidrostática. Sin embargo, independientemente de la causa, hacia el final es la inercia del fluido la que se hace cargo en todos los casos, y el colapso se acelera a medida que el radio de la cavidad se reduce. La rotura capilar da lugar a los chorros de Worthington de alta velocidad eyectados después de un colapso de la cavidad en agua se produce debido al alto número de Reynolds.

Y por último, dejar caer una gota de líquido sobre otro líquido (Gekle et al. 2010). El chorro alargado sometido a la influencia de la tensión superficial se dividirá rápidamente en varias gotas individuales. El mecanismo detrás de este escenario puede venir de dos situaciones: chorros creados después del impacto de un objeto sólido sobre una superficie líquida y después del impacto de una gota de agua desarrollada a partir de una boquilla. Ambas situaciones crean un chorro ascendente de alta velocidad, el llamado jet Worthington.

A continuación se muestran algunas imágenes sobre los distintos ensayos que se han descrito anteriormente.

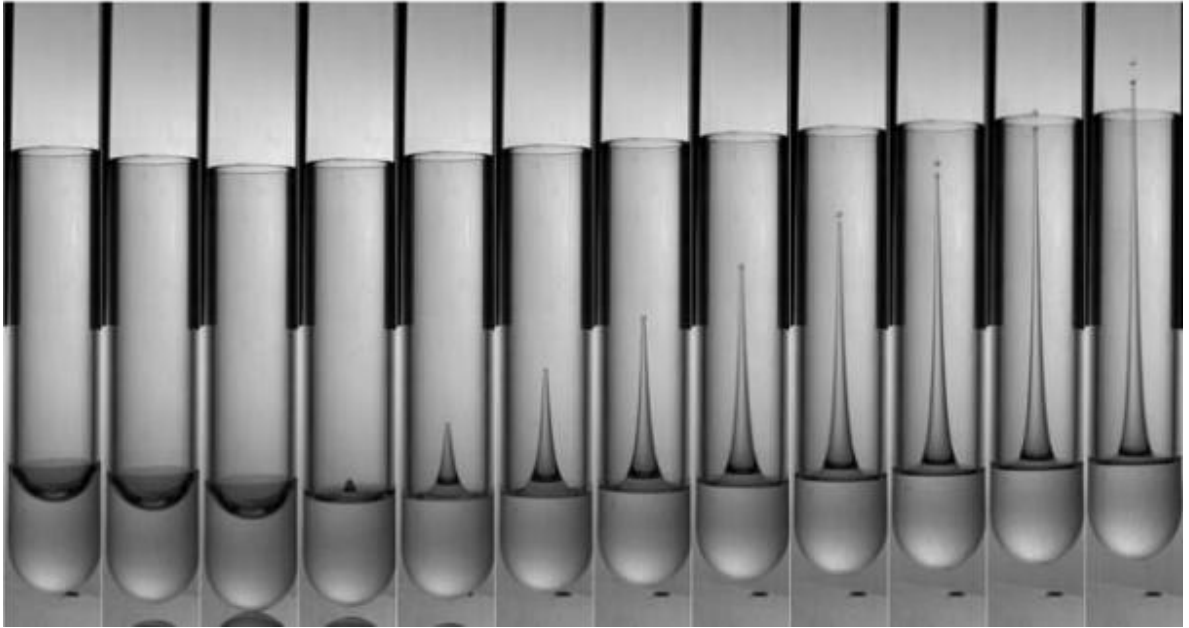


Ilustración 1.1 Ensayo realizado por Antkowiak et al. 2007

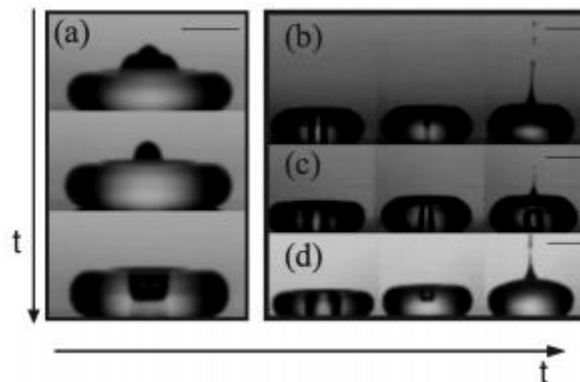


Ilustración 1.2 Ensayo realizado por Bartolo et al. 2006

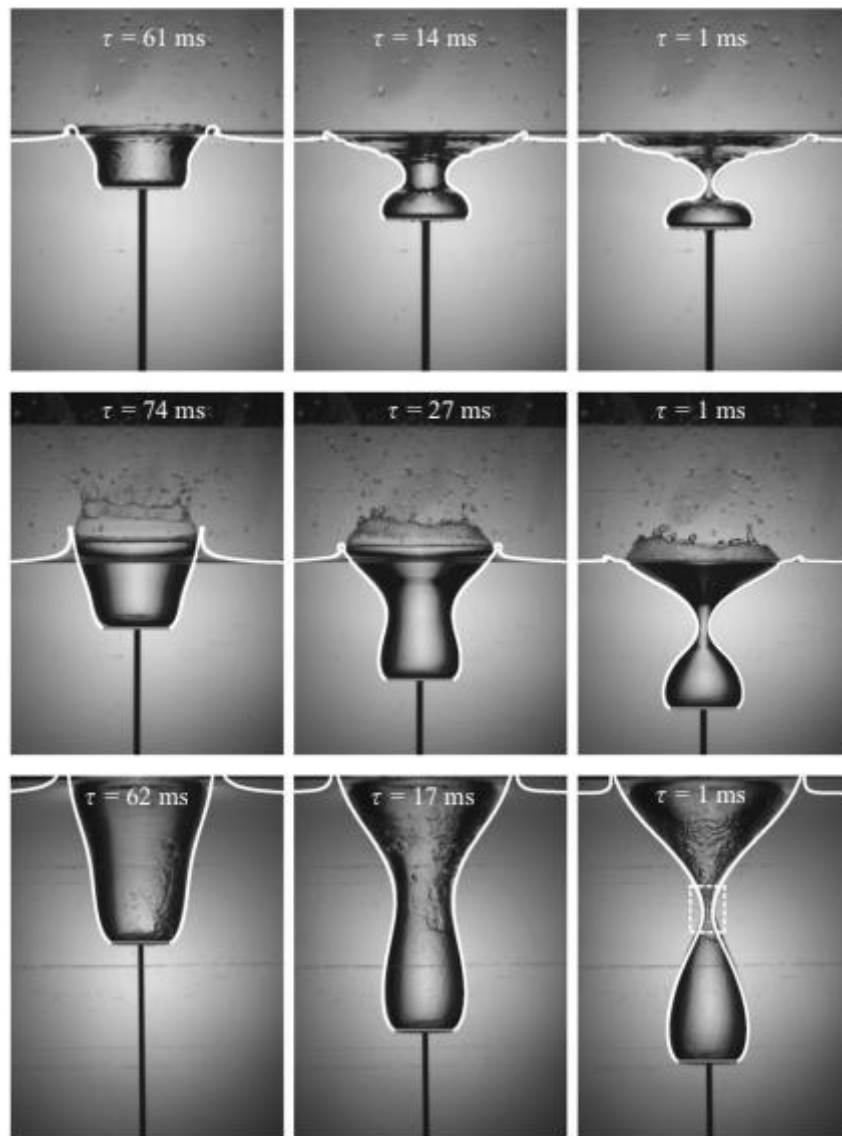


Ilustración 1.3 Ensayo realizado por Bergmann et al. 2009

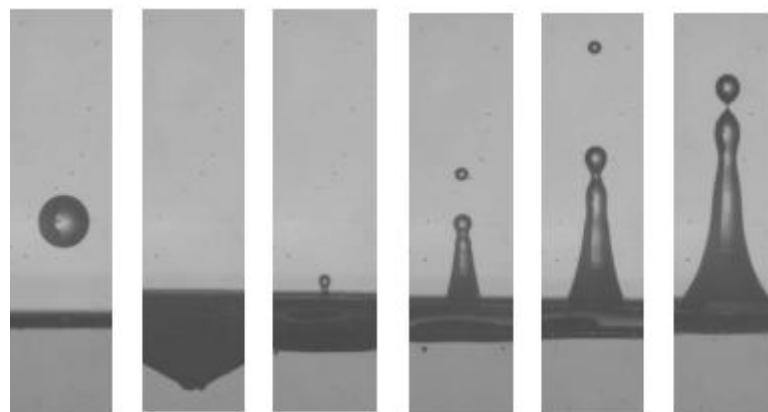


Ilustración 1.4 Ensayo realizado por Gekle et al. 2010

Como se puede observar en este apartado, se trata de un problema de investigación ya que hasta día de hoy se siguen realizando ensayos para tener una mejor comprensión sobre este complejo fenómeno, como se pueden ver en la cantidad de artículos que se han mencionado. Como se ha dicho es un problema actual ya que en la revista “Nature” acaba de publicarse el 22 de junio de 2018 un artículo basado en este tema llamado “The Sound Produced by a Dripping Tap is Driven by Resonant Oscillations of an Entrapped Air Bubble”.

Otro aspecto muy importante sobre el presente trabajo es como se puede observar que todas las investigaciones mencionadas anteriormente son para líquidos cuya viscosidad es poco importante, en este trabajo se va a tener en cuenta este aspecto para su investigación.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

2.1. Instalación experimental y metodología

En este trabajo, se estudia la cavidad que se crea por el impacto de un disco de radio h_0 en una superficie de agua, también se estudiara como se forma el chorro posterior al colapso de la cavidad. La dinámica de la superficie libre del líquido se registra mediante imágenes de alta velocidad. Los parámetros que se pueden extraer de la cavidad y del chorro se miden a partir de la información que se puede sacar de las imágenes de alta velocidad al igual que la superficie libre del líquido.

Para la obtención de las imágenes para su posterior análisis, se hace por medio de la siguiente instalación. Un esquema de la configuración se ve en la figura siguiente. Un disco de radio h_0 está montado en parte superior de una varilla delgada. La barra corre a través de un sello en el fondo de un tanque grande y está conectado en el extremo inferior a un motor lineal Thrusttube que se utiliza para determinar y controlar la velocidad y la aceleración del disco. La posición del motor a lo largo del eje vertical es medida con una precisión espacial de $5\text{ }\mu\text{m}$ en un rango de 1 m , la gran aceleración del motor hace posible realizar experimentos de impacto con velocidades constantes de hasta 5 m/s .

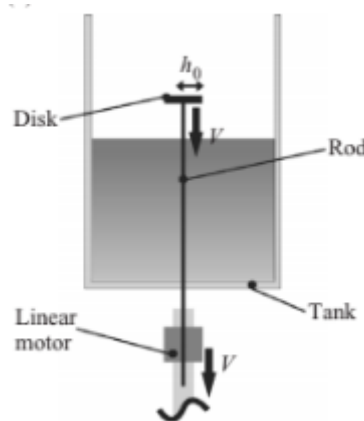


Ilustración 2.1 Esquema depósito y motor lineal (extraída de Bergmann JFM 2009)

El disco tiene un espesor de 2.0 mm y sus lados están suavemente mecanizados. Como el radio mínimo para el disco utilizado en los experimentos es 5 mm , la relación del área de la sección transversal de la varilla y la superficie del disco es siempre más pequeña que el 9% . Dado que la varilla está montada en el

centro del disco, donde el estancamiento normalmente ocurriría, la influencia en el flujo radialmente hacia afuera debajo el disco es presumiblemente pequeño.

El resultado de cómo quedaría la instalación en la realidad sería el siguiente:



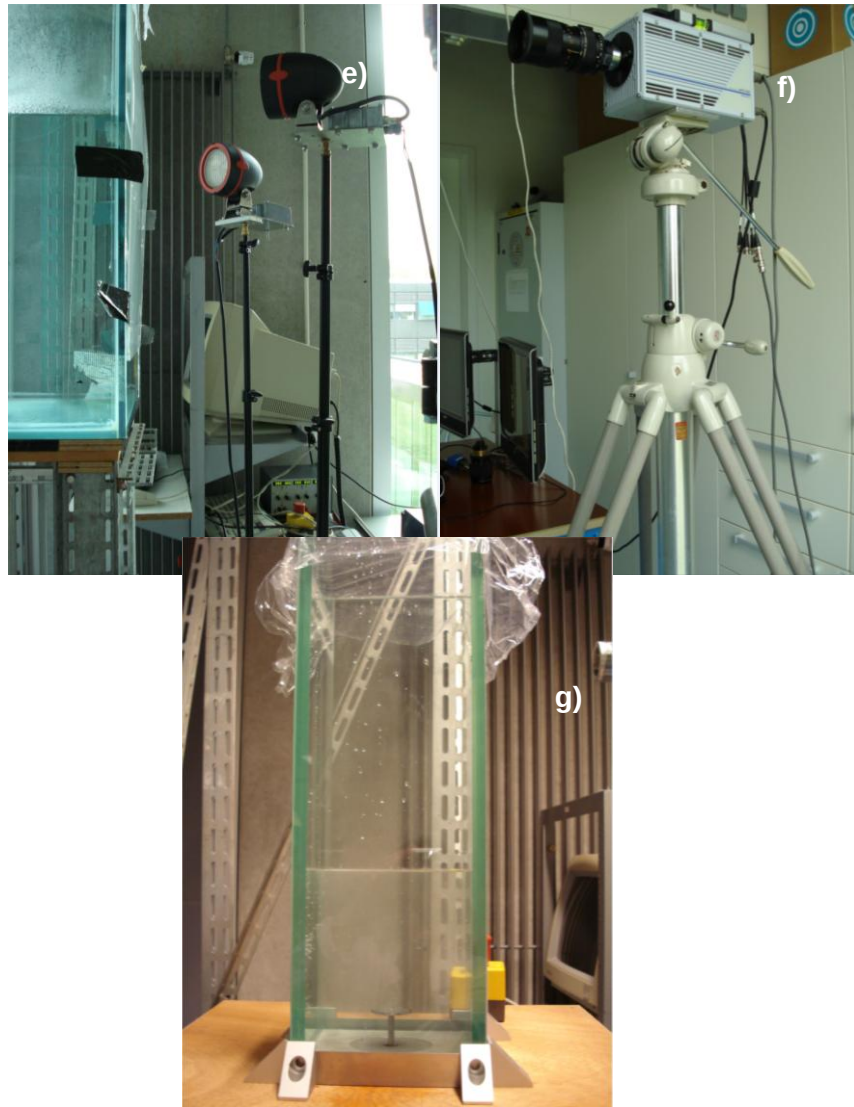


Ilustración 2.2 Instalación para la recogida de imágenes

En la ilustración anterior se puede observar las distintas partes de la instalación para la recogida de imágenes, como se ha comentado anteriormente. Se puede ver en la ilustración 2.2.a, el depósito con el líquido y como dentro del mismo se ve la varilla con el disco acoplado y fuera de este se ve los focos para iluminar la escena.

En la ilustración 2.2.b se ve cómo quedaría la cámara colocada para la captar la escena con respecto al depósito, esta imagen correspondería a cómo quedaría la instalación completa.

Dentro de la ilustración 2.2.c se encuentra el disco sujeto a la varilla y como estos solo tienen permitido el movimiento vertical. En la siguiente imagen la 2.2.d se

observa cómo estaría colocado el motor de funcionamiento lineal y de velocidad constante.

También se puede observar como estaría dispuesta la iluminación en la ilustración 2.2.e, que como se verá más adelante se podría mejorar un poco.

Por último y no menos importante la cámara de alta velocidad la cual se muestra en la ilustración 2.2.f.

Un ejemplo de dicho ensayo es el impacto de un objeto en un líquido, el impacto crea un chapoteo y una cavidad transitoria. Esta cavidad superficial entonces colapsa violentamente bajo la influencia de la presión hidrostática. En la singularidad donde las paredes de la cavidad colisionan, se desarrollan dos potentes chorros, uno hacia abajo y el otro hacia arriba hasta varios metros de altura, lo que hace que este evento rápido sea una escena impresionante.

Los experimentos se realizaron en el laboratorio del grupo de investigación Physics of Fluids de la Universidad de Twente (<https://pof.tnw.utwente.nl/>), uno de los centros más importantes del mundo en el ámbito de la mecánica de fluidos. En dichos experimentos se disponían de discos de diferente radio h_0 (esta h_0 puede tomar los valores de 5, 10, 15 y 20 milímetros) y se pudo además variar de forma controlada la velocidad de impacto del disco sobre el líquido (estos valores se pueden contralar directamente desde el motor). Como se verá a continuación, esto permite cambiar el valor del parámetro adimensional de control, el número de Froude. Además, debido a que en este trabajo está enfocado a entender este fenómeno cuando el líquido es viscoso, se usaron diferentes mezclas de glicerina-agua y glicerina pura. Debido a que los resultados obtenidos con las mezclas no fueron demasiado limpios, ya que el chorro se desviaba mucho de la verticalidad, nos centraremos principalmente en los resultados obtenidos con glicerina pura.

Parámetros motor	Velocidad real(m/s)
50k	0.25
100k	0.5
200k	1
400k	2

Tabla 2.1 Equivalencia parámetros motor con velocidad real

Para la obtención de los resultados experimentales se usó una cámara de alta velocidad, puesto que el proceso es muy rápido como se verá a continuación. Para poder obtener datos de estas imágenes es necesario detectar la interfase aire-agua, que es el principal objetivo del presente TFG. Para ello, se usó una técnica de retro-iluminación, es decir, se colocaron varias luces halógenas tras el experimento, además de una pantalla difusora que permite que el fondo sea uniforme, como se puede observar en las fotografías 2.2.a y 2.2.e.

En la siguiente tabla se va a mostrar los distintos parámetros de cada ensayo.

Ensayo	Tipo	h_0 (cm)	v (m/s)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/sm)	σ (kg/s ²)
1	Agua	5	0.5	997	0.001	0.07275
2	Agua	5	1	997	0.001	0.07275
3	Agua	15	0.25	997	0.001	0.07275
4	Agua	15	0.375	997	0.001	0.07275
5	Agua	15	0.5	997	0.001	0.07275
6	Agua	15	0.625	997	0.001	0.07275
7	Agua	15	0.75	997	0.001	0.07275
8	Agua	15	1	997	0.001	0.07275
9	Agua	10	1	997	0.001	0.07275
10	Agua	10	0.5	997	0.001	0.07275
11	Agua	10	0.25	997	0.001	0.07275
12	Agua	10	0.375	997	0.001	0.07275
13	Agua	20	0.25	997	0.001	0.07275
14	Agua	20	0.5	997	0.001	0.07275
15	Agua	20	0.375	997	0.001	0.07275
16	60% Glicerina	15	0.3	1153.8	0.0108	0.06764
17	60% Glicerina	15	0.375	1153.8	0.0108	0.06764
18	Glicerina	10	1	1261.08	1.41	0.0634
19	Glicerina	10	1.5	1261.08	1.41	0.0634
20	Glicerina	10	2	1261.08	1.41	0.0634
21	Glicerina	10	3	1261.08	1.41	0.0634
22	Glicerina	20	0.5	1261.08	1.41	0.0634
23	Glicerina	20	1	1261.08	1.41	0.0634
24	Glicerina	20	2	1261.08	1.41	0.0634

Tabla 2.2 Parámetros según el ensayo

2.2. Parámetros adimensionales

En este apartado se va a analizar el problema mediante un análisis dimensional del mismo ya que como se verá posteriormente es una técnica muy potente, en la que posteriormente realizando ensayos se pueden llegar a las mismas conclusiones que se realiza un estudio analítico del mismo problema. El método a utilizar va a ser el teorema de π o Vaschy – Buckingham.

El análisis dimensional es una herramienta que permite reducir la complejidad de los problemas físicos antes de buscar respuestas cuantitativas de estos. La utilidad principal del análisis dimensional es deducir de un estudio de las dimensiones de las variables en cualquier sistema físico ciertas limitaciones en la forma de cualquier posible relación entre estas variables. El método es de gran generalidad y simplicidad matemática.

Este método se puede aplicar tanto en análisis teóricos y experimentales así como en estudios numéricos, así como en el ensayo de modelos a escala.

El enunciado del teorema dice que la solución de un cierto problema físico conlleva la obtención de una cantidad de interés

$$a_0 = f(\underbrace{a_1, \dots, a_k}_I, \underbrace{a_{k+1}, \dots, a_n}_{II}), \quad (2.1)$$

que es función de una serie de parámetros $a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n$, que son datos del problema. Supondremos en lo que sigue que $k \leq n$ es el número máximo de parámetros que tienen dimensiones independientes, de manera que podemos dividir el conjunto de n parámetros de los que depende la solución en dos subconjuntos: el formado por los parámetros $a_1, \dots, a_k$, que tienen dimensiones independientes, y el formado por los parámetros $a_{k+1}, \dots, a_n$, cuyas dimensiones se pueden expresar en la forma

$$\begin{aligned}
[a_{k+1}] &= [a_1]^{\alpha_{k+1}} \dots [a_k]^{\gamma_{k+1}}, \\
[a_{k+2}] &= [a_1]^{\alpha_{k+2}} \dots [a_k]^{\gamma_{k+2}}, \\
&\vdots \\
[a_{k+n}] &= [a_1]^{\alpha_{k+n}} \dots [a_k]^{\gamma_{k+n}},
\end{aligned} \tag{2.2}$$

En general, $0 < k < n$, aunque a veces $k = n$, como ocurrió al analizar la caída del cuerpo, o bien $k = 0$, como ocurriría si todos los parámetros $a_1, \dots, a_n$ fueran adimensionales. Se puede demostrar que las dimensiones de la cantidad de interés a_0 se pueden también expresar en función de las de los parámetros $a_1, \dots, a_k$ en la forma

$$[a_0] = [a_1]^{\alpha_0} \dots [a_k]^{\gamma_0}. \tag{2.3}$$

Podemos ahora hacer uso de las dos últimas ecuaciones (2.12) y (2.13) para definir los parámetros adimensionales

$$\begin{aligned}
\Pi_0 &= \frac{a_0}{a_1^{\alpha_0} \dots a_k^{\gamma_0}}, \\
\Pi_1 &= \frac{a_{k+1}}{a_1^{\alpha_{k+1}} \dots a_k^{\gamma_{k+1}}}, \\
\Pi_2 &= \frac{a_{k+2}}{a_1^{\alpha_{k+2}} \dots a_k^{\gamma_{k+2}}}, \\
&\vdots \\
\Pi_{n-k} &= \frac{a_n}{a_1^{\alpha_n} \dots a_k^{\gamma_n}}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Sustituyendo ahora en la primera ecuación de todas (2.11) los parámetros $a_0, a_{k+1}, \dots, a_n$ en función de $\Pi_0, \Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}$ llegamos a la expresión

$$\begin{aligned}
\Pi_0 &= \frac{f(a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n)}{a_1^{\alpha_0} \dots a_k^{\gamma_0}} \\
&= \frac{f(a_1, \dots, a_k, \Pi_1 a_1^{\alpha_{k+1}} \dots a_k^{\gamma_{k+1}}, \dots, \Pi_{n-k} a_1^{\alpha_n} \dots a_k^{\gamma_n})}{a_1^{\alpha_0} \dots a_k^{\gamma_0}},
\end{aligned} \tag{2.5}$$

que se puede reescribir de la forma

$$\Pi_0 = F(a_1, \dots, a_k, \Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}). \quad (2.6)$$

El mismo procedimiento se puede utilizar para simplificar la ecuación (2.16). Así, siempre es posible encontrar un cambio en las unidades fundamentales de medida, tal que cambie el valor de a_1 , permaneciendo inalterados los valores de $a_2, \dots, a_k$. Como los valores de Π_0 y de $\Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}$ son independientes del sistema fundamental de unidades de medida, por ser cantidades adimensionales, vemos que es posible variar el valor del parámetro a_1 , manteniendo fijos los demás parámetros que aparecen en (2.16), sin modificar por ello el valor de Π_0 , por lo que se concluye que Π_0 no es función de a_1 . Procediendo de forma secuencial con los demás parámetros $a_2, \dots, a_k$ es posible demostrar que la variable adimensional Π_0 es independiente de todos ellos, por lo que al final obtenemos en el caso general

$$\Pi_0 = F(\Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}). \quad (2.7)$$

Aplicando el teorema de π o Vaschy – Buckingham para el caso del problema de estudio se van a definir las variables que intervienen en el problema:

h_0	Radio del disco
v	Velocidad del impacto
ρ	Densidad del líquido
μ	Viscosidad del líquido
σ	Tensión superficial
g	Aceleración gravedad

Tabla 2.3 Variables utilizadas para el estudio de la formación de la cavidad

M	Masa
T	Tiempo
L	Longitud

Tabla 2.4 Variables con dimensiones independientes

Una vez definidas las distintas variables se continuará planteando una matriz que el que las filas son las dimensiones independientes y las columnas se tratan de las variables del problema:

	h_0	v	ρ	μ	σ	g
M	0	0	1	1	1	0
T	0	-1	0	-1	-2	-2
L	1	1	-3	-1	0	1

Tabla 2.5 Matriz entre variables y variables con dimensiones independientes

Como se tiene que el número de variables del problema es de 6 mientras que el número de parámetros con dimensiones independientes es 3. Se va a calcular ahora el rango de la matriz anterior y se obtiene que:

```
In[1]:= MatrixRank[{{0, 0, 1, 1, 1, 0}, {0, -1, 0, -1, -2, -2},  
                  {1, 1, -3, -1, 0, 1}}]  
Out[1]= 3
```

Ilustración 2.3 Calculo rango matriz con Mathematica

Se observa como el rango de la matriz es 3 al igual que el número de parámetros con dimensiones independientes.

Ahora se pasa a seleccionar h_0 , v , μ (se opta por estas variables ya que son las que se van a ir modificando con los ensayos y además h_0 es la escala geométrica del problema) como el subconjunto de $k=3$ cantidades con dimensiones independientes con lo que se obtendría que las dimensiones de las demás cantidades de las variables que aparecen en el problema se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} [\mu] &= [h_0]^1 [v]^1 [\rho]^1 \\ [\sigma] &= [h_0]^1 [v]^2 [\rho]^1 \\ [g] &= [h_0]^{-1} [v]^2 [\rho]^0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Gracias a esto se puede definir las cantidades adimensionales como:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\mu}{\rho * v * h_0} \\ \Pi_2 &= \frac{\sigma}{\rho * v^2 * h_0} \\ \Pi_3 &= \frac{g}{v^2/h_0} \end{aligned} \quad (2.9)$$

O también se puede expresar como:

$$\mu = \prod_1 \rho v h_0 \quad (2.10)$$

$$\sigma = \prod_2 \rho v^2 h_0$$

$$g = \prod_3 v^2 / h_0$$

Otra forma de determinar los grupos de adimensionales es utilizar el procedimiento general que permite determinar la forma de los grupos adimensionales que aparecen en la aplicación del teorema Π , como por ejemplo los parámetros Π_1 , Π_2 y Π_3 de la ecuación (2.8). Como en todos los problemas el primero de los grupos adimensionales involucra a la cantidad incógnita a_0 , lo primero que se hará será escribir la matriz de dimensiones ampliada

	h_0	v	ρ	μ	σ	g
M	0	0	1	1	1	0
T	0	-1	0	-1	-2	-2
L	1	1	-3	-1	0	1

Tabla 2.6 Matriz entre variables y variables con dimensiones independientes

cuyas columnas están formadas por los exponentes de la ecuación de dimensiones de cada una de las variables, incluyendo la cantidad incógnitas. Tras comprobar que h_0 , v y μ constituyen un conjunto de variables con variables independientes, deseamos formar los grupos adimensionales Π_1 , Π_2 y Π_3 asociados a la densidad, ρ , a la tensión superficial, σ , y a la aceleración de la gravedad, g , respectivamente.

Para construir cada uno de los grupos adimensionales se debe encontrar unos números x , y y z tales que el producto de potencias $h_0^x v^y \mu^z$ tenga las mismas dimensiones que la variable que se desean adimensionalizar. En el caso de la densidad, ρ , buscamos los valores de x , y y z tales que $[h_0]^x [v]^y [\mu]^z = [\rho] = ML^{-3}$. Sustituyendo en la ecuación anterior las dimensiones de las variables d , v y ρ , se obtiene la igualdad

$$(L)^x (LT^{-1})^y (ML^{-3})^z = ML^{-1}T^{-1} \quad (2.11)$$

de donde, identificando los exponentes de M , L y T , resulta el sistema de tres ecuaciones lineales

$$\begin{aligned}
 M: \quad & z = 1 \\
 L: \quad & x + y - 3z = -1 \\
 T: \quad & -y = -1
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

que se puede expresar, alternativamente, en la forma matricial

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}
 \tag{2.13}$$

En el que la solución a esa matriz es $x=1$, $y=1$, $z=1$.

De la misma manera se haría para la tensión superficial y para la gravedad quedando las siguientes ecuaciones matriciales, para el caso de la tensión superficial:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix}
 \tag{2.14}$$

Lo que daría una solución de $x=1$, $y=2$, $z=1$.

Para el caso de la gravedad:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}
 \tag{2.15}$$

Lo que daría una solución de $x=-1$, $y=2$, $z=0$.

Como se puede observar la solución obtenida es la misma que se encuentra en la ecuación (2.8) con lo que los grupos adimensionales Π son los que hay en la ecuación (2.9).

Si ahora esos grupos adimensionales se invierten seguirían siendo adimensionales pero se puede observar que:

$$\Pi_1 = \frac{\rho * v * h_0}{\mu} = Re
 \tag{2.16}$$

$$\Pi_2 = \frac{\rho * v^2 * h_0}{\sigma} = We$$

$$\Pi_3 = \frac{v^2}{g * h_0} = Fr$$

Π_1 al haber hecho la inversa se ve como corresponde al número de Reynolds (Re) es un número adimensional muy utilizado en mecánica de fluidos y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883, es una combinación adimensional relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). En el numerador de esta relación tenemos las fuerzas inerciales y en el denominador las fuerzas viscosas.

Π_2 al haber hecho la inversa se ve como corresponde al número de Weber (We) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos y que es útil en el análisis de flujos en donde existe una superficie entre dos fluidos diferentes. Es una medida de la importancia relativa de la inercia del fluido comparada con su tensión superficial. Por ejemplo, este número es útil en analizar flujos multifásicos en superficies curvadas, flujos de capas finas y en la formación de gotas y burbujas. Se denomina así en honor a Moritz Weber (1871-1951).

$$We = \frac{\rho * v^2 * h_0}{\sigma} = Re * Ca \quad (2.17)$$

Π_3 al haber hecho la inversa se ve como corresponde al número de Froude (Fr) pero al cuadrado, es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido. Debe su nombre al ingeniero hidrodinámico y arquitecto naval inglés William Froude (1810 - 1879).

Por otro lado se tiene que el teorema de Buckingham únicamente dice cuántos números independientes se pueden construir. Lo que hace posible combinar los

números anteriores para generar otros nuevos. Tradicionalmente en el problema de impacto de sólidos sobre superficies libres se utilizan los números capilaridad.

Al hacer la relación que se ha planteado en Π_2 se ve como el número Ca por el Re corresponde al número We, con lo que se obtiene el número de capilaridad (Ca), en mecánica de fluidos el número de capilaridad (Ca) representa el efecto relativo entre la viscosidad (fuerzas viscosas) y la tensión superficial que actúa a través de una interface entre un líquido y un gas, o entre dos líquidos inmiscibles.

$$Ca = \frac{We}{Re} = \frac{\mu u}{\sigma} \quad (2.18)$$

Este número Ca se puede decir que es muy grande $Ca \gg 1$ ya que para la glicerina (ya que se trata de los ensayos de este trabajo) $\sigma = 0.0634 \text{ kg/s}^2$. La viscosidad es de $\mu = 1.41 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$ se ve que estas dos variables y la velocidad en los ensayos va a ser muy alta por lo que $Ca \gg 1$, en concreto para una velocidad de 1 m/s $Ca = 22.23$ como se había comentado anteriormente. Con esto se puede decir que los efectos de la tensión superficial son pequeños en comparación con los efectos viscosos.

Por otro lado si se hace la relación:

$$Oh = \frac{We^{\frac{1}{2}}}{Re} = \frac{Ca}{We^{\frac{1}{2}}} = \frac{\mu}{(\rho \sigma h_0)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.19)$$

Y este número adimensional corresponde al número de Ohnesorge (Oh) es un número adimensional que relaciona las fuerzas viscosas y las fuerzas de tensión superficial. Habitualmente se usa en mecánica de fluidos de superficies libres, en aplicaciones tales como dispersión de líquidos en gases.

$$Oh = \frac{1}{\sqrt{La}} \text{ donde } La = Su = \frac{\sigma \rho h_0}{\mu^2} \quad (2.20)$$

El número de Laplace (La), también conocido como Número de Suratman (Su), es un número adimensional utilizado en la caracterización de la mecánica de fluidos de superficies libres. Representa el cociente entre la tensión superficial y el transporte de momento (especialmente la disipación) dentro de un fluido.

Por ultimo para concluir este apartado se va a calcular cual es el rango de valores en los que se van a encontrar los distintos experimentos realizados.

Ensayo	Re	Fr
1	2492,5	5,096839959
2	4985	20,38735984
3	3738,75	0,424736663
4	5608,125	0,955657492
5	7477,5	1,698946653
6	9346,875	2,654604145
7	11216,25	3,822629969
8	14955	6,795786612
9	9970	10,19367992
10	4985	2,54841998
11	2492,5	0,637104995
12	3738,75	1,433486239
13	4985	0,318552497
14	9970	1,27420999
15	7477,5	0,716743119
16	480,75	0,611620795
17	600,9375	0,955657492
18	8,94383	10,19367992
19	13,41574	22,93577982
20	17,88766	40,77471967
21	26,83149	91,74311927
22	8,94383	1,27420999
23	17,88766	5,096839959
24	35,77532	20,38735984

Tabla 2.7 Valores de Re y Fr según el ensayo

Con esto se tiene que los valores de Re en el ensayo van a variar entre 8.94 y 14955 y los valores de Fr estarán comprendidos entre 0.3185 y 91.74. Como se puede observar en los resultados anteriores el número adimensional We todos sus valores son $We \gg 1$ por lo que este número se puede despreciar ya que nos dice que la inercia del fluido es mucho mayor que la tensión superficial de este, lo cual indica que la tensión superficial no juega un papel importante en el problema, al menos en la escala del radio del disco.

3. PROCESADO DE IMÁGENES

3.1. Conceptos de análisis de imágenes

Los sistemas de percepción se pueden definir como aquellos que realizan la interpretación de impresiones sensoriales.

Los sistemas de percepción permiten adquirir información compleja acerca del entorno y, en cooperación con otros sistemas (actuadores, robots,...) actuar sobre él y modificarlo de la manera deseada. O como en el caso de estudio que es sacar información de la escena a través de estos sensores.



Ilustración 3.1 Análisis de imágenes

El sistema de percepción más versátil se basa en sensores de cámara de video. A partir de éstos es posible adquirir imágenes de una escena, procesadas y extraer la información requerida por una determinada aplicación industrial.

El flujo de la información pasa por distintos niveles:

- Bajo: Dispositivos de adquisición, ópticas y sistemas de iluminación. Este nivel hace referencia a los aspectos de hardware.
- Intermedio: Preprocesado, segmentación y extracción de características. Este nivel sirve para preparar la información para su uso.
- Alto: Reconocimiento de objetos. En este nivel ya si se extrae la información que se desea.

Los elementos que forman parte en un sistema de visión por computador son:

- Iluminación
- Escena
- Cámara
- Digitalizador
- Computador

Las aplicaciones de un sistema de visión por computador pueden ser:

- Para el guiado autónomo de robots industriales.
- Controles de calidad.
- Navegación de robots móviles
- Reconocimiento facial
- Aplicaciones médicas

Las etapas que se siguen en un sistema de visión por computador son las siguientes:

3.1.1. Adquisición de imágenes

En este apartado se va a hacer referencia a:

- Sistemas de iluminación

En este apartado habría que preguntarse: ¿Qué se necesita ver?, ¿Qué verá el sistema de visión?, ¿Cómo resaltar lo que se quiere ver?, ¿Dónde están los límites? y ¿Ventajas y desventajas de la fuente de iluminación a utilizar?

El objetivo del sistema de iluminación es resaltar aquellas características deseadas en un objeto de manera que sean fácilmente detectables por un sistema de visión y para ello la iluminación depende fuertemente de la aplicación y de la superficie del objeto que estemos iluminando.

Hay que tener en cuenta las propiedades reflexivas (si los materiales son: especulares, difusos, reflectores o selectivos), absorbentes (si los materiales son selectivos o no al espectro) y transmitivas (si los materiales son: transparentes, translucidos y selectivos al espectro).

Dentro de las fuentes luminosas se pueden encontrar: lámparas alógenas, fibra óptica, fluorescente, led, laser.

Una vez se tiene el tipo de fuente luminosa se tienen distintas técnicas de iluminación como pueden ser: iluminación radial (directa, difusa y ultradifusa), iluminación efecto campo oscuro (directa, difusa y ultradifusa), iluminación posterior, contraluz o retroiluminación, iluminación efecto de día nublado, iluminación efecto “campo brillante”, iluminación direccional, proyectores de luz e iluminación coaxial.

- Ópticas

Son elementos que permiten concentrar los rayos luminosos del entorno sobre el plano sensor.

En este apartado hay que tener en cuenta parámetros como pueden ser: distancia focal, distancia de enfoque, profundidad de campo, efecto de la apertura de la lente y distorsiones ópticas.

- Cámaras

Estas se pueden clasificar según la tecnología del sensor (CCD y CMOS), según el número y dimensiones del sensor (lineales y matriciales) y según el tipo de salida (analógica o digital).

3.1.2. Preprocesado

Con el preprocesado de las imágenes lo que se busca es utilizar una serie de técnicas para aplicarlas a las imágenes con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la extracción de información.

Con estas técnicas se obtiene una imagen a partir de la imagen original con un resultado más acorde a la aplicación para la cual va a ser utilizada esa imagen, lo que se pretende es mejorar algunas de las características de esa imagen.

Algunas de esas técnicas actúan sobre el histograma, nivel de ruido, brillo, contraste, nitidez y la vecindad.

- Histograma

Da la distribución de gris en una imagen, muestra la función de densidad de probabilidad de niveles de gris.

Viendo el histograma se puede extraer información para luego poder hacer distintas operaciones como después se explicará.

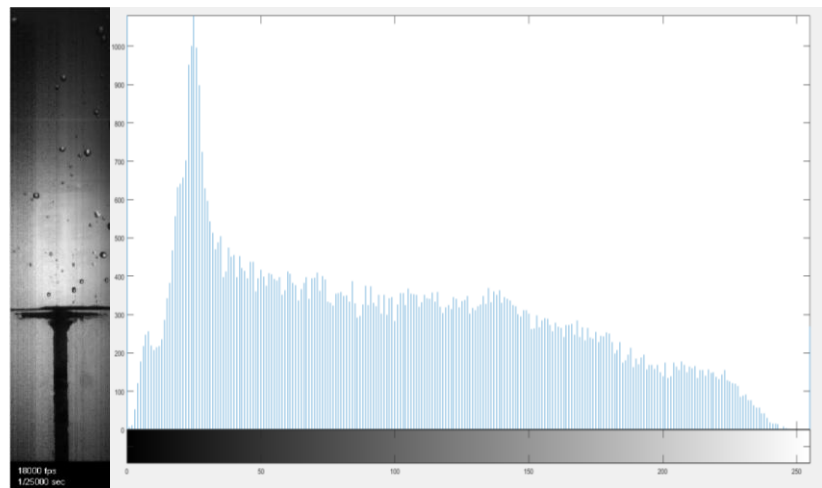


Ilustración 3.2 Histograma imagen a analizar

Como se observa en las imágenes anteriores se puede ver como el histograma tiende a tener los valores concentrados cerca de 0 lo que quiere decir que la imagen es muy oscura que es lo que se puede observar en la parte izquierda de la imagen. Se observa como la

iluminación no es la óptima ya que el histograma no está uniformemente distribuido.

- Nivel de ruido

Correspondería a las variaciones del nivel de gris que puede haber en un pixel debida a la iluminación de la escena.

Los tipos de ruido pueden ser: correlado y no correlado esto depende de la posición espacial del pixel afectado dentro de los no correlados están el gaussiano (sigue una distribución gaussiana con una determinada media y varianza) y el aleatorio.

Para el caso de estudio como posteriormente se verá no existe ningún tipo de ruido de los que se ha hablado, lo que si se va a encontrar es hay una parte con información del video en la parte inferior de cada frame además de algunas gotas de agua de salpicar de otros ensayos realizados anteriormente.

- Brillo

Corresponde al nivel medio de gris de una imagen.

- Contraste

Se define como la variación del nivel de gris en los pixeles de dicha imagen.

Este está también asociado con el histograma de la imagen.

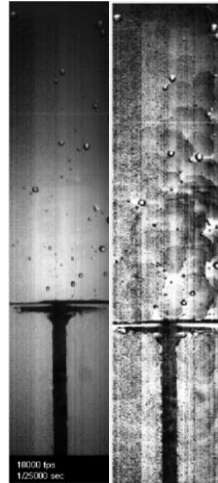


Ilustración 3.3 Imagen ecualizada

Lo que se puede hacer para que esta variación de gris de los píxeles de la imagen no sea tan grande y se vea un poco más clara es que se ecualice la imagen para que así el histograma sea más uniforme y la imagen sea un poco más clara, como se puede observar en la imagen anterior. La imagen anterior se ha ecualizado después de hacer la apertura con la que se consigue eliminar objetos pequeños como las gotas y corregir los defectos de iluminación.

- Nitidez

Es la respuesta del nivel de gris de la imagen ante cambios bruscos de la iluminación en la escena.

Ahora se pasará a ver algunas de las técnicas utilizadas para el procesamiento de imágenes, estas operaciones pueden ser:

- Operaciones puntuales

Son operaciones que se le aplican a un píxel en función de su intensidad.

Pueden ser independientes de las características globales de la imagen y se pueden clasificar en operaciones de una imagen con una constante como: sumar, restar, multiplicar, dividir, máximo, mínimo,

umbralización e inversa. Operaciones según una función racional o irracional como transformaciones logarítmicas o exponenciales. Y operaciones entre varias imágenes como: sumar, restar, multiplicar, dividir, máximo, mínimo, AND, OR y XOR.

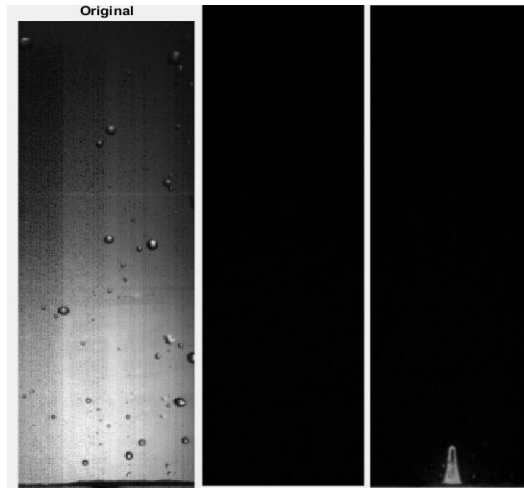


Ilustración 3.4 Operación diferencia entre imágenes

Como se puede observar en la imagen se tiene que para poder detectar mejor la forma del chorro lo que se ha hecho ha sido recortar la imagen hasta la superficie libre del líquido y el primer frame del video se ha utilizado como fondo para que en posteriores imágenes del video este fondo se le pueda restar al frame que se esté evaluando para así en la parte de segmentación salga mejor definida la forma del chorro y sea más fácil de detectar bordes, diámetros, aéreas y otros parámetros que serán de gran interés para sacar los distintos resultados.

Otra posibilidad es que sean dependientes de la imagen aquí entrarían las operaciones como la manipulación del histograma (consiste en ecualizar el histograma para obtener una distribución más uniforme de este) y autoescalado de la imagen.

- Operaciones locales

La imagen se transforma en función de los niveles de gris de cada píxel considerado y los de su entorno. Pueden ser operaciones lineales y no lineales.

Dentro de las lineales estaría la media en el entorno del pixel y la consolación.

Y dentro de las no lineales estaría operaciones estadísticas, analíticas (media geométrica, media armónica) y morfológicas.

En el procesado morfológico viene dado mediante la relación de una imagen (un conjunto de puntos X) con un elemento estructural (un pequeño conjunto de puntos B) expresado respecto a un origen relativo O

Para aplicar una transformación morfológica, el elemento estructural B se desplaza sistemáticamente sobre la imagen X

Este proceso se utiliza para: suavizar bordes de una región, separar regiones unidas mediante segmentación o unir regiones que han sido separadas.

En este procesado morfológico las operaciones son dilatación (que hace que los elementos crezcan y se hagan más gruesos y esto se controla con el elemento estructurante), erosión (aquí ocurre al contrario que en la dilatación los elementos se reducen), apertura (es una erosión seguida de una dilatación y se pretende conservar los elementos más grandes eliminando los más pequeños además de igualar los posibles defectos de iluminación de la escena) y el cierre (justo al contrario que la apertura con esto se pretende rellenar fisuras y pequeñas protuberancias)

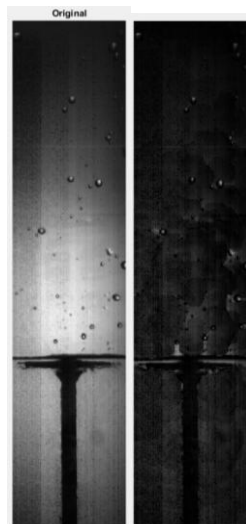


Ilustración 3.5 Operación de apertura (erosión y dilatación)

Esta es una herramienta muy potente ya que al tener una imagen tan oscura en la que los valores del histograma estaban muy cercanos a cero que posteriormente se le ha hecho una apertura a la imagen y por último se ha ecualizado para así conseguir un histograma más uniforme se le ha hecho una apertura a la imagen. Con esto lo que se consigue es una erosión seguida de una dilatación con la que se pretende conservar los elementos más grandes eliminando los más pequeños además de igualar los posibles defectos de iluminación de la escena, que es lo que se pretende desde el principio.

- Operaciones globales

La imagen se transforma globalmente sin considerar los píxeles de forma individual, realizándose un cambio de dominio.

Las más empleadas son: transformada de Fourier, transformada de Hadamard-Walsh, transformada de Karhunen-Lòeve, transformada discreta del coseno, transformada de Hough y cambio entre modelos de color.

- Operaciones geométricas

Como se ha visto anteriormente el ruido es la información no deseada que contamina la imagen y que se debía a la variación en el nivel de gris que sufre un pixel no debida a la aportación lumínica de la escena.

Este ruido se podía modelar con una distribución normal, distribución uniforme o que fuese aleatorio.

Existen algoritmos que permiten la reducción de ruido como son:

- Filtros lineales

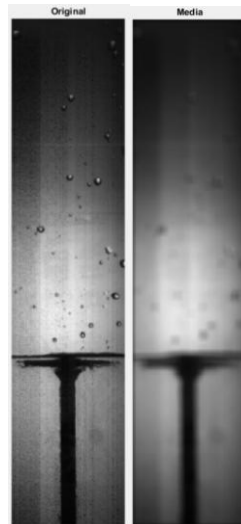
Se trata de la convolución de una imagen con una máscara predefinida con los pixeles del entorno de la vecindad.

En este tipo de filtro se encuentra el filtro de media en el que dada una imagen, se genera otra nueva en la que la intensidad de cada pixel se obtiene promediando valores de la vecindad. Para una vecindad de 3x3.

$$\frac{1}{9} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Ilustración 3.6 Ejemplo mascara filtro de media

Lo que tendríamos sería en la imagen superior sería una máscara de 3x3 que se iría pasando por toda la imagen original y esta lo que haría sería calcular la media de la intensidad de gris para la nueva imagen.

**Ilustración 3.7 Ejemplo filtro de media**

Cuando se aplica este tipo de filtro a las imágenes de los ensayos se ve como no existe ningún tipo de ruido puntual ya que la imagen sigue siendo la misma, lo que si se ve es como las gotas de otros ensayos siguen estando presentes aunque al haber pasado un filtro a la imagen ahora son pequeñas líneas lo que no es bueno. Además se ve como los bordes ya no están tan definidos lo que supondrá un problema para posteriores etapas.

Otro filtro lineal es el gaussiano en el que la convolución de aproximación a la desratización de una gaussiana de media 0 y varianza sigma.

$$h(u, v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

Las máscaras más comunes utilizadas son:

$\frac{1}{16}$	1	2	1
	2	4	2
	1	2	1

$\frac{1}{249}$	3	6	8	6	3
	6	14	19	14	6
	8	19	25	19	8
	6	14	19	14	6
	3	6	8	6	3

Ilustración 3.8 Mascara para filtro Gaussiano

Una vez que tenemos las mascaras su funcionamiento sería igual que el del filtro de media lo único que cambian son los pesos de la matriz.

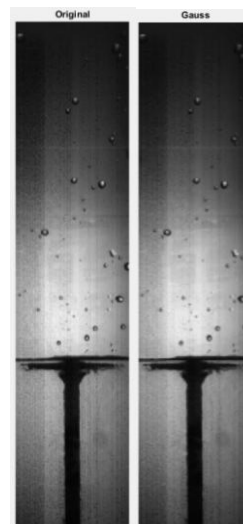


Ilustración 3.9 Ejemplo filtro Gaussiano

En esta imagen al igual que pasaba con el filtro de media no tiene ningún efecto sobre la imagen por lo que se puede decir que no tiene ningún tipo de ruido que siga una distribución normal.

- Filtros no lineales

Se trata de hacer operaciones no lineales con los pixeles del entorno de la vecindad.

Aquí se encontraría el filtro de mediana en el que los píxeles de la nueva imagen se obtendrían calculando la mediana del conjunto de píxeles de la vecindad del píxel de la imagen original.

- Otros filtros utilizados son:

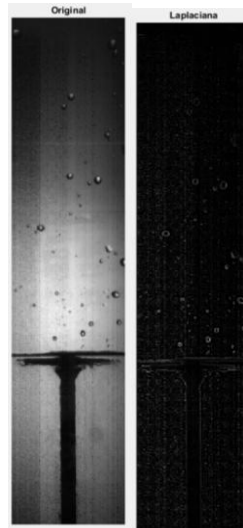


Ilustración 3.10 Ejemplo filtro Laplaciana

El filtro utilizado en la imagen superior corresponde a un filtro utilizando la Laplaciana o segunda derivada y como se puede ver es un buen filtro para detectar bordes pero para intentar quitar el ruido de la imagen no es bueno. Se ve como en la imagen cuando se quiera detectar bordes va a haber problemas para poder sacar los bordes del chorro y cavidad por eso se ha hecho una apertura para quitar las líneas verticales que tiene la imagen cuando se intenta detectar bordes.

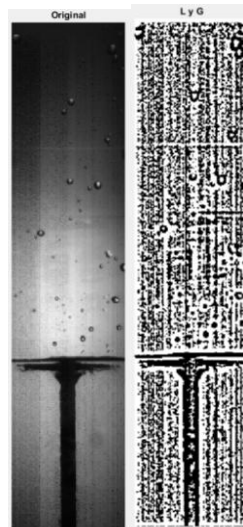


Ilustración 3.11 Ejemplo filtro Laplaciana con suavizado por Gauss

En este filtro se aplica la Laplaciana y Gauss con esto lo que se pretende es suavizar la imagen para que sea menos sensible al ruido pero al igual que en el filtro de la Laplaciana sola se ve aún mejor las líneas verticales las cuales suponen un problema.

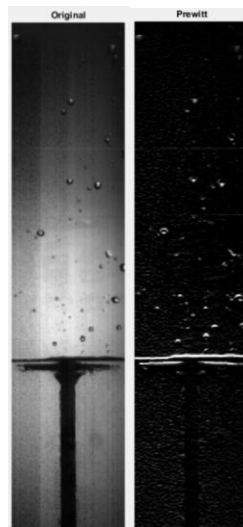


Ilustración 3.12 Ejemplo filtro Prewitt

El filtro que se ha aplicado en la imagen superior corresponde a un Prewitt que al igual que todos los anteriores sirve para detectar bordes con este se ve como ahora se detecta menos las líneas verticales pero si detecta muy bien las gotas que son cosas que no se quiere que aparezcan en las imágenes, por eso utilizar una erosión es muy útil ya que se pueden quitar esos objetos pequeños que son las gotas y no se quiere que aparezca.

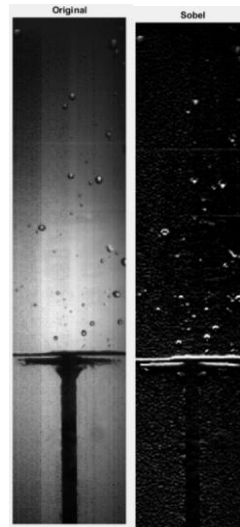


Ilustración 3.13 Ejemplo filtro Sobel

En este último filtro al igual que en los anteriores es para la detección de bordes y se ve como se encuentra con los mismos problemas que los anteriores. Este filtro corresponde al Sobel.

- Filtros temporales

Se analizan varias imágenes de la misma escena tomadas en instantes diferentes de tiempo.

En esta caso como se explicó en el apartado de operadores puntuales lo que hecho ha sido recortar la imagen hasta la superficie libre del líquido y el primer frame del video se ha utilizado como fondo para que en posteriores imágenes del video este fondo se le pueda restar al frame que se esté evaluando para así en la parte de segmentación salga mejor definida la forma del chorro y sea más fácil de detectar bordes, diámetros, aéreas y otros parámetros que serán de gran interés para sacar los distintos resultados.

3.1.3. Detección de bordes

Los bordes de una imagen digital se pueden definir como transiciones entre dos regiones de niveles de gris significativamente distintos. Suministran una valiosa información sobre las fronteras de los objetos y puede ser utilizada para segmentar la imagen, reconocer objetos, etc.

La mayoría de las técnicas para detectar bordes emplean operadores locales basados en distintas aproximaciones discretas de la primera y segunda derivada de los niveles de grises de la imagen.

- Operadores basadas en la primera derivada (Gradiente).

La derivada de una señal continua proporciona las variaciones locales con respecto a la variable, de forma que el valor de la derivada es mayor cuanto más rápidas son estas variaciones.

En el caso de funciones bidimensionales $f(x,y)$, la derivada es un vector que apunta en la dirección de la máxima variación de $f(x,y)$ y cuyo módulo es proporcional a dicha variación. Este vector se denomina gradiente.

En el caso bidimensional discreto, las distintas aproximaciones del operador gradiente se basan en diferencias entre los niveles de grises de la imagen. La derivada parcial $f_x(x,y)$ (gradiente de fila $G_F(i,j)$) puede aproximarse por la diferencia de píxeles adyacentes de la misma fila.

$$\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \approx \nabla_x f(x,y) = f(x,y) - f(x-1,y) \quad \begin{array}{|c|c|} \hline -1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad (3.2)$$

La discretización del vector gradiente en el eje Y ($G_C(i,j)$), será:

$$\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \approx \nabla_y f(x,y) = f(x,y) - f(x,y-1) \quad \begin{array}{|c|} \hline -1 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \quad (3.3)$$

El gradiente de la fila G_F y de columna G_C en cada punto se obtienen mediante la convolución de la imagen con las máscaras H_F y H_C , esto es:

$$\begin{aligned} G_F(i, j) &= F(i, j) \otimes H_F(i, j) \\ G_C(i, j) &= F(i, j) \otimes H_C(i, j) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Los operadores más utilizados son los de Roberts, Prewitt y Sobel y Frei-chen.

Gradiente fila	Gradiente colonna																		
<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>-1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	<table><tr><td>-1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	-1	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0																	
0	0	1																	
0	-1	0																	
-1	0	0																	
0	1	0																	
0	0	0																	

Ilustración 3.14 Mascara para detección bordes mediante Roberts

Gradiente fila				Gradiente columna			
$\frac{1}{2+K}$	1	0	-1	$\frac{1}{2+K}$	-1	-K	-1
	K	0	-K		0	1	0
	1	0	-1		1	K	1

Ilustración 3.15 Mascara para detección bordes mediante Prewitt

En el operador Prewitt ($K=1$) se involucran a los vecinos de filas / columnas adyacentes para proporcionar mayor inmunidad al ruido.

El operador Sobel ($K=2$), se supone que es más sensible a los bordes diagonales que el de Prewitt aunque en la práctica hay poca diferencia entre ellos.

Frei-Chen ($K= 2$), el gradiente es el mismo para bordes verticales, horizontales y diagonales.

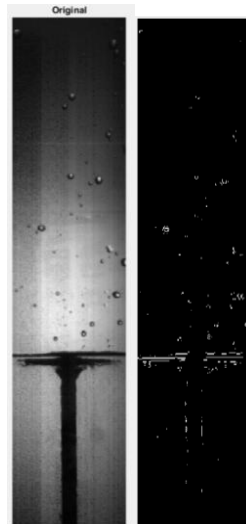


Ilustración 3.16 Ejemplo detección bordes con Prewitt

Como se observa en el filtro realizado con Prewitt detecta mucho ruido en la parte de las en las que habría gotas de líquido y las lunas del cilindro con el disco y del agua no las detecta del todo bien.

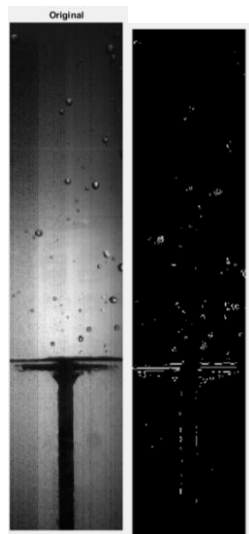


Ilustración 3.17 Ejemplo detección bordes con Sobel

Al igual que pasa con Prewitt cuando se usa Sobel detecta mucho ruido en la parte de las en las que habría gotas de líquido y las líneas del cilindro con el disco y del agua no las detecta del todo bien.

- Operadores basados en la segunda derivada (Laplaciana).

Siempre que en la imagen se presente un cambio de intensidades a lo largo de una determinada dirección, existirá un máximo en la primera derivada a lo largo de dicha dirección y, consecuentemente, un paso por cero en la segunda derivada. La derivada segunda tiene la ventaja de facilitar la localización precisa del borde. Por tanto la Laplaciana (equivalente bidimensional de la segunda derivada) de una imagen $f(x,y)$, denotado $\nabla^2 f(x, y)$.

Este operador se implementa a todos los puntos (x,y) de una imagen con la siguiente máscara de convolución:

$$\begin{array}{ccc} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{array}$$

Ilustración 3.18 Mascara para detección bordes con laplaciana

Aunque de forma general se podría expresar de la siguiente forma:

$$\begin{array}{ccc} \frac{\alpha}{1+\alpha} & \frac{1-\alpha}{1+\alpha} & \frac{\alpha}{1+\alpha} \\ \frac{1-\alpha}{1+\alpha} & \frac{-4}{1+\alpha} & \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \\ \frac{\alpha}{1+\alpha} & \frac{1-\alpha}{1+\alpha} & \frac{\alpha}{1+\alpha} \end{array}$$

Ilustración 3.19 Mascara genérica para detección bordes con laplaciana

Al ser un operador de segunda derivada es muy sensible al ruido y por tanto la detección de bordes es pobre. Para evitar esto en lugar de aplicar la Laplaciana directamente, se realiza primero un suavizado, operador LOG (Laplacian of Gauss).

Proporciona un borde de espesor unidad (un píxel).

- Operador LOG (suavizado y Laplaciana).

El operador LOG, aplica la Laplaciana a la imagen una vez suavizada con un filtro gaussiano.

Al suavizar la imagen se reduce el efecto del ruido. Se puede trabajar con distintas escalas de desviación estándar, cuanto mayor es esta desviación, habrá un menor número de pasos por cero y por tanto los bordes pequeños dejan de

detectarse. Este filtro es bastante costoso a nivel computacional, además su comportamiento es pobre en regiones donde intersectan bordes con distintas orientaciones (esquinas).

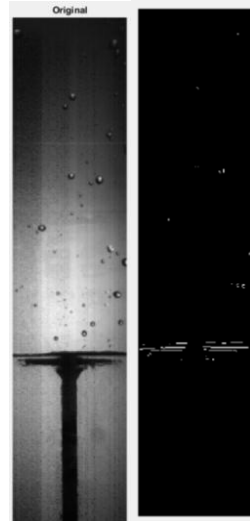


Ilustración 3.20 Ejemplo detección bordes con laplaciana

Cuando se usa Gauss para suavizar la imagen y luego se usa la laplaciana, que en este caso al no tener ruido Gaussiano la Laplaciana corresponde con la Laplaciana de Gauss se ve como detecta las líneas del fluido y la parte superior del disco que las gotas apenas se notan pero no consigue detectar las líneas del fluido de forma completa al igual que en los dos métodos anteriores.

- Operador Canny

El detector de Canny es la herramienta de detección de bordes más completa. Este detector de bordes sigue los siguientes pasos: La imagen se suaviza con un filtro Gaussiano, con una determinada desviación estándar σ , de esta forma el ruido se reduce. En la dirección del gradiente se eliminan los puntos que no sean máximos locales del módulo. Desechando estos puntos se mejora la localización y se evitan detecciones falsas. Finalmente, el algoritmo realiza una unión de los bordes.

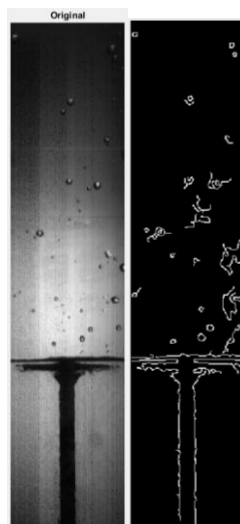


Ilustración 3.21 Ejemplo detección bordes con Canny

Con este método se ve como si se obtiene por completo la forma del agua y del pistón con el disco, este si sería un buen método pero es en el que más se marcan las gotas la cuales se podrían quitar si solo se analiza la parte desde la superficie líquida hasta el final y así no se tendría problemas.

3.1.4. Segmentación

La segmentación es el proceso que divide una imagen en regiones u objetos cuyos píxeles poseen atributos similares. Cada región segmentada suele tener un significado físico dentro de la imagen. Es uno de los procesos más importantes de un sistema automatizado de visión ya que permite extraer los objetos de la imagen para su posterior descripción y reconocimiento.

Las técnicas de segmentación pueden encuadrarse en tres grupos fundamentales: técnicas basadas en la detección de la frontera, técnicas de umbralización y técnicas basadas en el agrupamiento de píxeles.

En las técnicas basadas en la frontera, la segmentación de una imagen puede llevarse a cabo mediante la detección de los límites de cada región, es decir, detectando los bordes de la imagen. Las otras dos técnicas (umbralización y técnicas basadas en el agrupamiento de píxeles), enfocan la segmentación como un problema de clasificación de píxeles o grupos de píxeles, donde: píxeles de una región deben ser similares, píxeles de regiones distintas deben ser no similares, las regiones resultantes deben tener cierto significado para el procesamiento posterior.

Veremos una técnica “La transformada de Hough”, perteneciente al primer bloque de las técnicas de segmentación (técnicas basadas en la frontera).

- La transformada de Hough

El objetivo de la transformada de Hough es encontrar puntos alineados que puedan existir en la imagen, es decir, puntos en la imagen que satisfagan la ecuación de la recta, para distintos valores de ρ y θ .

Ecuación de la recta en forma polar: $\rho = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta$. Por tanto hay que realizar una transformación entre el plano imagen (coordenadas x-y) y el plano o espacio de parámetros (ρ, θ) .

Para aplicar la transformada de Hough es necesario discretizar el espacio de parámetros en una serie de celdas denominadas celdas de acumulación. Esta discretización se realiza sobre los intervalos $(\rho_{\min}, \rho_{\max})$ y $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$.

El siguiente paso es evaluar la ecuación de la recta para cada punto de la imagen (x_k, y_k) , si se cumple esta ecuación se incrementa en uno el número de votos de la celda. Un número de votos elevado indica que el punto pertenece a la recta.

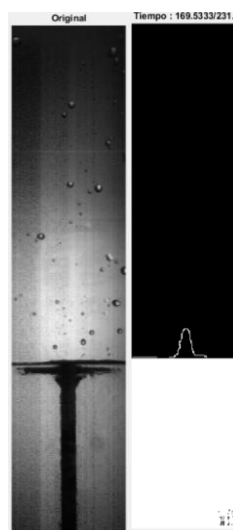


Ilustración 3.22 Ejemplo segmentación con la transformada de Hough

Con este tipo de umbralización lo que se hace es que lo primero es detectar los bordes del objeto a segmentar en este caso el chorro y se hará detectándolos por el método de Canny como se ha visto en el apartado anterior que era con el que mejores resultados se obtenía. Lo siguiente sería ir cambiando θ para ir sacando los valores de ρ y sacar así las direcciones que más se repiten, como se ve en la siguiente imagen.

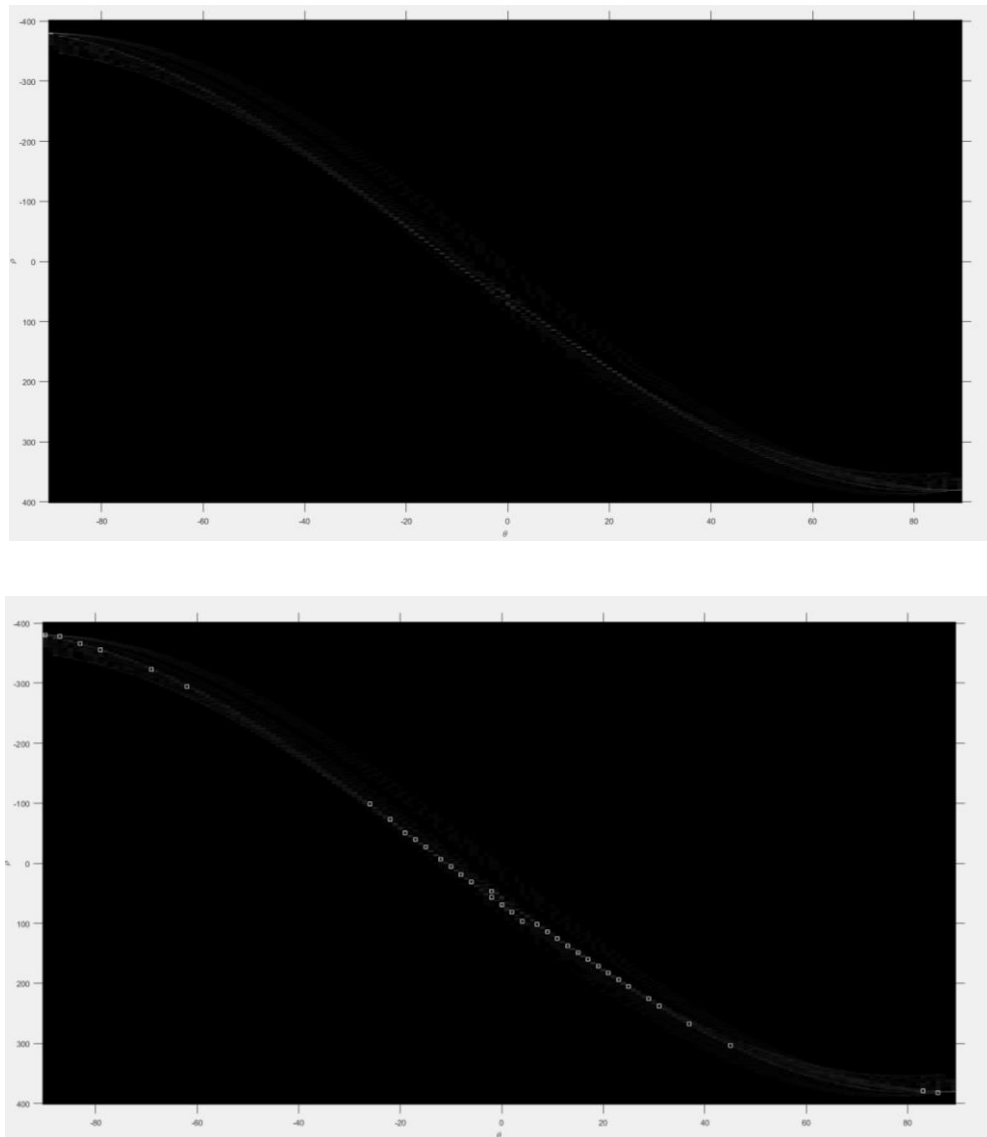


Ilustración 3.23 Ejemplo direcciones más repetidas en la transformada de Hough

Como se ve los cuadrados blancos representan las combinaciones de ρ y θ que más se repiten y eso nos va a permitir dibujar las líneas del objeto.

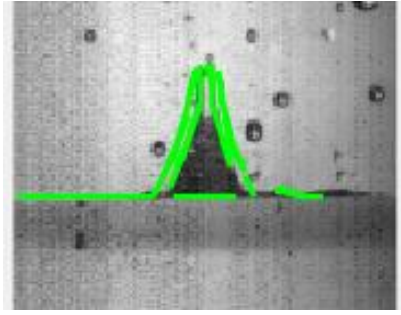


Ilustración 3.24 Dibujado de las líneas de las direcciones más repetidas en la transformada de Hough

- Umbralización

La umbralización es un proceso que permite convertir una imagen de niveles de gris en una imagen binaria, de tal forma que los objetos de interés se etiqueten con un valor distinto al de los píxeles del fondo. Es una técnica de segmentación rápida, que tiene un coste computacional bajo y que puede ser realizada en tiempo real, pero al utilizar el histograma no se tiene en cuenta la información espacial sino solamente la distribución de grises en la imagen. Por ello, dos imágenes muy diferentes pueden tener el mismo histograma. Esto hace que, los métodos de segmentación basados en la umbralización, como único medio de segmentación, resulten limitados en muchos problemas reales. Aunque sí se usan con frecuencia como complemento de otros métodos.

La umbralización global puede utilizarse cuando la iluminación es relativamente uniforme, es decir, hay una clara definición entre objetos y fondo. Una forma de elegir este umbral es mediante inspección visual de su histograma.

$$B(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } I(i, j) \geq U \\ 0, & \text{si } I(i, j) < U \end{cases} \quad (3.5)$$

La umbralización global no da buenos resultados cuando el fondo de la imagen a segmentar no es uniforme. Una práctica habitual sería preprocesar la imagen, compensando de esta forma los problemas de iluminación y aplicar un umbral global a la imagen preprocesada.

Para compensar la iluminación no uniforme del fondo, pueden aplicarse operaciones morfológicas de apertura. La morfología tiene su origen en la teoría de conjuntos. Para ello las imágenes binarias son conjuntos de puntos 2D, que representan los puntos activos de una imagen, y las imágenes en niveles de gris son conjuntos de puntos 3D, donde la tercera componente corresponde al nivel de intensidad.

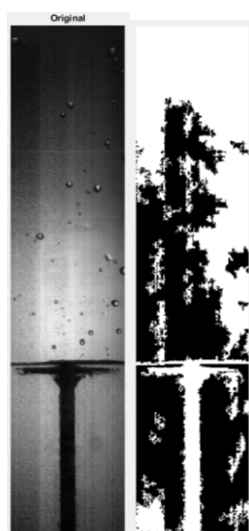


Ilustración 3.25 Ejemplo segmentación por umbral

Se ve como aun aplicando operaciones morfológicas como no se consigue corregir del todo los defectos de iluminación se tiene que la segmentación no es buena. Además cuando se calcula el umbral hace la media de grises de todos los píxeles con lo que sale un umbral muy grande para la segmentación. Se podría sacar varios umbrales pero puede suceder lo mismo que con solo un umbral, los cuales sean demasiado grandes o pequeños. Con lo que no se obtendrían los resultados que se quiere.

- Crecimiento de regiones

Con estas técnicas se determinan zonas dentro de una imagen basándose en criterios de similitud y proximidad entre los píxeles de la misma.

En estas técnicas la homogeneidad (o falta de homogeneidad) entre regiones adyacentes es el criterio utilizado para unir (o dividir) regiones de la imagen. Dicha homogeneidad se puede definir a partir de criterios como: el nivel de gris medio, el color, la forma, etc. El resultado de la segmentación es una partición de la imagen en regiones homogéneas.

El crecimiento de regiones es un procedimiento que agrupa píxeles o subregiones en regiones más grandes. El método más simple es la adición de píxeles, donde se parte de un conjunto de puntos semillas a los que se le van añadiendo píxeles vecinos que poseen propiedades similares (por ejemplo, el nivel de gris, textura, color,...). Si se usan n semillas, al final se podrán obtener una segmentación con un máximo de n regiones, además del fondo.

La selección de las semillas normalmente se realiza con un conocimiento previo de la imagen.

El criterio de parada es cuando no existan píxeles que cumplen los criterios de inclusión a una región.

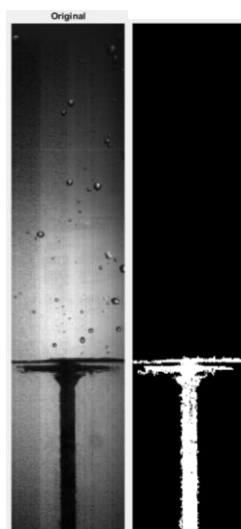


Ilustración 3.26 Ejemplo segmentación con crecimiento de regiones

En este tipo de umbralización se ve como si se selecciona bien la semilla y se seleccionan unos buenos márgenes detecta muy bien el objeto, como se observa en la imagen anterior. Además con la imagen binaria obtenida si se usa un elemento estructurante de tipo disco y se hace una erosión se pueden detectar bordes como en el primer caso de umbralización.



Ilustración 3.27 Ejemplo detección bordes a partir de crecimiento de regiones

3.1.5. Reconocimiento, localización y extracción de objetos

Se parte de la descripción, o caracterización, mediante un vector de características de las regiones de imagen previamente aisladas mediante segmentación.

En este apartado el objetivo es la asignación de los objetos (regiones), denominados también patrones, a alguno de los grupos representativos, o clases, considerados en el problema. Cada clase representa un tipo diferente de objeto.

Los sistemas de reconocimiento basados en vectores de características se denominan clasificadores o sistemas de reconocimiento por patrones

Antes que nada hay que tener en cuenta que para reconocer un objeto es necesario previamente conocer el objeto que va a ser reconocido. El conocimiento de un objeto que se desea reconocer puede incluir un modelo geométrico del mismo o bien una descripción de sus características (vector de características). La tarea de reconocimiento consiste en comparar la descripción calculada del objeto desconocido con la descripción de los objetos conocidos.

Cuando se plantea el reconocimiento como un problema de clasificación de los objetos (representados mediante vectores de características) de acuerdo con una

determinada partición del espacio de características. Cada una de las regiones corresponde a un subespacio representativo de las clases consideradas en el problema.

- Métodos paramétricos o estadísticos

Se basan en la teoría bayesiana de la decisión, es decir, en la optimización de probabilidades en la asignación de los objetos a las clases. Consigna de diseño: minimizar la probabilidad de error en la asignación a clases que efectúe el clasificador (Distancia Euclídea).

- Métodos no paramétricos

Se particiona el espacio de acuerdo con objetos cuya clasificación es conocida a priori (Perceptrón). Se entrena la red neuronal para que “aprenda a reconocer” cada objeto.

En cuanto a la selección de características se hace una selección del conjunto de atributos que conformarán el vector de características, es fundamental para el éxito del proceso de reconocimiento.

Estas características deben tener poder de discriminación, fiabilidad, independencia y se trata de minimizar el número de características.

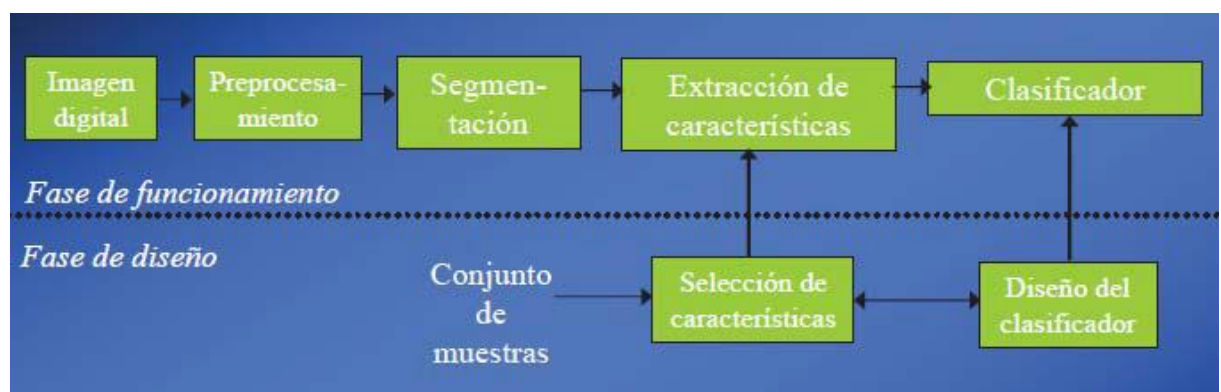
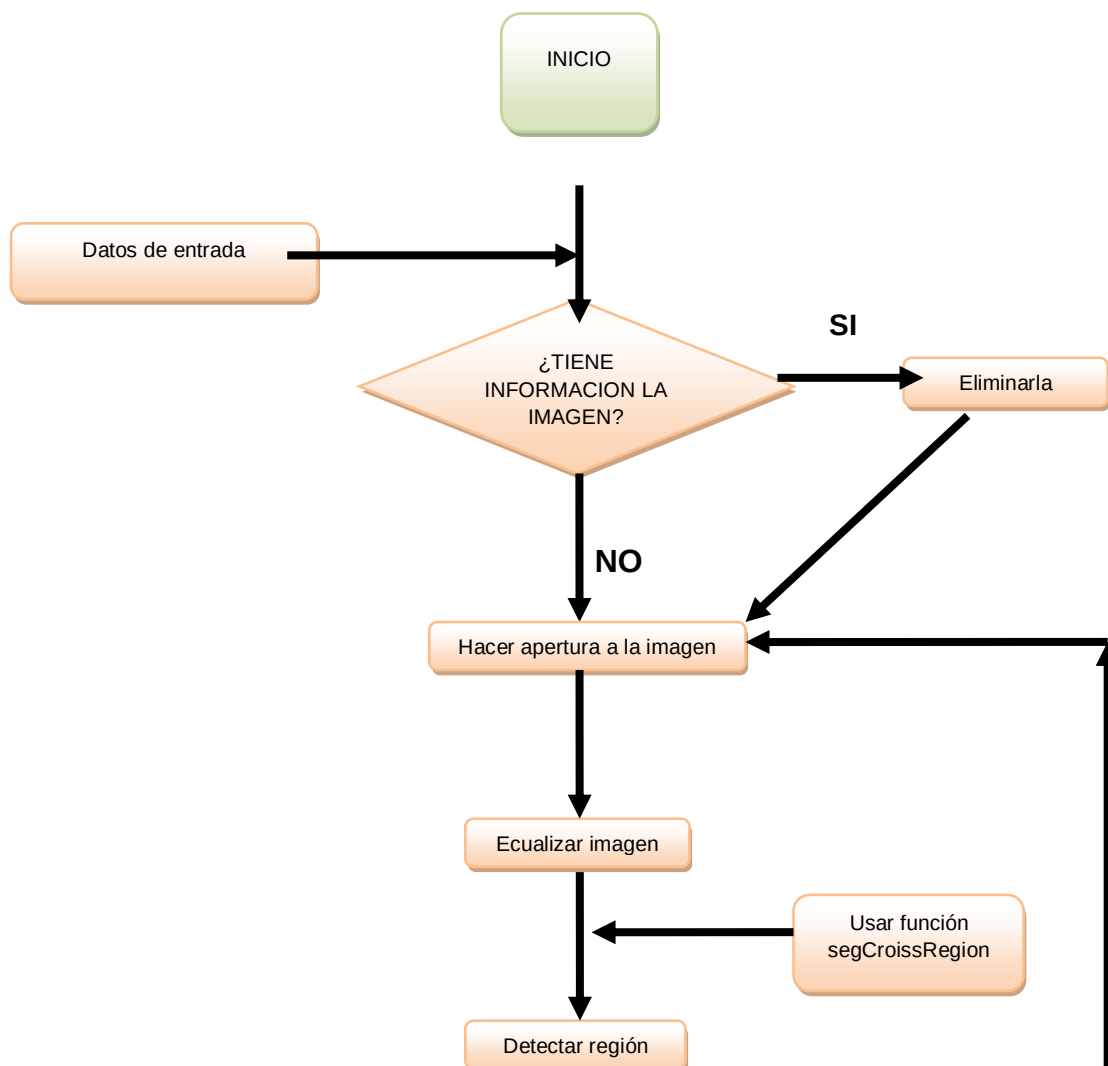


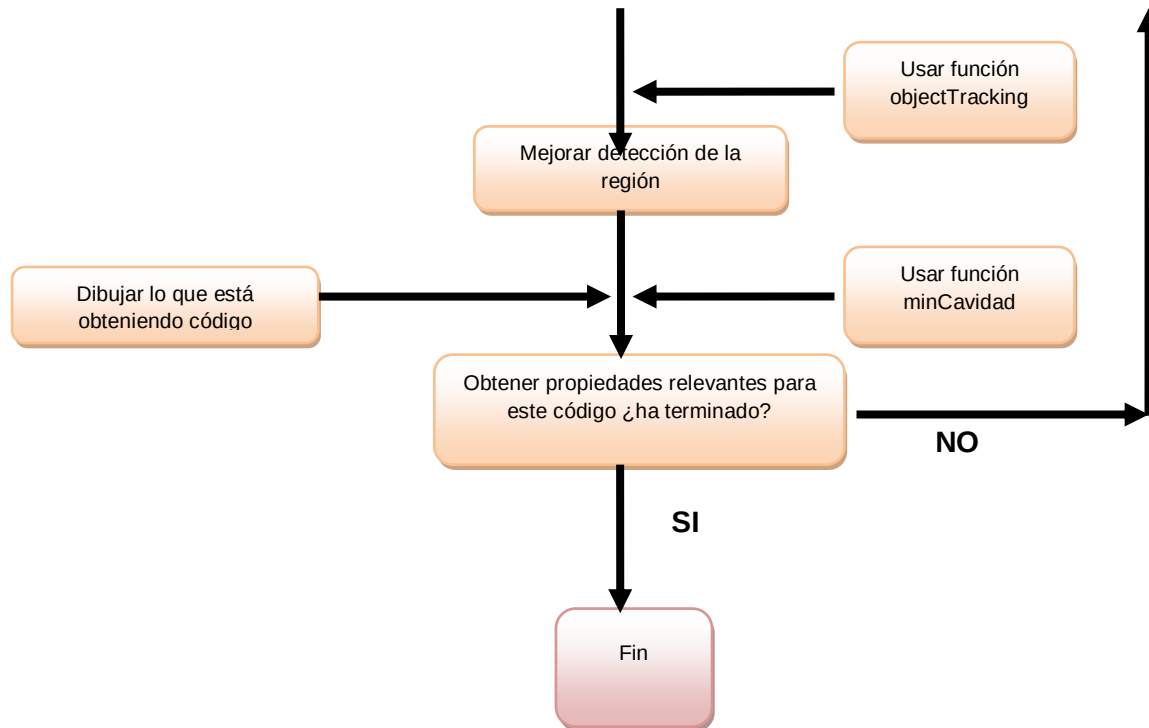
Ilustración 3.28 Pasos a seguir en el procesamiento de imágenes

3.2. Validación código

Con este código se pretende comprobar que con el análisis de imágenes es capaz de obtener la velocidad con la que se está haciendo el ensayo, por ejemplo si el motor se hace que funcione a una velocidad de 1 m/s, tanto la varilla como el disco van a bajar a esa velocidad y eso es lo que se va a comprobar con el análisis de imágenes para poder decir así que los datos obtenidos son los correctos y no se está cometiendo errores al utilizar el análisis de imágenes.

Este código se encuentra resumido en un diagrama de bloques donde se puede ver de forma gráfica como es el funcionamiento del código, además en el Anexo I también se puede encontrar el código realizado. En este apartado se va a hacer una descripción en detalle de las funciones utilizadas y para que se han utilizado.





Antes de ir con el código propiamente dicho se va a utilizar otro previamente con el que se pretende obtener el factor de conversión de pixeles a milímetros ya que se conoce el radio del disco. En este código tiene como entrada el diámetro del disco en milímetros además del path donde se encuentra el video o imagen a analizar el cual se obtiene mediante la función “uigetfile”.

El siguiente paso es con la función “VideoReader” se va a abrir el video y mediante un ciclo while se va a ir pasando frame a frame y de estos se van a obtener las distintas características que se quiera, en este caso con un solo frame se puede obtener el factor de conversión que se está buscando, para ello con la función “readFrame” se guarda la imagen en una variable para posteriormente abrirla con la función “imshow”. Lo siguiente es que con la función “ginput” se puede pinchar en un punto de una gráfica en la que previamente se ha mostrado la imagen, con esto obtenemos la posición x e y que se quiera de la imagen y con esta información se puede coger la fila que sería la fila que corresponde al valor de y , y de esa fila se puede obtener cual es la longitud en pixeles que tiene el disco y como se conoce la longitud real se puede obtener el factor de conversión. Antes de obtener este factor hay que pasar la imagen de 8 bits (valores entre 0 y 255) a una imagen con valores con formato double (valores entre 0 y 1). Una vez que se ha realizado este paso se busca un umbral para segmentar la imagen para esta poder bianrizarla.

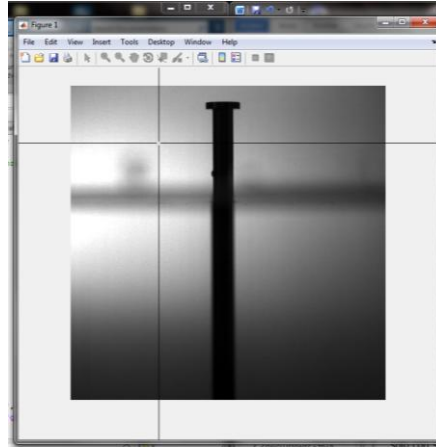


Ilustración 3.29 Ejemplo función “ginput”

Lo que se hace es que solo se binariza la fila que se ha seleccionado y los pixeles por debajo del umbral se van a poner a 1 y los demás a 0, gracias a esto solo con sumar los pixeles que estén a 1 se va a tener el número de pixeles. Por ultimo ya se tendría el factor de conversión:

$$FactorConversion = \frac{diámetro}{número\ pixeles} \quad (3.6)$$

Se puede dibujar sobre la imagen para que se vea claro que el código está haciendo lo que se le pide y es lo que se quiere que este haga.

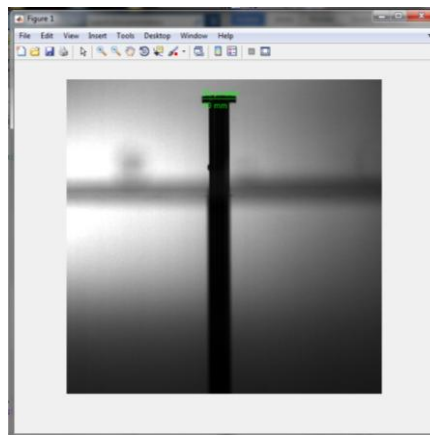


Ilustración 3.30 Ejemplo para sacar factor conversión

Ahora ya si se puede seguir con el código para validar los ensayos, al igual que en el código para sacar el factor de conversión tiene como entrada el path donde se

encuentra el video o imagen a analizar el cual se obtiene mediante la función “uigetfile”.

El siguiente paso es con la función “VideoReader” se va a abrir el video, almacenándose en la estructura de datos con nombre “vidObj” y mediante un ciclo while se va a ir pasando frame a frame y de esa se van a obtener las distintas características que se quiera. Además se puede poner el punto en el que se quiere que empiece a ejecutar el video por si hay alguna parte que no es interesante para el estudio con “vidObjet.CurrentTime”.

Se van a definir una serie de variables que se utilizaran más adelante como son “frame_org” la cual se pone como un array vacío para posteriormente ir guardando los distintos frames que se leen y no perderlo cuando se le hagan las distintas operaciones a la imagen. La variable “fps” que corresponde al número de fps con el que se ha grabado el video y se va a utilizar para calcular el tiempo entre una imagen y otra. La variable “pixmm” que corresponde al factor de conversión anteriormente calculado. La variable “ind” que se trata de un indicador con el que se va a calcular los ciclos que se han ejecutado durante el while. Por último la variable “x e y” que servirán para una función posterior para hacer la segmentación de la imagen por crecimiento de regiones y con esa posición de le dará la semilla además de a partir de la fila “y” hasta la parte superior de la imagen no se va a tener en cuenta para el análisis ya que se va a calcular la velocidad de bajada del disco como la de crecimiento de la cavidad que sería la misma.

Ya se puede pasar al ciclo while donde se va a ir iterando para ir pasando de frame a frame. Lo primero que se va a hacer en este ciclo es leer el frame con la función “readFrame”, hay algunos videos que en la parte inferior se encuentra una parte en la que hay información sobre el video y esa parte se quita buscando en la primera columna las filas cuyo pixel sea igual a 0 ya que es completamente negra esa parte una vez que se tiene la posición de las filas se puede dejar el frame como la parte de la imagen sin esa parte negra con información.

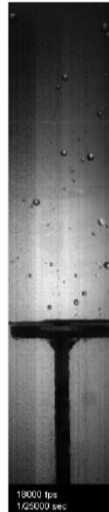


Ilustración 3.31 Ejemplo imagen con información parte inferior

Mediante un condicional se puede quitar o no esta parte para que en caso de que la imagen no posea esta información deje el frame tal cual.

Lo siguiente que se hace es el preprocesamiento de la imagen antes de sacar información, toda esta parte se encuentra redactada en el apartado 3.1 de conceptos de análisis de imágenes donde se puede observar que apartados fueron útiles y cuáles no.

Lo primero que se le va a hacer a la imagen es hacerle una apertura para intentar eliminar los objetos pequeños como en este caso son las gotas e intentar mejorar los defectos de iluminación. Para ello se crea un elemento estructurante con forma de disco (lo que se obtiene es una máscara que se va a pasar por toda la imagen) para crear este elemento estructurante se utiliza la función “strel” y para realizar la apertura la cual consta de una erosión para una posterior dilatación, se utiliza la función “imtophat”.

Para intentar mejorar la iluminación y contraste de la imagen lo que se hace es que después de la apertura se va a ecualizar la imagen para tener un histograma más uniforme y no tan concentrado en valores cercanos a 0 (imagen más oscura) utilizando la función “histeq”.

Ya se tendría la imagen lista para su segmentación, como al inicio código de ha definido las variables “x e y” y tenían un valor de 0 ahora mediante una condición se va a cambiar este valor al valor que se quiera como semilla mediante la función “ginput” que permite pinchar en un punto de una gráfica en la que previamente se ha mostrado la imagen, con esto obtenemos la posición x e y (de la semilla), al haber realizado esto dentro de una condición solo se va a ejecutar la primera vez del ciclo while.

Una vez obtenida la semilla se utiliza la función “segCroissRegion” la cual tiene como salida la imagen binarizada que se obtiene de la segmentación por crecimiento de regiones y los bordes de la imagen obtenidos como se explicó en el apartado 3.1.4 cuando se hablaba de segmentación por crecimiento de regiones. Como entradas a esta función tiene una tolerancia para cuando crezca la región decidir si el pixel es válido o no, la imagen ecualizada, los puntos x e y de la semilla. Lo que hace esta función es crear una matriz del mismo tamaño que la imagen ecualizada rellena de 0 (o false) y luego en el punto de la semilla lo pone a uno y ya va comparando todos los pixeles de la imagen ecualizada con el valor de la semilla la cual tiene una tolerancia que se le da como entrada.

Cuando ya se han detectado los objetos que se quieren analizar se pasa a sacar las características de estos para ello se utiliza la función “objetTracking” la cual tiene como salida una estructura con las distintas propiedades que se quiera como pueden ser altura, anchura, área, límites,... Como entrada tiene la imagen binarizada con los objetos. Lo que hace esta función es, con la función “bwareaopen” los objetos pequeños se quitan si no llegan a cierto umbral, lo siguiente que hace es que con la función “imfill” se rellenan los huecos que pueda tener el objeto, luego se utiliza la función “bwlabel” para saber que objetos están conectados entre sí para saber si pertenece o no al objeto, ya que en ocasiones parece que dos objetos están juntos pero en realidad hay una pequeña separación por pocos pixeles, y en último lugar se utiliza la función “regionprops” que es la que va a obtener lo que se ha comentado de áreas, longitudes o centroides.

Una vez que se tiene algunas de las propiedades del objeto se van sacar las que para este código son interesantes y es como cambia la longitud de la cavidad que equivale a cómo cambia la longitud del disco. Se va a utilizar la función

“minCavidad” que tiene como salidas el valor mínimo del diámetro de la cavidad, la fila donde se produce ese mínimo, los puntos donde empieza y termina es mínimo y la longitud de la cavidad desde la superficie libre del agua hasta el disco, esta última salida es la interesante para este código. Como entradas tiene las propiedades que se han obtenido anteriormente y la imagen binarizada. El funcionamiento de este código es que si no hay propiedades en la imagen todas ellas las ponen a 0 y si no es así de las propiedades obtiene la fila donde comienza el objeto para después crear un vector con 0 para así ir rellenando los distintos diámetros de cavidad por filas. Una vez obtenidos todos los diámetros se buscan cambios bruscos en los diámetros y con esto se puede saber dónde se pasa del disco a la varilla para así poder determinar del vector de diámetros donde está el mínimo, donde empieza y donde acaba además de saber cuál es la longitud de la cavidad.

Como se ha dicho la variable de más importancia para este caso es la longitud de la cavidad que va a ser la que se use.

Cuando ya se tienen todas las propiedades sobre la imagen original se puede dibujar los límites del objeto en este caso la cavidad que es lo mismo que lo que baja el disco.

Como ejemplo se va a usar un disco de:

$$\begin{aligned} \text{Radio} &= h_0 = 5 \text{ mm} \\ \text{Velocidad teórica} &= 1 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Tanto el radio como la velocidad disco son variables conocidas de antemano, ya que para cada ensayo se ha medido y colocado un disco con tamaño distinto y para el caso de la velocidad del disco el motor tiene unas variables internas con las que se puede regular la velocidad de este, como se explicó en el apartado 2.1.

Con forme se va ejecutando el código se puede ver cómo va cambiando la longitud de la cavidad y como se marca en las imágenes de abajo, se puede ver como se detecta bien como es el objeto.

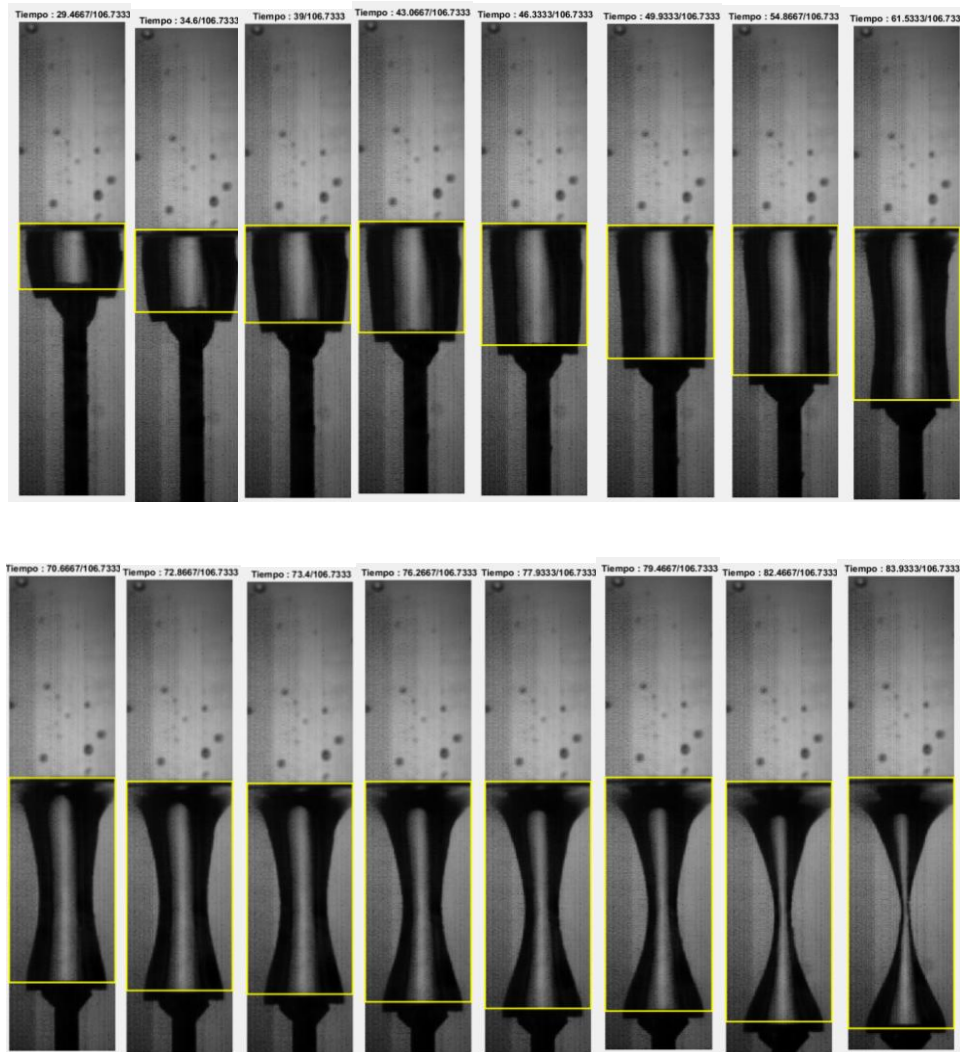


Ilustración 3.32 Ejemplo validación código

Como se ha ido almacenando la variable que corresponde a la longitud de la cavidad se ve cómo va aumentando con el tiempo y se tiene la siguiente grafica de la altura de la cavidad frente al tiempo del ensayo.

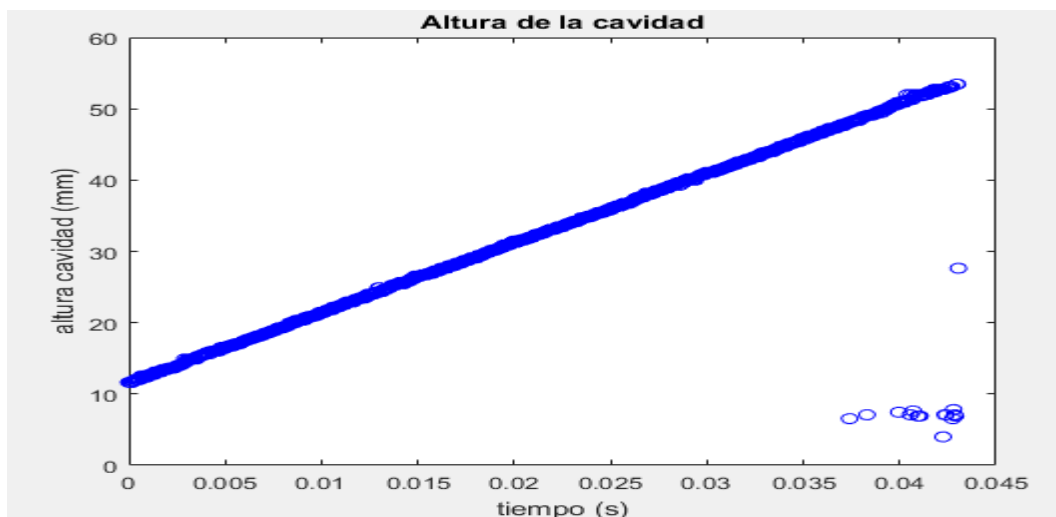


Ilustración 3.33 Gráfica altura-tiempo

Como se ve los puntos obtenidos en la gráfica anterior tiene una fuerte tendencia lineal (a una recta), debido a esto si se calcula la velocidad tiene que ser una recta horizontal (una constante) ya que la derivada de una recta es una constante. Esto se puede observar en la siguiente imagen.

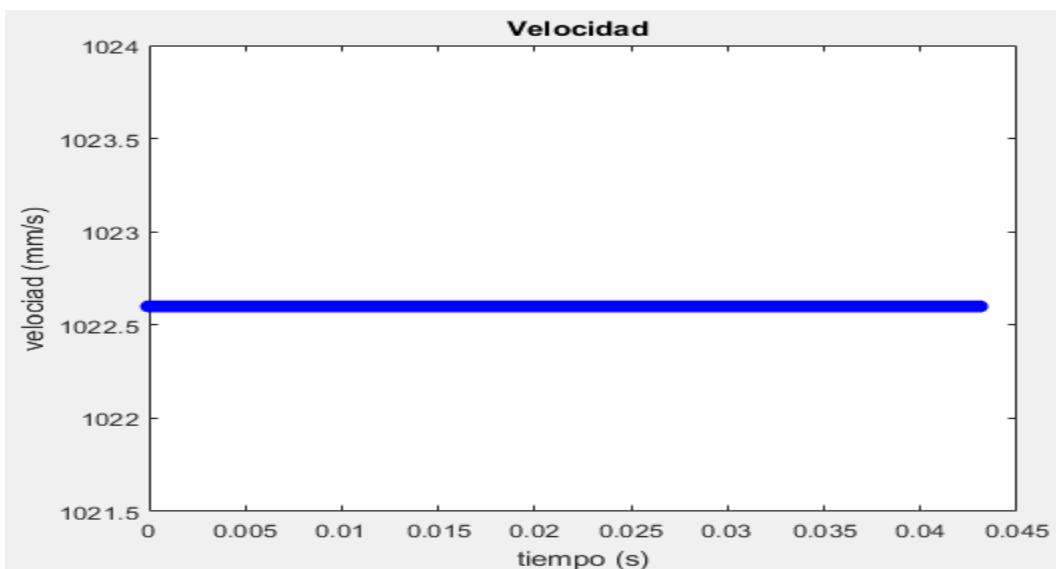


Ilustración 3.34 Gráfica velocidad

Como se ve la velocidad obtenida es una constante y el valor de la velocidad es de 1022.6 mm/s y la que proporcionaba el motor es de $1\text{ m/s} = 1000\text{ mm/s}$ lo que da un error mínimo.

Si calculamos este queda como:

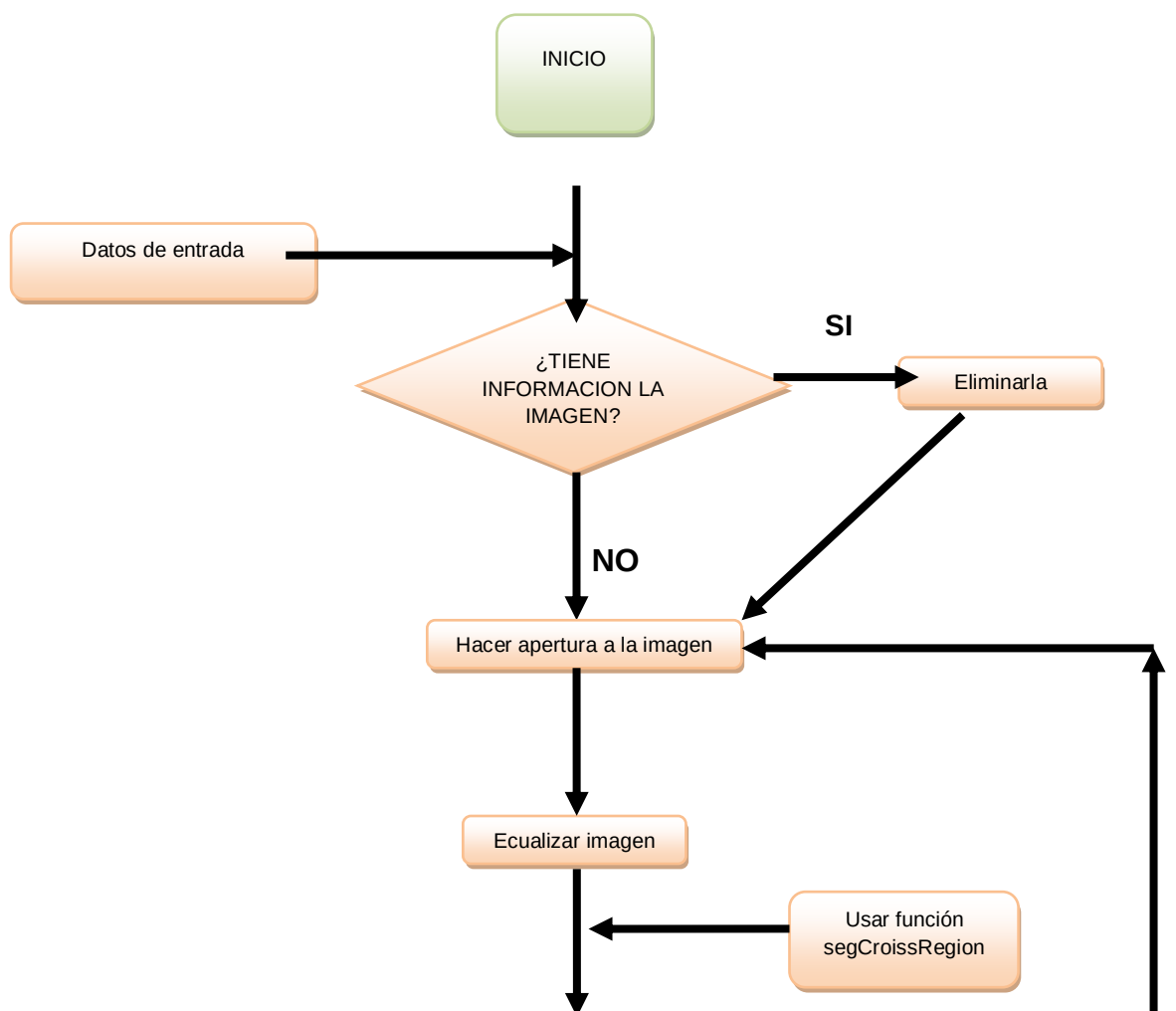
$$Error = \frac{1022.6 - 1000}{1000} * 100 = 2.2\% \quad (3.8)$$

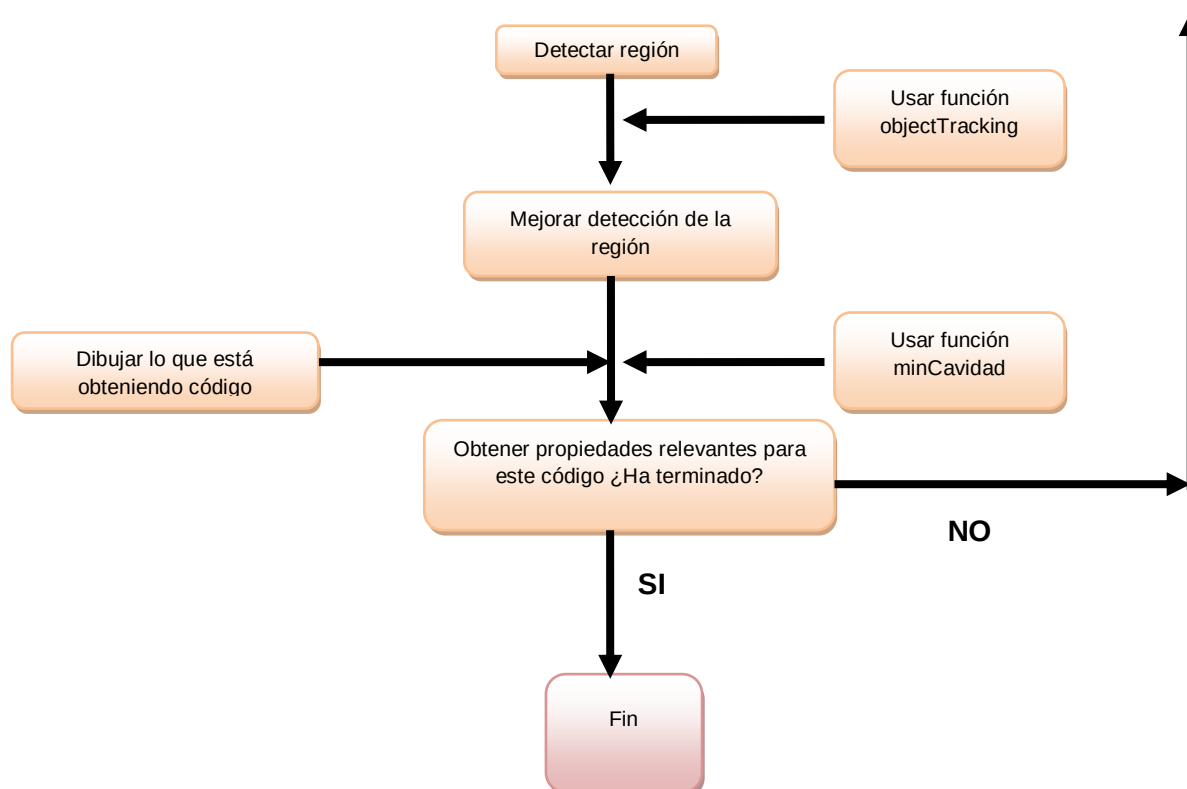
Gracias a esto se puede concluir que los datos que se van a obtener de los distintos casos van a ser correctos ya que como se puede observar el análisis por imágenes frente a la realidad hay un error muy pequeño.

3.3. Código para obtener características del cierre de la cavidad

Con este código se pretende obtener del video todas las dimensiones de interés para su posterior evaluación, como se trata de un ensayo en con líquidos, los cuales son difícil de medir, lo que se va a hacer es obtener todas la dimensiones necesarias con el análisis de imágenes. Gracias a esta técnica se puede saber según el número de pixeles la distancia o longitud que se quiera conocer y una vez que se tiene como evoluciona esa medida con el tiempo se puede obtener, por medio de la derivada la velocidad de esta medida.

Este código se encuentra resumido en un diagrama de bloques donde se puede ver de forma gráfica como es el funcionamiento del código, además en el Anexo II también se puede encontrar el código realizado. En este apartado se va a hacer una descripción en detalle de las funciones utilizadas y para que se han utilizado.





Antes de ir con el código propiamente dicho se va a utilizar otro previamente, con el que se pretende obtener el factor de conversión de píxeles a milímetros ya que se conoce el radio del disco. En este código tiene como entrada el diámetro del disco en milímetros además del path donde se encuentra el video o imagen a analizar el cual se obtiene mediante la función “uigetfile”.

El siguiente paso es con la función “VideoReader” se va a abrir el video y mediante un ciclo while se va a ir pasando frame a frame y de estos se van a obtener las distintas características que se quiera, en este caso con un solo frame se puede obtener el factor de conversión que se está buscando, para ello con la función “readFrame” se guarda la imagen en una variable para posteriormente abrirla con la función “imshow”. Lo siguiente es que con la función “ginput” se puede pinchar en un punto de una gráfica en la que previamente se ha mostrado la imagen, con esto obtenemos la posición x e y que se quiera de la imagen y con esta información se puede coger la fila que sería la fila que corresponde al valor de y , y de esa fila se puede obtener cual es la longitud en píxeles que tiene el disco y como se conoce la longitud real se puede obtener el factor de conversión. Antes de obtener este factor hay que pasar la imagen de 8 bits (valores entre 0 y 255) a una imagen con valores

con formato double (valores entre 0 y 1). Una vez que se ha realizado este paso se busca un umbral para segmentar la imagen para esta poder binarizarla.

Lo que se hace es que solo se binariza la fila que se ha seleccionado y los pixeles por debajo del umbral se van a poner a 1 y los demás a 0, gracias a esto solo con sumar los pixeles que estén a 1 se va a tener el número de pixeles. Por ultimo ya se tendría el factor de conversión:

$$FactorConversion = \frac{diámetro}{número\ pixeles} \quad (3.9)$$

Se puede dibujar sobre la imagen para que se vea claro que el código está haciendo lo que se le pide y es lo que se quiere que este haga.

Ahora ya si se puede seguir con el código, al igual que en el código para sacar el factor de conversión y el código para validar el ensayo tiene como entrada el path donde se encuentra el video o imagen a analizar el cual se obtiene mediante la función “uigetfile”.

El siguiente paso es con la función “VideoReader” se va a abrir el video, almacenándose en la estructura de datos con nombre “vidObj” y mediante un ciclo while se va a ir pasando frame a frame y de estos se van a obtener las distintas características que se quiera. Además se puede poner el punto en el que se quiere que empiece a ejecutar el video por si hay alguna parte que no es interesante para el estudio con “vidObjet.CurrentTime”.

Se van a definir una serie de variables que se utilizaran más adelante como son “frame_org” la cual se pone como un array vacío para posteriormente ir guardando los distintos frames que se leen y no perderlo cuando se le hagan las distintas operaciones a la imagen. La variable “fps” que corresponde al número de fps con el que se ha grabado el video y se va a utilizar para calcular el tiempo entre una imagen y otra. La variable “pixmm” que corresponde al factor de conversión anteriormente calculado. La variable “ind” que se trata de un indicador con el que se va a calcular los ciclos que se han ejecutado durante el while. Por último la variable “x e y” que servirán para una función posterior para hacer la segmentación de la imagen por crecimiento de regiones y con esa posición de le dará la semilla además

de a partir de la fila “y” hasta la parte superior de la imagen no se va a tener en cuenta para el análisis ya que se va a calcular la velocidad de bajada del disco como la de crecimiento de la cavidad que sería la misma.

Ya se puede pasar al ciclo while donde se va a ir iterando para ir pasando de frame a frame. Lo primero que se va a hacer en este ciclo es leer el frame con la función “readFrame”, hay algunos videos que en la parte inferior se encuentra una parte en la que hay información sobre el video y esa parte se quita buscando en la primera columna las filas cuyo pixel sea igual a 0 ya que es completamente negra esa parte una vez que se tiene la posición de las filas se puede dejar el frame como la parte de la imagen sin esa parte negra con información.

Mediante un condicional se puede quitar o no esta parte para que en caso de que la imagen no posea esta información deje el frame tal cual.

Lo siguiente que se hace es el preprocesamiento de la imagen antes de sacar información, toda esta parte se encuentra redactada en el apartado 3.1 de conceptos de análisis de imágenes donde se puede observar que apartados fueron útiles y cuáles no.

Lo primero que se le va a hacer a la imagen es hacerle una apertura para intentar eliminar los objetos pequeños como en este caso son las gotas e intentar mejorar los defectos de iluminación. Para ello se crea un elemento estructurante con forma de disco (lo que se obtiene es una máscara que se va a pasar por toda la imagen) para crear este elemento estructurante se utiliza la función “strel” y para realizar la apertura la cual consta de una erosión para una posterior dilatación, se utiliza la función “imtophat”.

Para intentar mejorar la iluminación y contraste de la imagen lo que se hace es que después de la apertura se va a ecualizar la imagen para tener un histograma más uniforme y no tan concentrado en valores cercanos a 0 (imagen más oscura) utilizando la función “histeq”.

Ya se tendría la imagen lista para su segmentación, como al inicio código de ha definido las variables “x e y” y tenían un valor de 0 ahora mediante una condición se va a cambiar este valor al valor que se quiera como semilla mediante la función

“ginput” que permite pinchar en un punto de una gráfica en la que previamente se ha mostrado la imagen, con esto obtenemos la posición x e y (de la semilla), al haber realizado esto dentro de una condición solo se va a ejecutar la primera vez del ciclo while.

Una vez obtenida la semilla se utiliza la función “segCroissRegion” la cual tiene como salida la imagen binarizada que se obtiene de la segmentación por crecimiento de regiones y los bordes de la imagen obtenidos como se explicó en el apartado 3.1.4 cuando se hablaba de segmentación por crecimiento de regiones. Como entradas a esta función tiene una tolerancia para cuando crezca la región decidir si el pixel es válido o no, la imagen ecualizada, los puntos x e y de la semilla. Lo que hace esta función es crear una matriz del mismo tamaño que la imagen ecualizada rellena de 0 (o false) y luego en el punto de la semilla lo pone a uno y ya va comparando todos los pixeles de la imagen ecualizada con el valor de la semilla la cual tiene una tolerancia que se le da como entrada.

Cuando ya se han detectado los objetos que se quieren analizar se pasa a sacar las características de estos para ello se utiliza la función “objetTracking” la cual tiene como salida una estructura con las distintas propiedades que se quiera como pueden ser altura, anchura, área, límites,... Como entrada tiene la imagen binarizada con los objetos. Lo que hace esta función es, con la función “bwareaopen” los objetos pequeños se quitan si no llegan a cierto umbral, lo siguiente que hace es que con la función “imfill” se rellenan los huecos que pueda tener el objeto, luego se utiliza la función “bwlabel” para saber que objetos están conectados entre sí para saber si pertenece o no al objeto, ya que en ocasiones parece que dos objetos están juntos pero en realidad hay una pequeña separación por pocos pixeles, y en último lugar se utiliza la función “regionprops” que es la que va a obtener lo que se ha comentado de áreas, longitudes o centroides.

Una vez que se tiene algunas de las propiedades del objeto se van sacar las que para este código son interesantes. Se va a utilizar la función “minCavidad” que tiene como salidas el valor mínimo del diámetro de la cavidad, la fila donde se produce ese mínimo, los puntos donde empieza y termina es mínimo y la longitud de la cavidad desde la superficie libre del agua hasta el disco, en este casos todas las salidas son de utilidad excepto la de la longitud de la cavidad que nos servía en el

código anterior para validar el código. Como entradas tiene las propiedades que se han obtenido anteriormente y la imagen binarizada. El funcionamiento de este código es que si no hay propiedades en la imagen todas ellas las pone a 0 y si no es así de las propiedades obtiene la fila donde comienza el objeto para después crear un vector con 0 para así ir rellenando los distintos diámetros de cavidad por filas. Una vez obtenidos todos los diámetros se buscan cambios bruscos en los diámetros y con esto se puede saber dónde se pasa del disco a la varilla para así poder determinar del vector de diámetros donde está el mínimo, donde empieza y donde acaba además de saber cuál es la longitud de la cavidad.

Como se ha dicho las variables de más importancia para este caso son la que calcula el diámetro mínimo, la fila donde se encuentra y donde empieza y acaba ese mínimo.

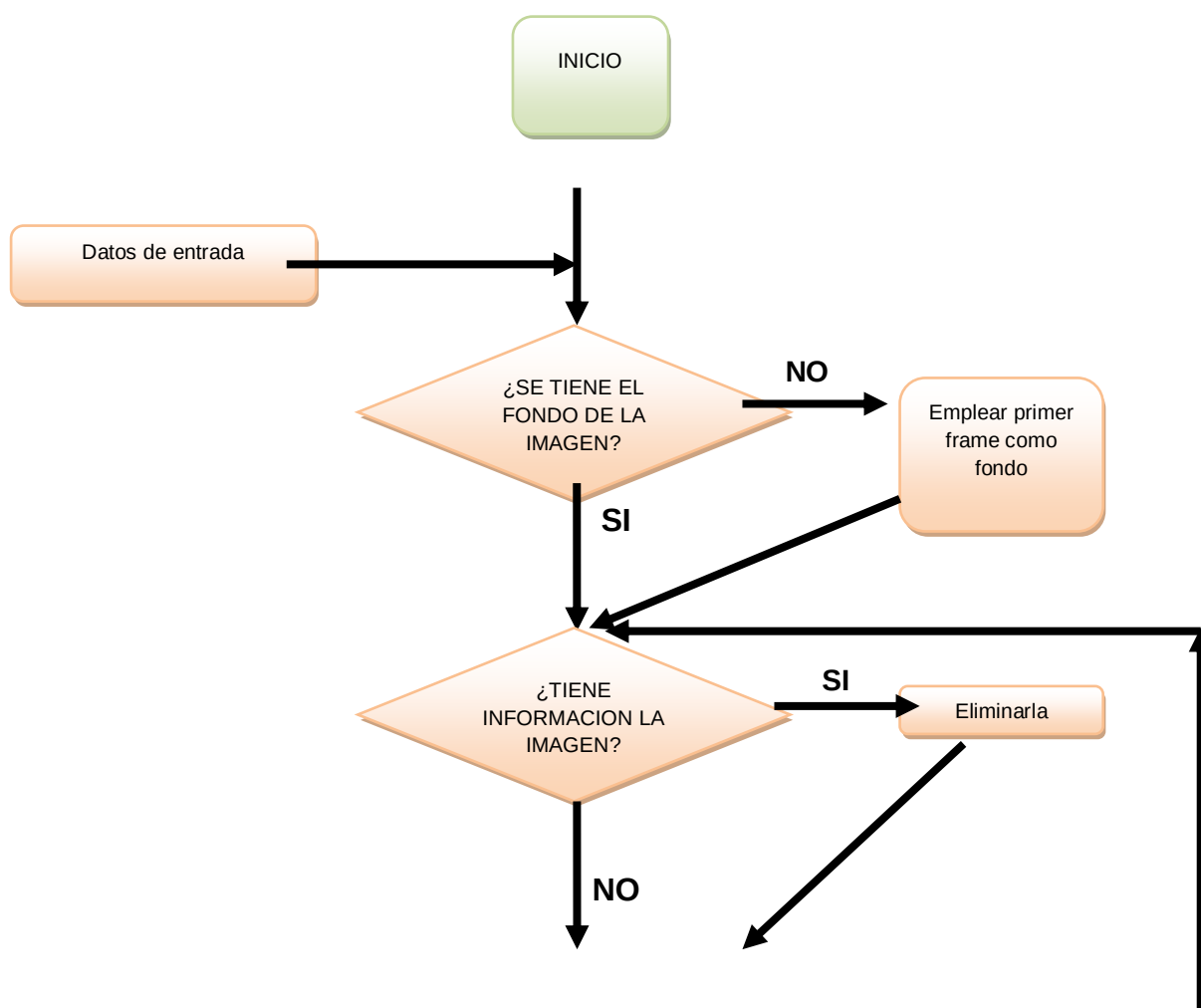
Cuando ya se tienen todas las propiedades sobre la imagen original se puede dibujar los límites del objeto.

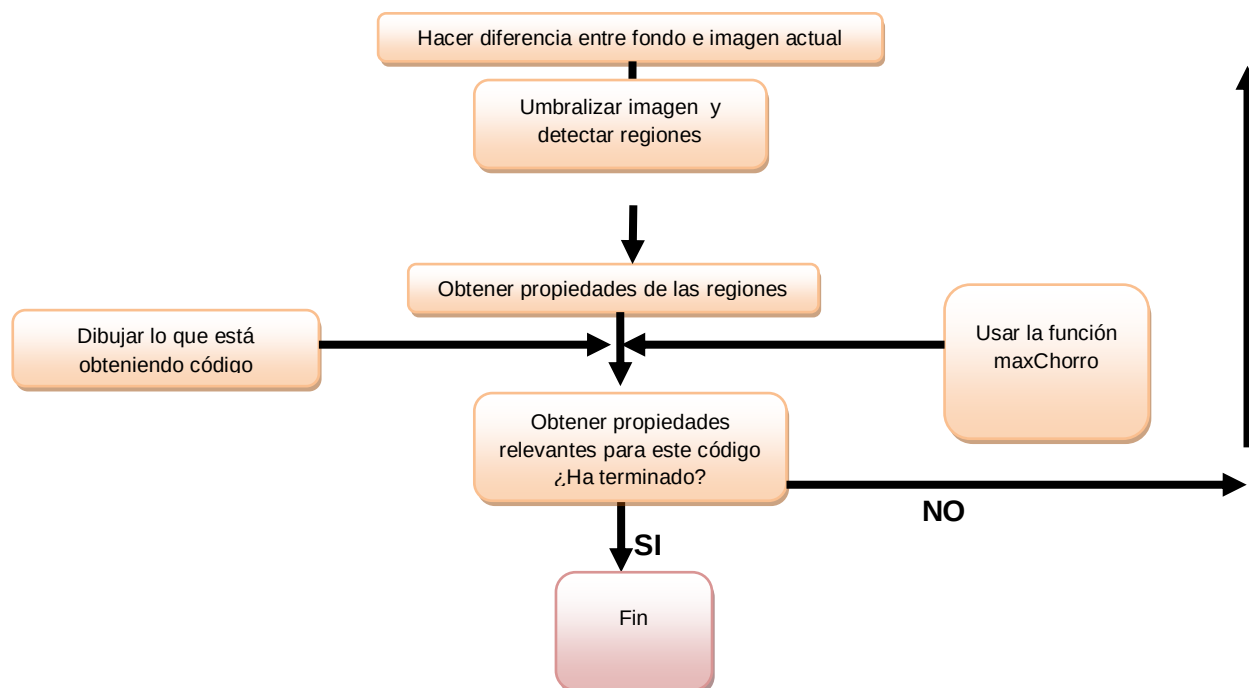
Como ejemplo se tiene un disco de 5mm de radio y el líquido es agua:

3.4. Código para obtener características del chorro

Con este código se pretende obtener del video todas las dimensiones de interés para su posterior evaluación, como se trata de un ensayo en con líquidos, los cuales son difícil de medir, lo que se va a hacer es obtener todas la dimensiones necesarias con el análisis de imágenes. Gracias a esta técnica se puede saber según el número de pixeles la distancia o longitud que se quiera conocer y una vez que se tiene como evoluciona esa medida con el tiempo se puede obtener, por medio de la derivada la velocidad de esta medida.

Este código se encuentra resumido en un diagrama de bloques donde se puede ver de forma gráfica como es el funcionamiento del código, además en el Anexo III también se puede encontrar el código realizado. En este apartado se va a hacer una descripción en detalle de las funciones utilizadas y para que se han utilizado.





Antes de ir con el código propiamente dicho se va a utilizar otro previamente, con el que se pretende obtener el factor de conversión de píxeles a milímetros ya que se conoce el radio del disco. En este código tiene como entrada el diámetro del disco en milímetros además del path donde se encuentra el video o imagen a analizar el cual se obtiene mediante la función “uigetfile”.

El siguiente paso es con la función “VideoReader” se va a abrir el video y mediante un ciclo while se va a ir pasando frame a frame y de estos se van a obtener las distintas características que se quiera, en este caso con un solo frame se puede obtener el factor de conversión que se está buscando, para ello con la función “readFrame” se guarda la imagen en una variable para posteriormente abrirla con la función “imshow”. Lo siguiente es que con la función “ginput” se puede pinchar en un punto de una gráfica en la que previamente se ha mostrado la imagen, con esto obtenemos la posición x e y que se quiera de la imagen y con esta información se puede coger la fila que sería la fila que corresponde al valor de y, y de esa fila se puede obtener cual es la longitud en píxeles que tiene el disco y como se conoce la longitud real se puede obtener el factor de conversión. Antes de obtener este factor

hay que pasar la imagen de 8 bits (valores entre 0 y 255) a una imagen con valores con formato double (valores entre 0 y 1). Una vez que se ha realizado este paso se busca un umbral para segmentar la imagen para esta poder bianrizarla.

Lo que se hace es que solo se binariza la fila que se ha seleccionado y los pixeles por debajo del umbral se van a poner a 1 y los demás a 0, gracias a esto solo con sumar los pixeles que estén a 1 se va a tener el número de pixeles. Por ultimo ya se tendría el factor de conversión:

$$FactorConversion = \frac{diámetro}{número\ pixeles} \quad (3.10)$$

Se puede dibujar sobre la imagen para que se vea claro que el código está haciendo lo que se le pide y es lo que se quiere que este haga.

Ahora ya si se puede seguir con el código, al igual que en el código para analizar la cavidad, para sacar el factor de conversión y el código para validar el ensayo tiene como entrada el path donde se encuentra el video o imagen a analizar el cual se obtiene mediante la función “uigetfile”.

El siguiente paso es con la función “VideoReader” se va a abrir el video, almacenándose en la estructura de datos con nombre “vidObj” y mediante un ciclo while se va a ir pasando frame a frame y de estos se van a obtener las distintas características que se quiera. Además se puede poner el punto en el que se quiere que empiece a ejecutar el video por si hay alguna parte que no es interesante para el estudio con “vidObjet.CurrentTime”.

Se van a definir una serie de variables que se utilizaran más adelante como son “frame_org” la cual se pone como un array vacío para posteriormente ir guardando los distintos frames que se leen y no perderlo cuando se le hagan las distintas operaciones a la imagen. La variable “fps” que corresponde al número de fps con el que se ha grabado el video y se va a utilizar para calcular el tiempo entre una imagen y otra. La variable “pixmm” que corresponde al factor de conversión anteriormente calculado. La variable “ind” que se trata de un indicador con el que se va a calcular los ciclos que se han ejecutado durante el while. Por último la variable “x e y” que servirán para una función posterior para hacer la segmentación de la

imagen por crecimiento de regiones y con esa posición de le dará la semilla además de a partir de la fila “y” hasta la parte superior de la imagen no se va a tener en cuenta para el análisis ya que se va a calcular la velocidad de bajada del disco como la de crecimiento de la cavidad que sería la misma.

Ya se puede pasar al ciclo while donde se va a ir iterando para ir pasando de frame a frame. Lo primero que se va a hacer en este ciclo es leer el frame con la función “readFrame”, hay algunos videos que en la parte inferior se encuentra una parte en la que hay información sobre el video y esa parte se quita buscando en la primera columna las filas cuyo pixel sea igual a 0 ya que es completamente negra esa parte una vez que se tiene la posición de las filas se puede dejar el frame como la parte de la imagen sin esa parte negra con información.

Mediante un condicional se puede quitar o no esta parte para que en caso de que la imagen no posea esta información deje el frame tal cual.

Lo siguiente que se hace es el preprocesamiento de la imagen antes de sacar información, toda esta parte se encuentra redactada en el apartado 3.1 de conceptos de análisis de imágenes donde se puede observar que apartados fueron útiles y cuáles no.

Lo primero que se va a hacer es durante el primer ciclo while es almacenar una imagen para utilizarla como fondo para que en posteriores ciclos esta se pueda restar a la imagen actual y con esto se obtiene solo lo que cambia en la imagen actual, esta operación se puede realizar con la función “imabsdiff” lo que facilita la posterior segmentación de la imagen ya que con este paso ya se están eliminando los defectos de iluminación y las gotas de previos ensayos, ya que estos son estáticos.

Como se ha mencionado anteriormente como la segmentación resulta ser más sencilla lo que se ha hecho es poner un umbral manualmente, sería una segmentación por umbralización. Se ha hecho de forma manual ya que se ha evaluado el histograma de la imagen resultante de la diferencia entre el frame actual y el que se utiliza como fondo. La función utilizada es “im2bw”.

Como complemento a esa umbralización se han eliminado los objetos demasiado pequeños que podrían detectarse, con el uso de la función “bwareaopen”, también se ha utilizado la función “imfill” para rellenar los posibles huecos que pueden presentar los objetos en este caso el chorro.

Una vez obtenida la imagen binaria se pasa a calcular las propiedades que presenta el objeto, para ello se utiliza la función “regionprops” a la que introduciéndole la imagen binaria y las características que se quieren obtener esta las devuelve como salida.

En este código aparece un problema con el que se pueden detectar más de un objeto. Para solventarlo lo que se ha hecho ha sido que si hay más de un objeto ordenar estos objetos por el área que estos presenten, para ello hay que pasar la estructura de datos que proporciona la función “regionprops” a un array de celdas para así poder ordenarla ya que las estructuras no pueden ordenarse con la función “struct2cell”, el siguiente paso es transponer ese array de celdas para así poder ordenar por filas de mayor a menor, cuando ordenamos se coge la fila en la que se encuentra el área para así poder ordenar los objetos de mayor a menor con la función “sortrows”. Una vez realizado este proceso se vuelve a pasar de array de celdas a estructura con la función “cell2struct”.

Si en este caso se quiere dibujar como es la forma que tiene el chorro se puede sacar los bordes a partir de cómo se explicó en el apartado 3.1.4 en la parte de segmentación por crecimiento de regiones. Lo que se hace es crear un elemento estructurante con forma de disco con la función “strel”, el siguiente paso es pasar ese elemento estructurante por la imagen binaria para hacer una erosión con la función “imerode” para en último lugar restar la imagen binaria menos la erosionada. El siguiente paso sería dibujarlas con la función “dibujarLineas” mediante la transformada de Hough como se explicó en el apartado 3.1.4 cuando se habló de esta.

Cuando se tienen algunas de las propiedades del objeto se pasa a sacar las que para este código son interesantes. Para este caso se va a utilizar la función “maxChorro” que es muy similar a “minCavidad”, la diferencia es que una busca un máximo y la otra un mínimo, esta función tiene como salidas el valor del diámetro

máximo que tiene el chorro, la fila donde se produce este máximo y los puntos de comienzo y fin de este diámetro máximo, todas estas salidas van a ser utilizadas posteriormente. Como entradas va a tener la imagen binarizada y las propiedades del objeto. El funcionamiento es que si no hay ningún objeto no va a haber propiedades por lo que todas las salidas van a valer 0, en caso de lo contrario de las propiedades se obtiene la fila donde comienza el objeto para después crear un vector con 0 para así ir rellenando los distintos diámetros del chorro por filas. Una vez obtenidos todos los diámetros se buscan cambios bruscos en los diámetros y con esto se puede saber dónde se pasa del chorro a la superficie libre para así poder determinar del vector de diámetros donde está el máximo, donde empieza y donde acaba.

Como para este caso se pretende ver cómo cambia el volumen, lo que se ha hecho es a partir del área se obtiene el volumen asumiendo que hay simetría axial. Ya que el área se podía obtener de la función “regionprops” de forma directa.

Como se ha dicho las variables de más importancia para este caso son la que calcula el diámetro máximo, la fila donde se encuentra y donde empieza y acaba ese máximo.

Cuando ya se tienen todas las propiedades sobre la imagen original se puede dibujar los límites del objeto.

Como ejemplo se tiene un disco de 5mm de radio y el líquido es agua:

4. RESULTADOS

Una vez que se tienen los códigos listos, el siguiente paso es extraer la información que se quiera de los ensayos realizados. Puesto que estos ya están listos para obtener la información necesaria de las imágenes obtenidas en los ensayos.

El procedimiento seguido en los ensayos es el siguiente: se obtiene el factor de conversión para pasar de pixel a milímetros y de ahí se pasa a cambiar otras variables como son el número de fps al que ha grabado la cámara y el tiempo del video en el que empieza lo que se quiere analizar. Una vez que se ha cambiado estos parámetros se pasa a usar el código de obtener los datos de la cavidad o para obtener los datos del chorro, según la parte del ensayo que se esté analizando.

Por último lo que hace es representar y extraer los datos que se iban persiguiendo.

En este apartado solo se van a ilustrar solo un caso para el cierre de la cavidad y otro para el desarrollo del chorro, los demás ensayos se van a ilustrar en el Anexo IX.

4.1. Cierre de la cavidad

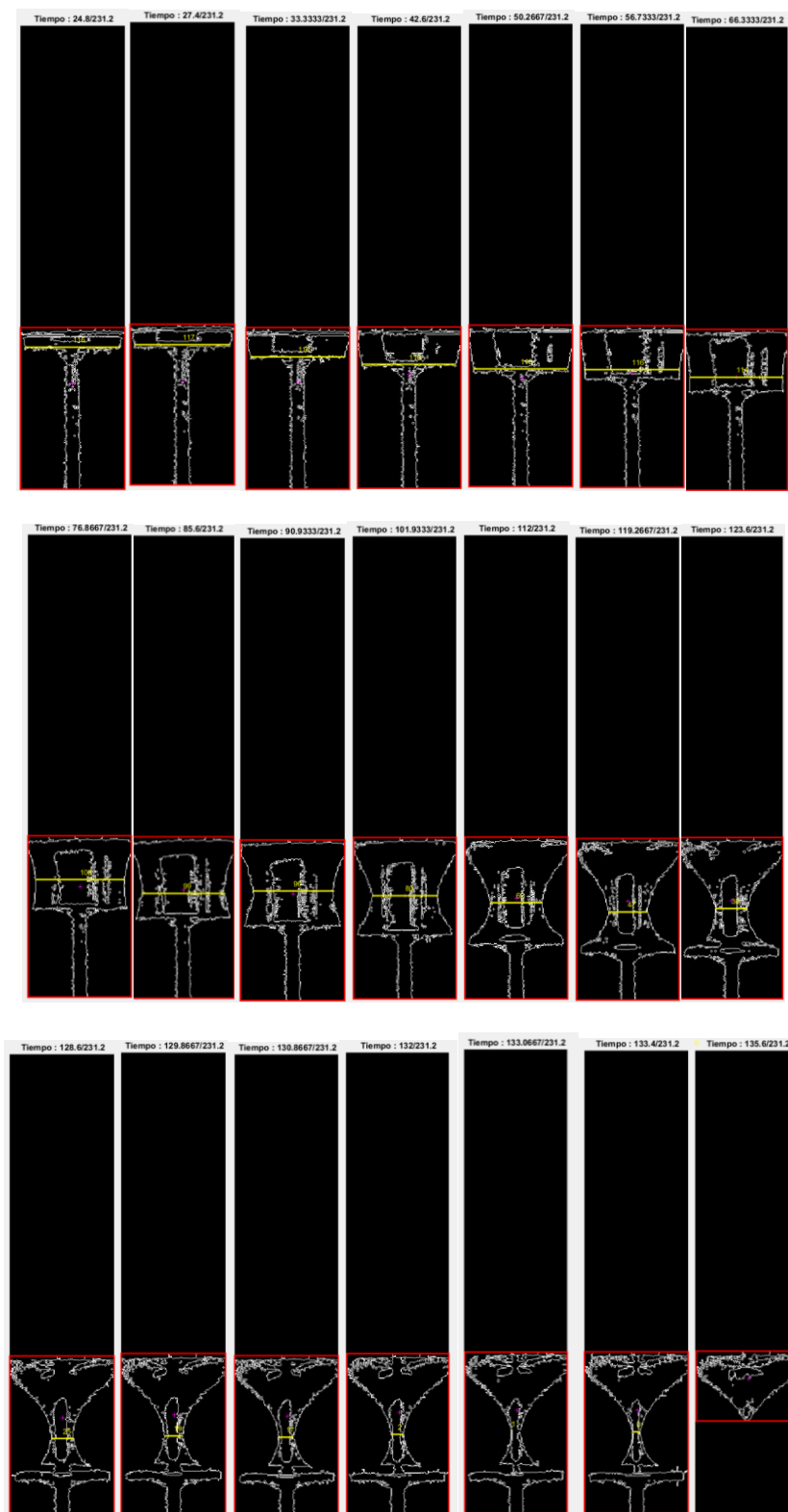


Ilustración 4.1 Ejemplo cierre cavidad con imagen binarizada

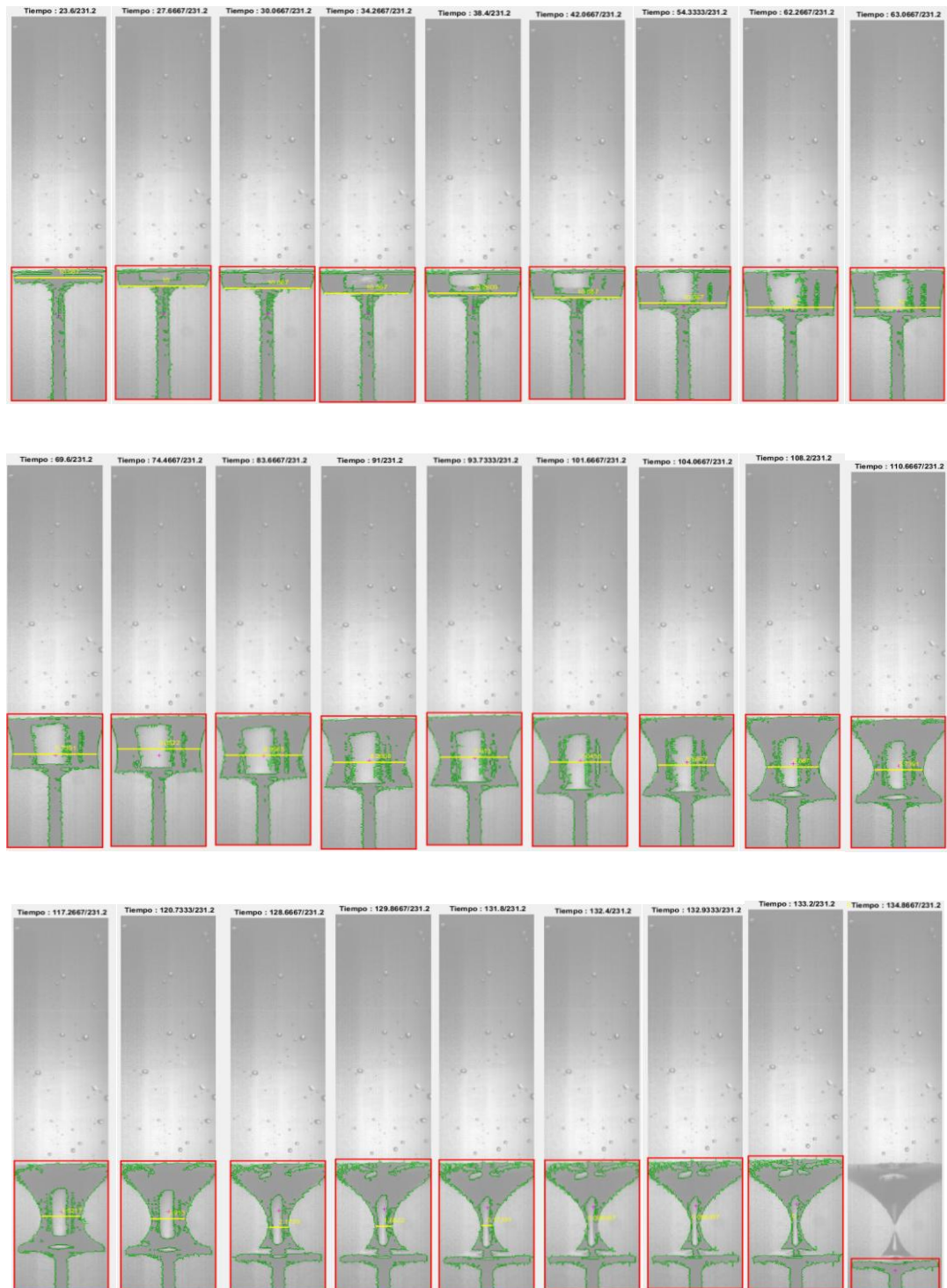


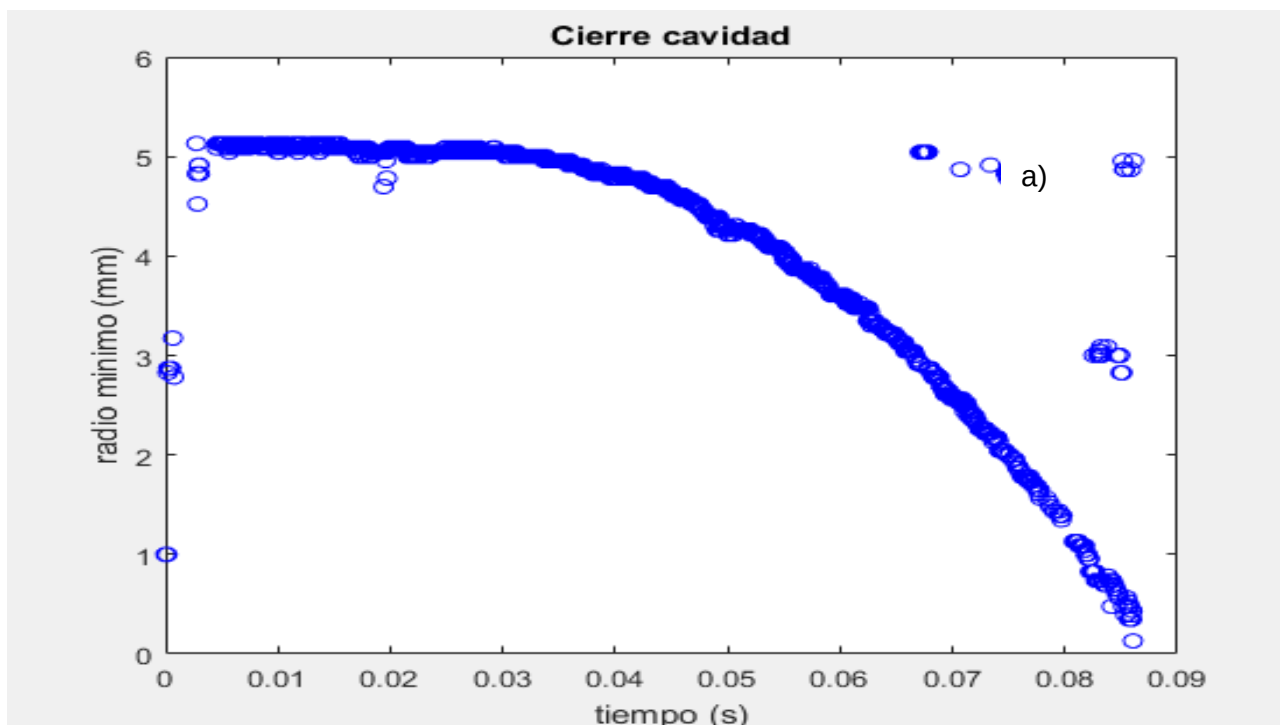
Ilustración 4.2 Ejemplo cierre cavidad con imagen original

Como se puede observar en las ilustraciones anteriores para el cierre de la cavidad, se ve como al principio el radio mínimo de la cavidad coincide con el del disco del ensayo y este dependiendo del Re (el cual a su vez depende de la velocidad del impacto y de las propiedades del fluido) va hacer que esto suceda más tiempo o menos como ahora se observara en los resultados de los ensayos y a partir de este momento la cavidad empieza a cerrarse por el centro de esta y es ahí donde se encuentra el radio mínimo como se ve en las imágenes anteriores.

En este apartado el código realizado se centra en localizar donde se encuentra este radio mínimo y cómo evoluciona este hasta su colapso para estudiar su dinámica. Para ello, se estudia cómo evoluciona la distancia radial y la axial (profundidad) del radio mínimo.

Los datos de cada ensayo se pueden encontrar en las tablas 2.2 Parámetros según el ensayo y 2.7 Valores de Re y Fr según el ensayo.

Las gráficas obtenidas para ensayo son las siguientes:



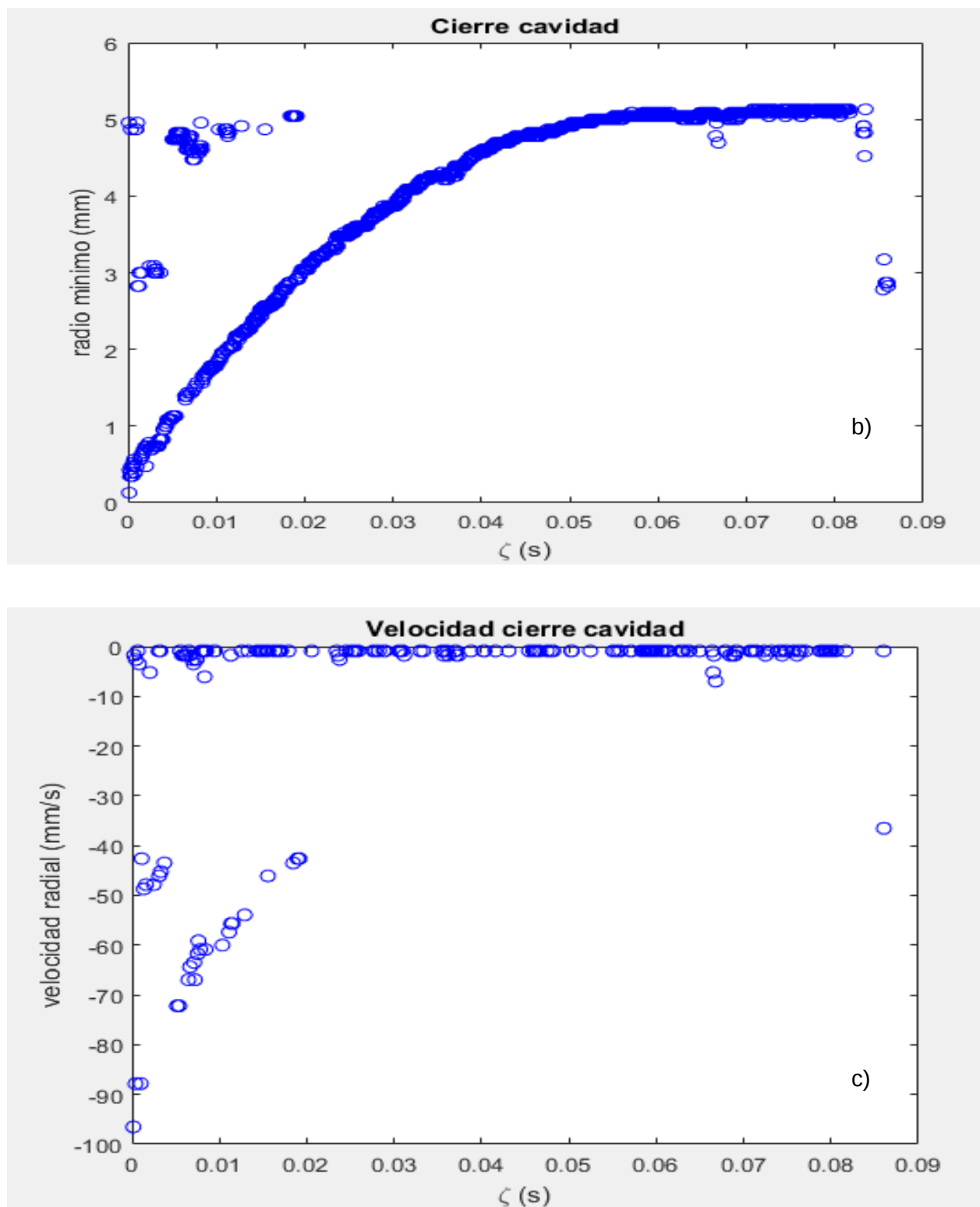


Ilustración 4.3 Ensayo 1, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

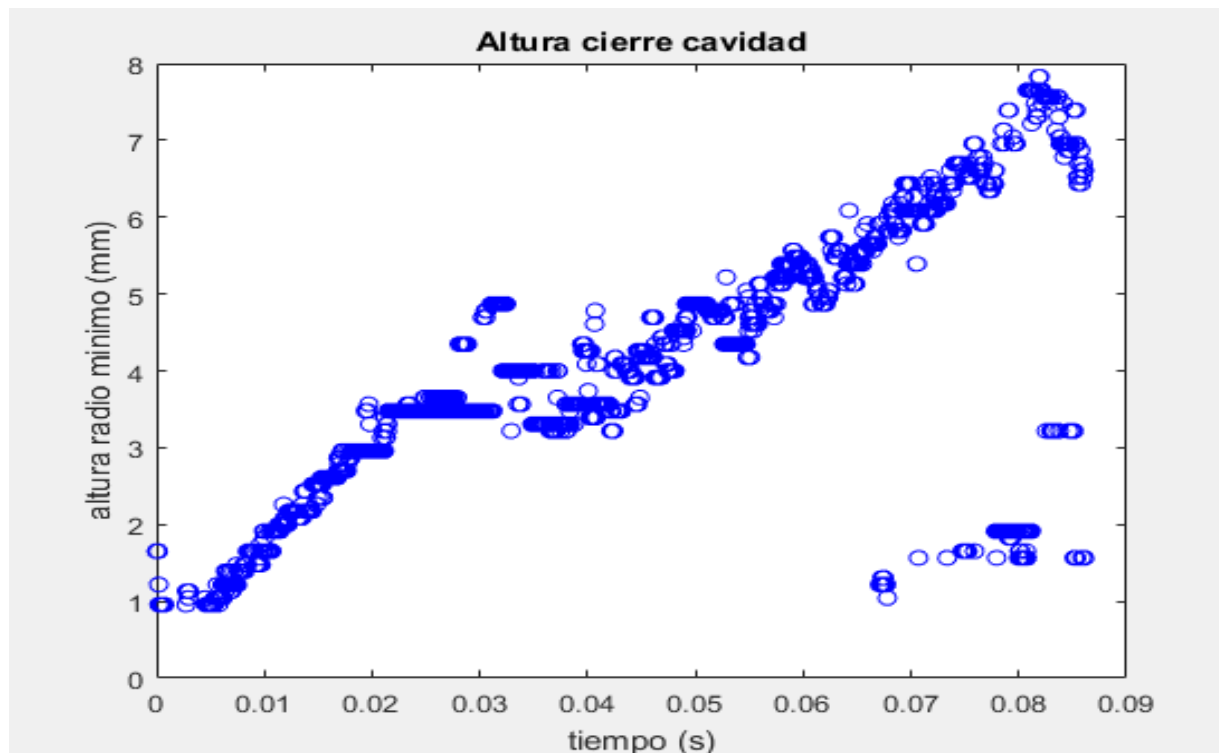
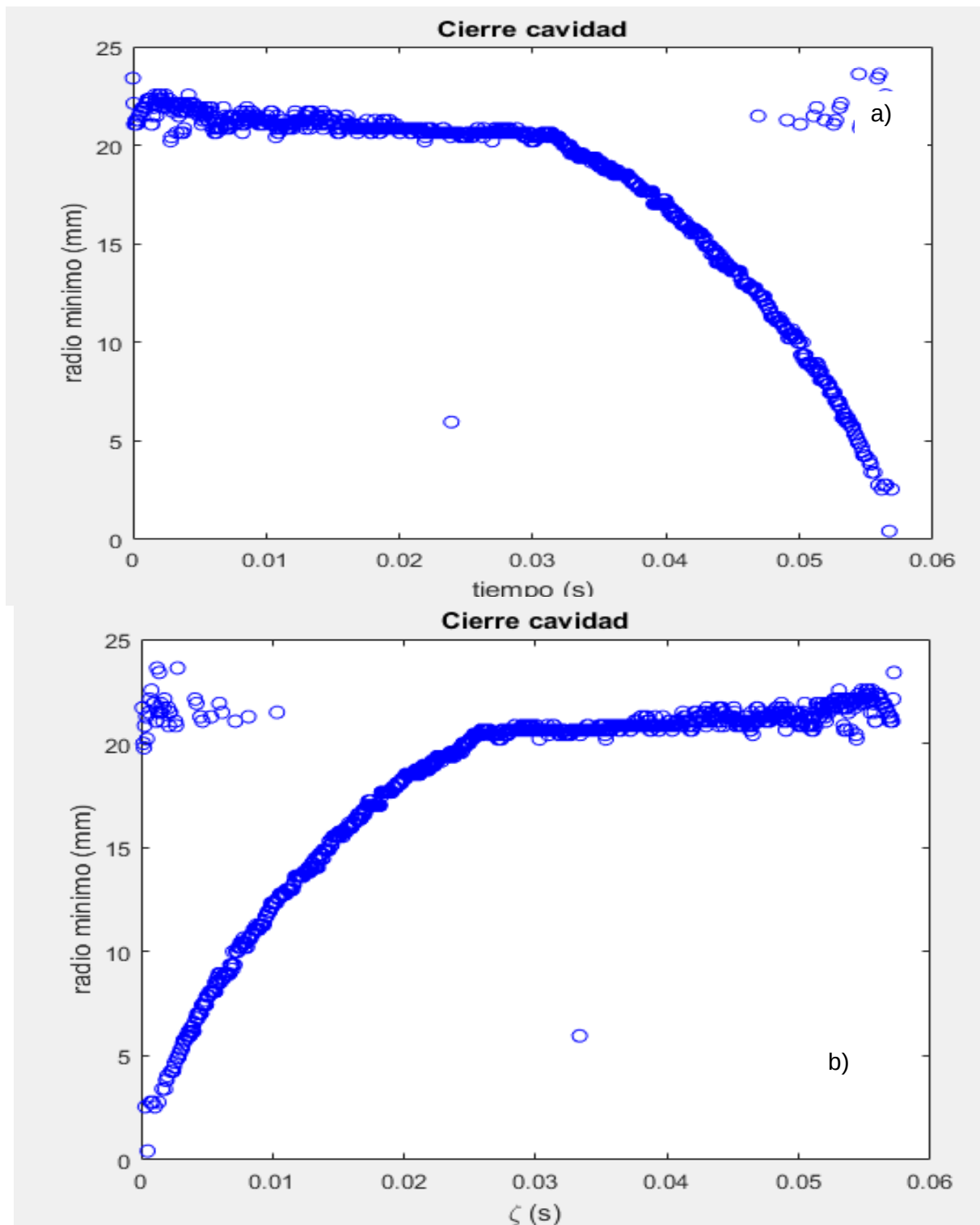


Ilustración 4.4 Ensayo 1 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.



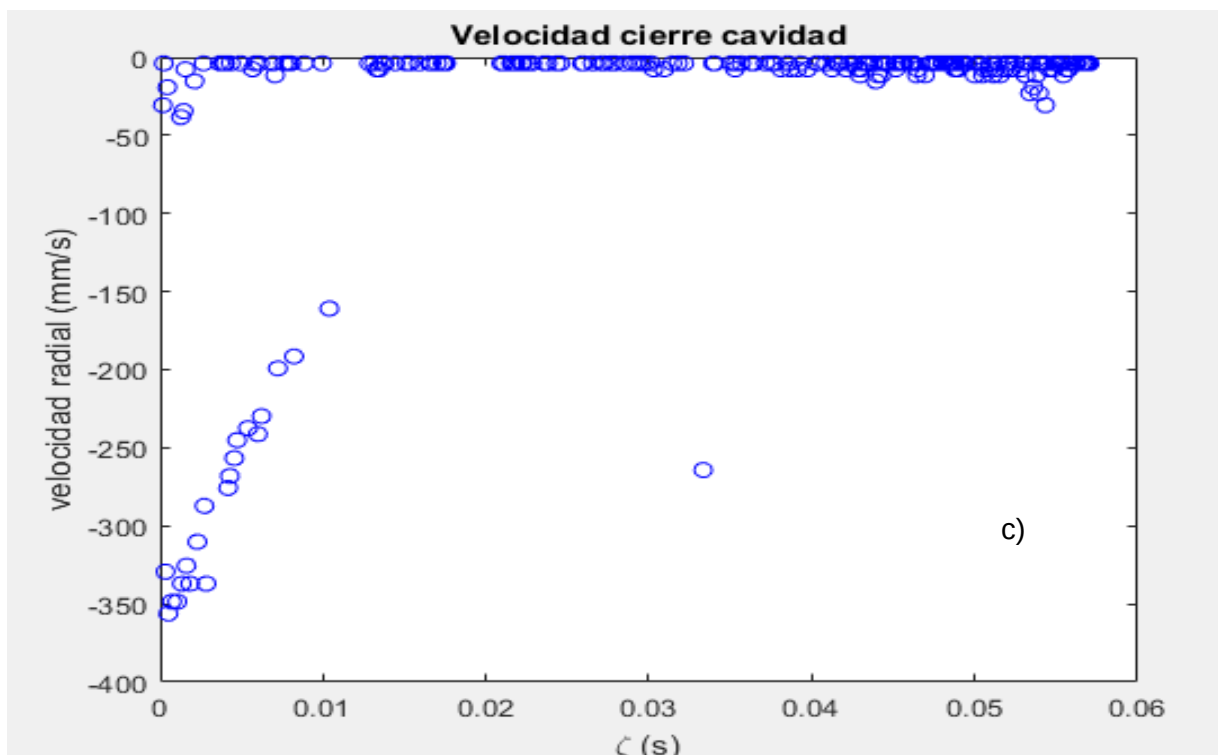


Ilustración 4.5 Ensayo 23, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

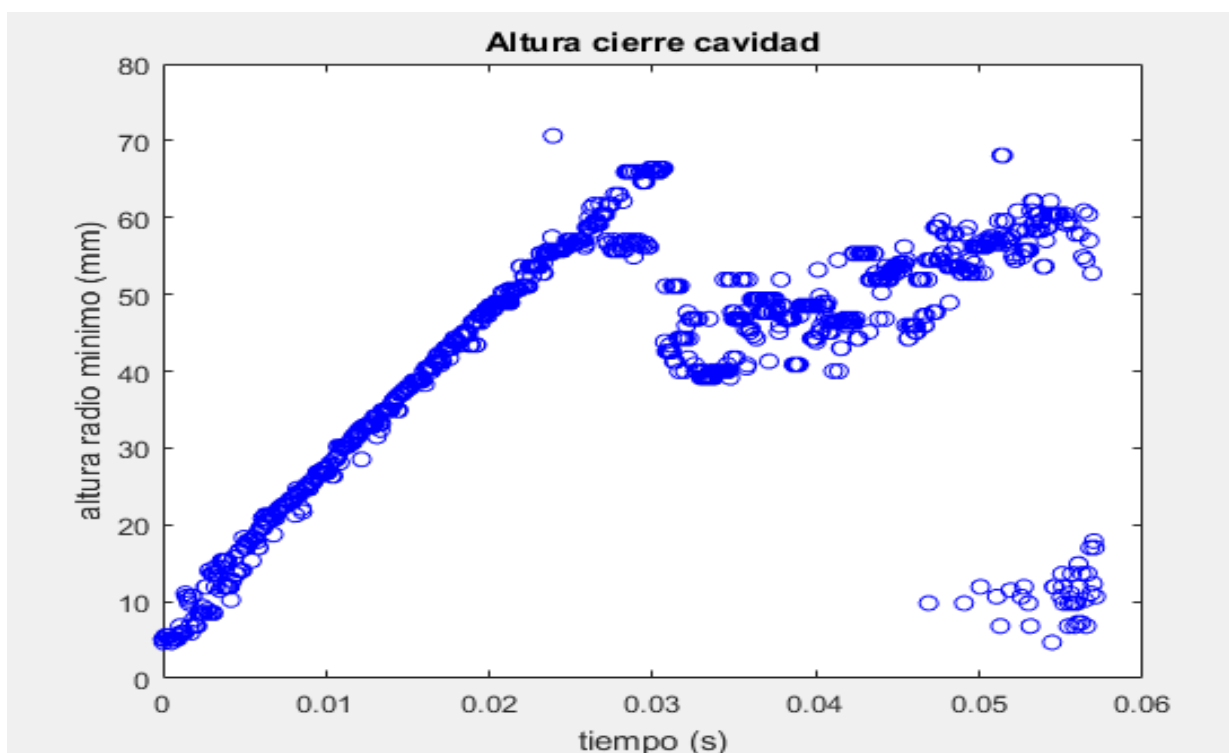


Ilustración 4.6 Ensayo 23 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

Cuando se grafica el radio mínimo (R) de la cavidad frente a τ donde:

$$\tau = t_c - t \quad (4.1)$$

Este tiempo hasta el colapso es lo que habitualmente se usa en la literatura consultada sobre este tema.

Cuando se está tratando de obtener dimensiones del análisis de imágenes se han encontrado problemas como que al pasar de un frame a otro cambia de tamaño y ya no se puede obtener bien las características como por ejemplo en el ensayo 21.

Otra dificultad con la que hay que lidiar es la oscuridad de la imágenes lo que hace que los radios medidos sean más grandes que el real ya que coge ruido de la oscuridad sobre todo cuando va a colapsar la cavidad, como se puede observar en el ensayo 23 por ejemplo.

También hay videos en los que se corta la cavidad y no se sabe dónde está el mínimo ni cuando colapsa esta.

Estos problemas hacen que al intentar ajustar las curvas en muchas ocasiones no sea posible obtener el mejor de los resultados a pesar de haber tratado de eliminar el máximo de ruido posible.

Como se puede observar en todos estos ensayos cuando se grafica el radio frente al tiempo o frente a τ (la única diferencia que es el eje abscisas va en un sentido u otro), al principio todos los casos van manteniendo el radio mínimo de la cavidad más o menos constante hasta instantes antes de colapsar, donde se puede observar en estas graficas como el radio disminuye drásticamente. Se puede ver claramente como en los casos anteriores la viscosidad hace que se acelere este tiempo de colapso un poco. Si se comparan los dos casos de las ilustraciones anteriores se ve como para el caso del ensayo 1 que es agua el tiempo de colapso es un poco mayor que para el caso del ensayo 23 donde el líquido es glicerina y es más viscoso, aquí se puede ver que para el ensayo 1 la velocidad de impacto es de 0.5 m/s y para el 23 es de 1m/s (aunque el número Fr es el mismo para ambos

casos), si se evaluase dos ensayos con la misma velocidad de impacto se vería como

como la viscosidad tiende a retrasar el colapso de la cavidad.

En cuanto a la curva de la altura donde se produce el radio mínimo se tienen dos tipos de gráficas. Por un lado esta cuando el ensayo se realiza a velocidades bajas (estas velocidades influyen en Re y Fr) en el que se tiene una curva con tendencia lineal, como por ejemplo el ensayo 1 y por otro lado cuando las velocidades de impacto son mayores el radio mínimo va coincidiendo con el del disco hasta que llega un momento en el que la columna de aire que se forma en el impacto empieza a ceder y empieza a estrecharse por el centro hasta que colapsa por eso se ve que tiene una tendencia lineal hasta que hay un salto en la gráfica, como por ejemplo 23. Todo esto se puede deber al Re el cual está relacionado de forma directa por la velocidad y según sea este alto o bajo se puede tener una gráfica u otra. Si se vuelve a comparar los casos de las ilustraciones anteriores se puede observar como el líquido más viscoso tiende a que el radio mínimo de la cavidad de aire se de en alturas por debajo de la altura libre del agua más altas que para el líquido menos viscoso.

Los resultados más relevantes se muestran en la siguiente tabla:

Ensayo	t_c (s)	Altura colapso(mm)
1	0.0858	8.1739
2	0.0515	17.6289
3	-	-
4	0.0665	35.2941
5	0.0863	23.2759
6	-	-
7	-	-
8	0.0523	54.9474
9	0.053	36.2105
10	0.0863	15.6522
11	-	-
12	-	-
13	-	-
14	0.0957	30.9565
15	-	-
16	0.0913	19.6875
17	-	-
18	0.0596	36.63
19	0.055	64.6316
20	0.0564	80.2151
21	0.0574	57.0213
22	0.0941	31.3043
23	0.0582	74.4681
24	-	-

Tabla 4.1 Tabla resultados ensayos para la cavidad

4.2. Chorro de Worthington

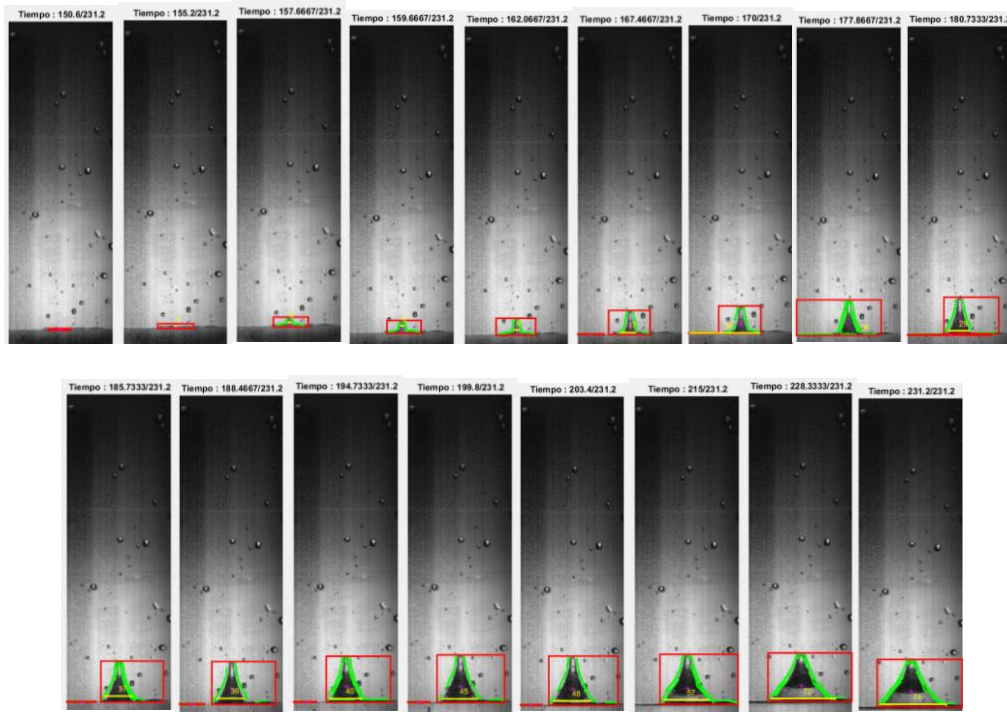
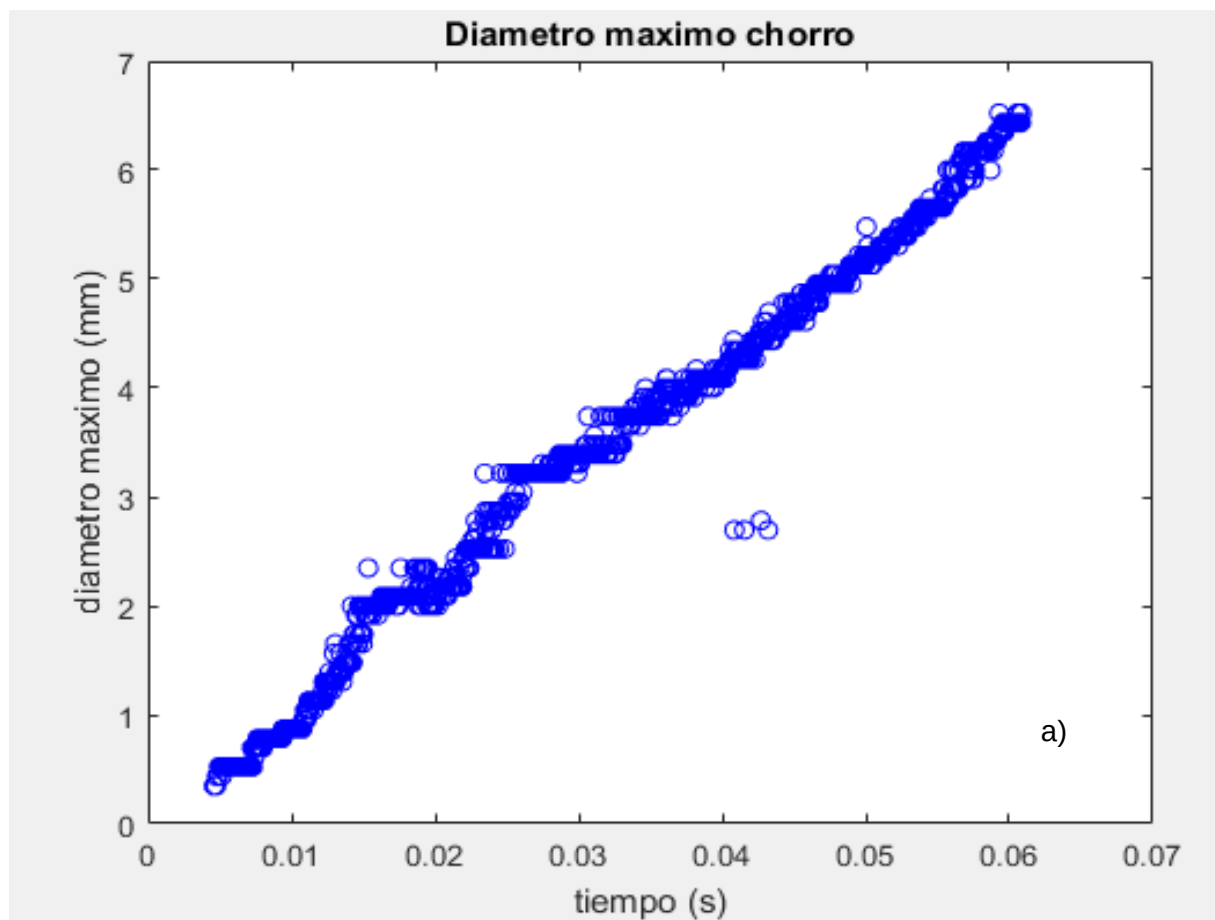


Ilustración 4.7 Ejemplo crecimiento chorro con imagen original

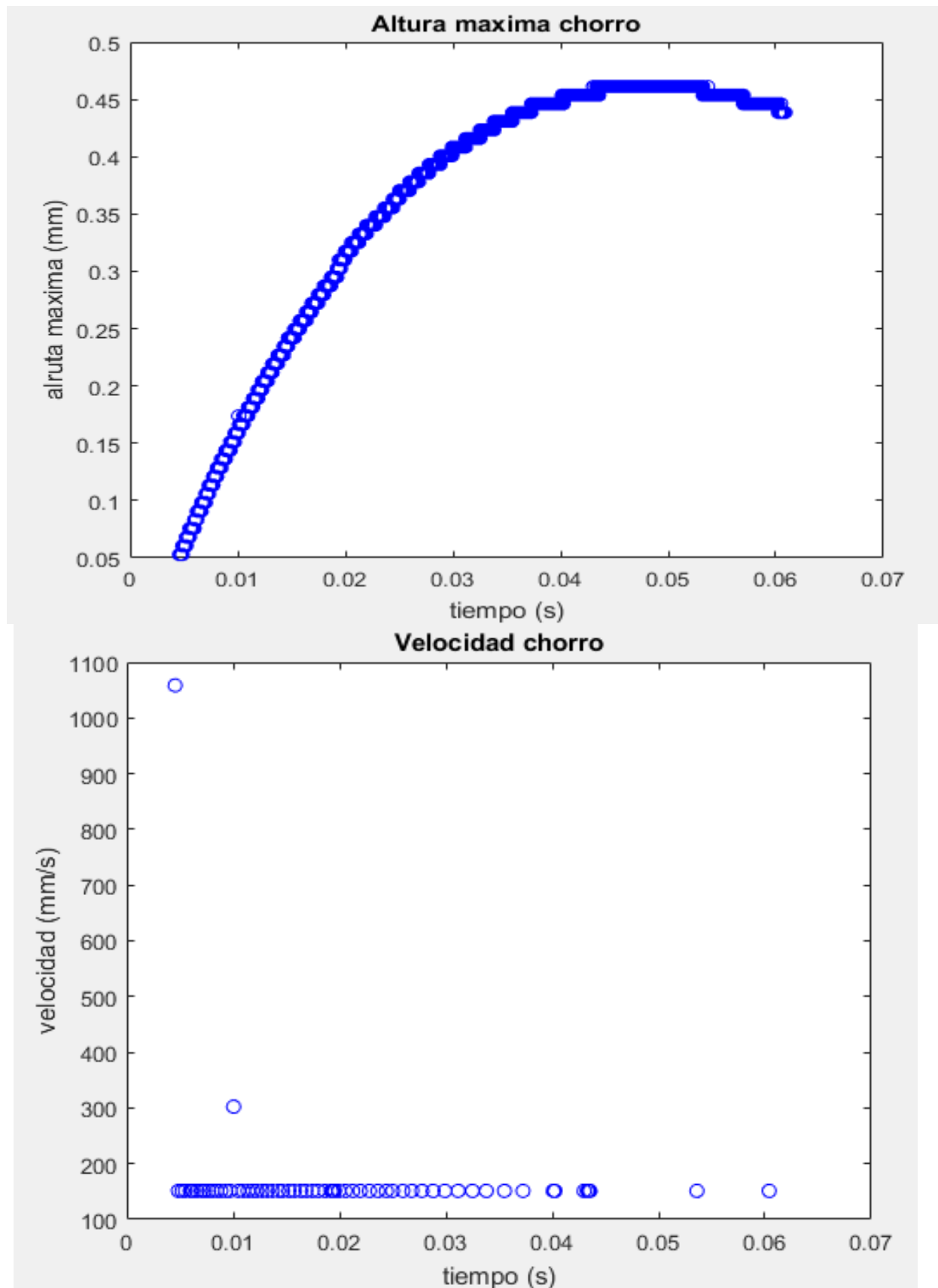
En la ilustración 4.7 se puede ver cómo tras cerrarse la cavidad se produce un chorro, cuyo desarrollo al principio es muy rápido y luego este se estabiliza como luego se verá en la gráfica de la velocidad del chorro, en la que al principio la velocidad es muy alta y luego tiende a ser constante, a no ser que haya desprendimiento de gotas que hacen que también haya cambios en la velocidad como luego se verá, también en otros casos se puede observar cómo se van expulsando gotas del chorro las cuales luego se pueden observar en las gráficas del volumen y altura del chorro ya que se notan discontinuidades en estas.

Los datos de cada ensayo se pueden encontrar en las tablas 2.2 Parámetros según el ensayo y 2.7 Valores de Re y Fr según el ensayo.

Las gráficas obtenidas para ensayo son las siguientes:



b)



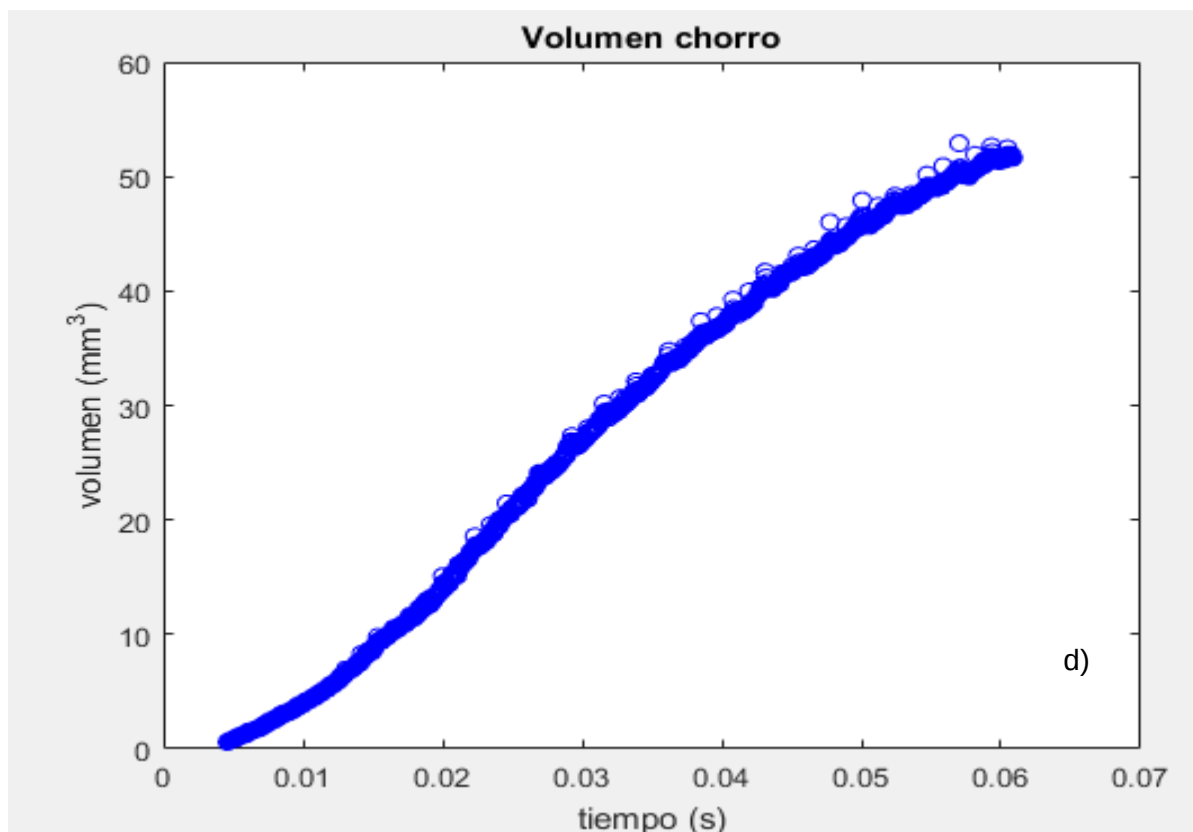
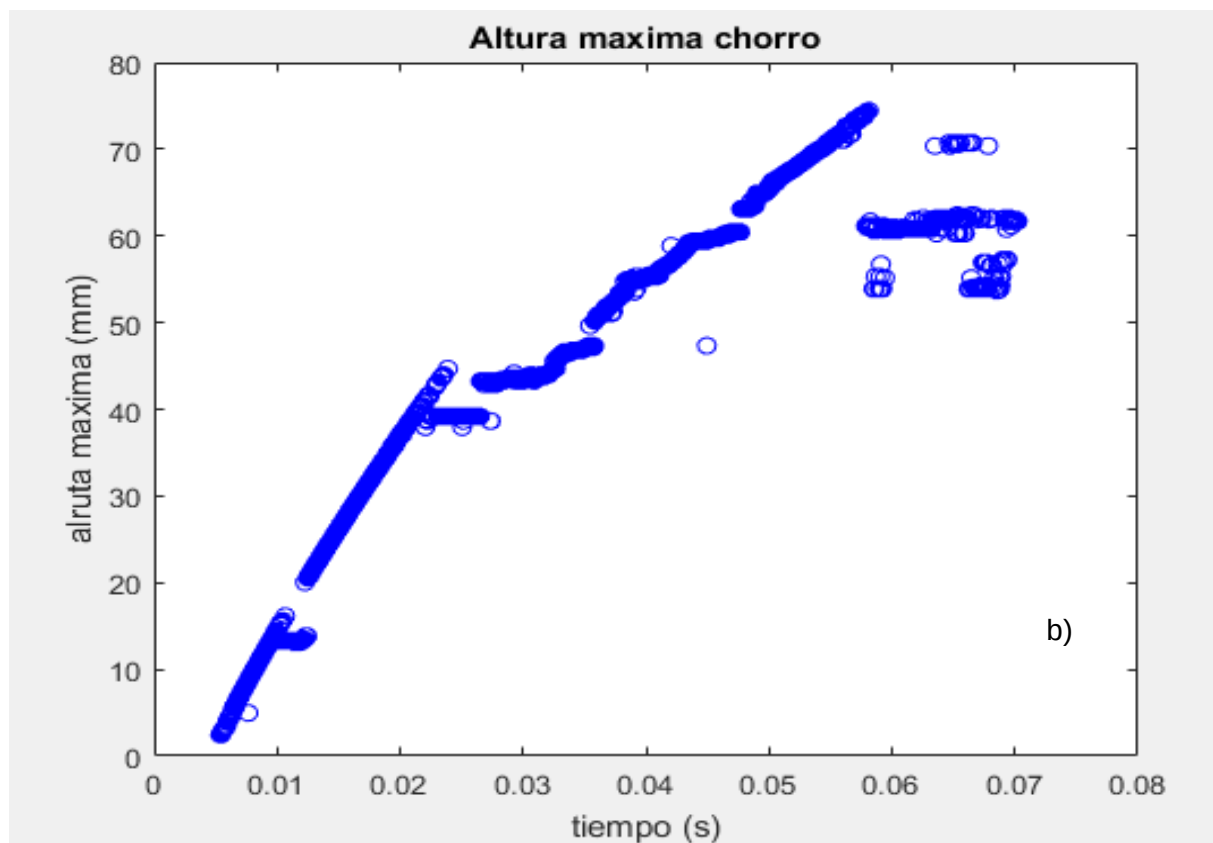
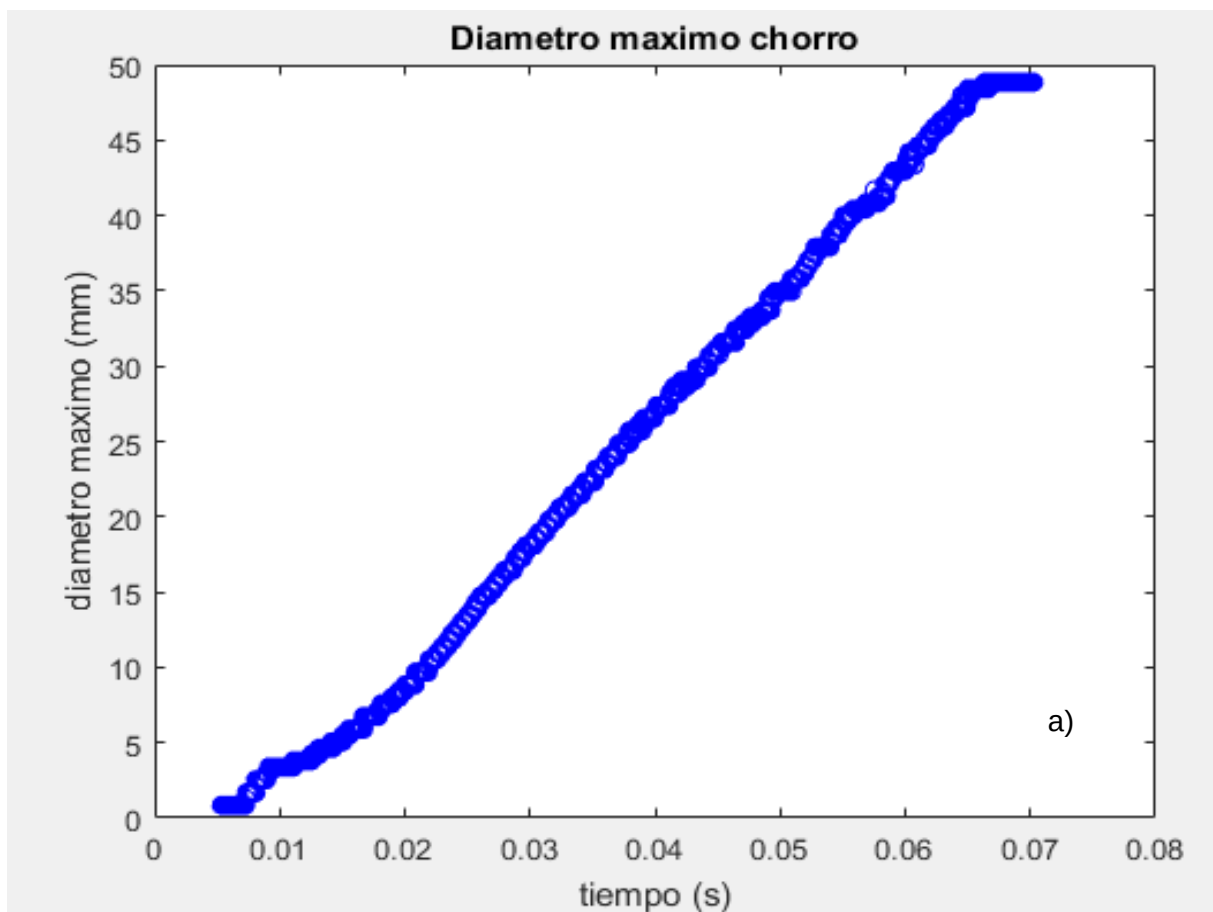


Ilustración 4.8 Ensayo 1, a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.



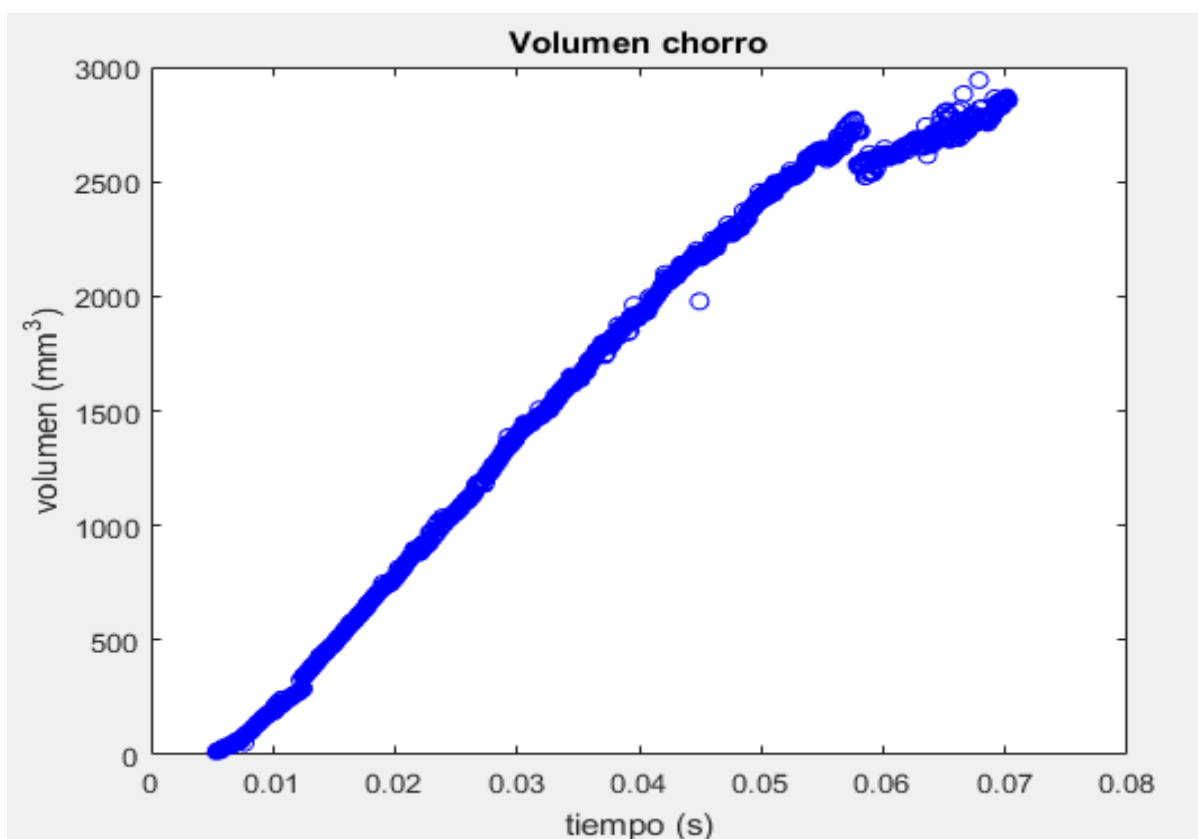
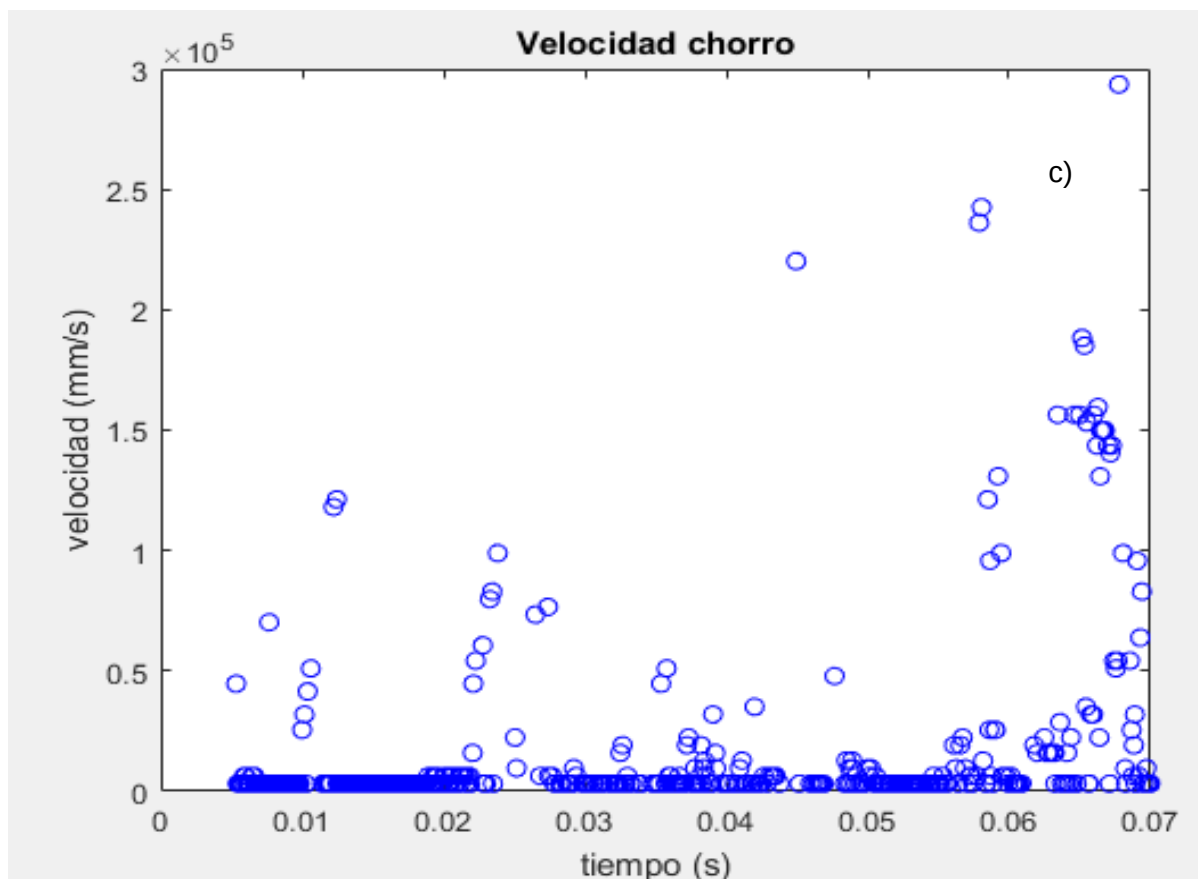


Ilustración 4.9 Ensayo 24 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

Cuando se grafica el diámetro (o radio) mayor del chorro se puede observar que en casi todos los casos suele tener una tendencia lineal. Se puede ver como cuando el líquido es más viscoso la altura del chorro es mucho mayor pero el diámetro mayor de este es menor.

Para el caso de que se represente la altura del chorro frente al tiempo tiene una forma de parábola negativa en la que al principio crece rápido el chorro luego permanece casi constante hasta que otra vez vuelve a bajar. En este tipo de graficas hay dos variantes, por un lado las que no desprenden gotas de agua el chorro como ejemplo el ensayo 1 y por otro lado están las que si van soltando gotas de agua como es el caso del ensayo 4. Y como se puede observar para el ensayo 1 la altura es mucho menor que para el caso del ensayo 23 el cual es líquido viscoso, por lo que se puede decir que la viscosidad hace que la altura del chorro sea más grande.

Cuando se deriva la curva anterior se obtiene la velocidad del chorro en la que normalmente el máximo se encuentra al principio de la gráfica ya que es cuando más deprisa crece, pero esto también depende de si el chorro suelta gotas o no por que puede haber cambios bruscos de velocidad que hagan que este máximo no se produzca al principio. Aquí también se pueden observar velocidades más grandes en el ensayo 23 para el líquido viscoso que para el caso del agua en el ensayo 1.

Por último, para el caso del volumen suele tener una tendencia parabólica negativa como ocurría con la altura máxima. En este caso se pueden apreciar dos tipos de gráficas que al igual que antes por un lado esta si se desprenden gotas del chorro o si por el contrario no lo hacen, que se desprendan gotas hace que haya saltos en la gráfica del volumen. Para el ensayo 23 el volumen es mayor en comparación con el ensayo 1 ya que la altura es mucho mayor lo que hace que esto ocurra, puesto que los diámetros de los líquidos menos viscosos son mayores y su altura es menor al contrario que ocurre con los líquidos más viscosos.

Los resultados más relevantes se muestran en la siguiente tabla:

Ensayo	Altura máxima chorro(mm)	Velocidad máxima chorro(m/s)	Volumen (mm ³)
1	0.4688	0.907	54.8977
2	2.0831	14.454	55.0922
3	25.6627	104.250	833.024
4	24.4152	57.101	1106
5	4.2137	9.3639	507.24
6	58.8542	159.720	1953.1
7	81.4776	557.230	3546.1
8	9.2742	17.950	462.7279
9	4.7852	20.508	153.3214
10	1.8752	4.234	214.4053
11	12.4023	50.781	394.8467
12	10.5166	40.1064	438.4699
13	49.6094	203.91	1579.4
14	7.38	15.244	829.713
15	40.6009	121.2	1770.5
16	19.9402	85.034	1196.3
17	22.1375	73.169	1572
18	-	-	-
19	11.007	39.958	142.9681
20	8.559	41.623	97.6367
21	10.5025	46.446	133.962
22	7.38	15.244	846.4365
23	-	-	-
24	45.385	236.14	1382.4

Tabla 4.2 Tabla resultados ensayos para el desarrollo del chorro

4.3. Análisis de resultados: efecto de los parámetros.

Para concluir con este apartado de resultados se van a comparar todos los experimentos de forma adimensional.

Ensayo	Tipo	h_0 (mm)	v (m/s)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/sm)	σ (kg/s ²)	Re	Fr	t_c (s)	Altura colapso (mm)	Altura max chorro (mm)	Velocidad max chorro (m/s)	Volumen (mm ³)
1	Agua	5	0.5	997	0.001	0.07275	2492,5	5,097	0.0858	8.1739	0.4688	0.907	54.8977
2	Agua	5	1	997	0.001	0.07275	4985	20,38	0.0515	17.6289	2.0831	14.454	55.0922
3	Agua	15	0.25	997	0.001	0.07275	3738,75	0,425	-	-	25.6627	104.250	833.024
4	Agua	15	0.37 5	997	0.001	0.07275	5608,125	0,956	0.0665	35.2941	24.4152	57.101	1106
5	Agua	15	0.5	997	0.001	0.07275	7477,5	1,699	0.0863	23.2759	4.2137	9.3639	507.24
6	Agua	15	0.62 5	997	0.001	0.07275	9346,875	2,655	-	-	58.8542	159.720	1953.1
7	Agua	15	0.75	997	0.001	0.07275	11216,25	3,823	-	-	81.4776	557.230	3546.1
8	Agua	15	1	997	0.001	0.07275	14955	6,796	0.0523	54.9474	9.2742	17.950	462.7279
9	Agua	10	1	997	0.001	0.07275	9970	10,19	0.053	36.2105	4.7852	20.508	153.3214
10	Agua	10	0.5	997	0.001	0.07275	4985	2,548	0.0863	15.6522	1.8752	4.234	214.4053
11	Agua	10	0.25	997	0.001	0.07275	2492,5	0,637	-	-	12.4023	50.781	394.8467
12	Agua	10	0.37 5	997	0.001	0.07275	3738,75	1,433	-	-	10.5166	40.1064	438.4699
13	Agua	20	0.25	997	0.001	0.07275	4985	0,319	-	-	49.6094	203.91	1579.4
14	Agua	20	0.5	997	0.001	0.07275	9970	1,274	0.0957	30.9565	7.38	15.244	829.713
15	Agua	20	0.37 5	997	0.001	0.07275	7477,5	0,717	-	-	40.6009	121.2	1770.5
16	60% Glicerina	15	0.3	1153.8	0.0108	0.06764	480,75	0,612	0.0913	19.6875	19.9402	85.034	1196.3
17	60% Glicerina	15	0.37 5	1153.8	0.0108	0.06764	600,9375	0,956	-	-	22.1375	73.169	1572
18	Glicerina	10	1	1261.0 8	1.41	0.0634	8,94383	10,19	0.0596	36.63	-	-	-
19	Glicerina	10	1.5	1261.0	1.41	0.0634	13,41574	22,93	0.055	64.6316	11.007	39.958	142.9681

	rina			8									
20	Glice rina	10	2	1261.0 8	1.41	0.0634	17,88766	40,77	0.0564	80.2151	8.559	41.623	97.6367
21	Glice rina	10	3	1261.0 8	1.41	0.0634	26,83149	91,74	0.0574	57.0213	10.5025	46.446	133.962
22	Glice rina	20	0.5	1261.0 8	1.41	0.0634	8,94383	1,274	0.0941	31.3043	7.38	15.244	846.4365
23	Glice rina	20	1	1261.0 8	1.41	0.0634	17,88766	5,097	0.0582	74.4681	-	-	-
24	Glice rina	20	1	1261.0 8	1.41	0.0634	35,77532	20,38	-	-	45.385	236.14	1382.4

Tabla 4.3 Tabla resumen ensayos

4.3.1. Cierre de la cavidad

Se empezara representando el tiempo de colapso frente al Re, para adimensionalizar el tiempo se hará uso de la velocidad y radio del disco, puesto que son los parámetros que se usaron para el análisis dimensional. Y luego también se representaran frente a Fr.

Se va a definir el tiempo adimensional como:

$$T_c = \frac{t_c * v}{h_0} \quad (4.2)$$

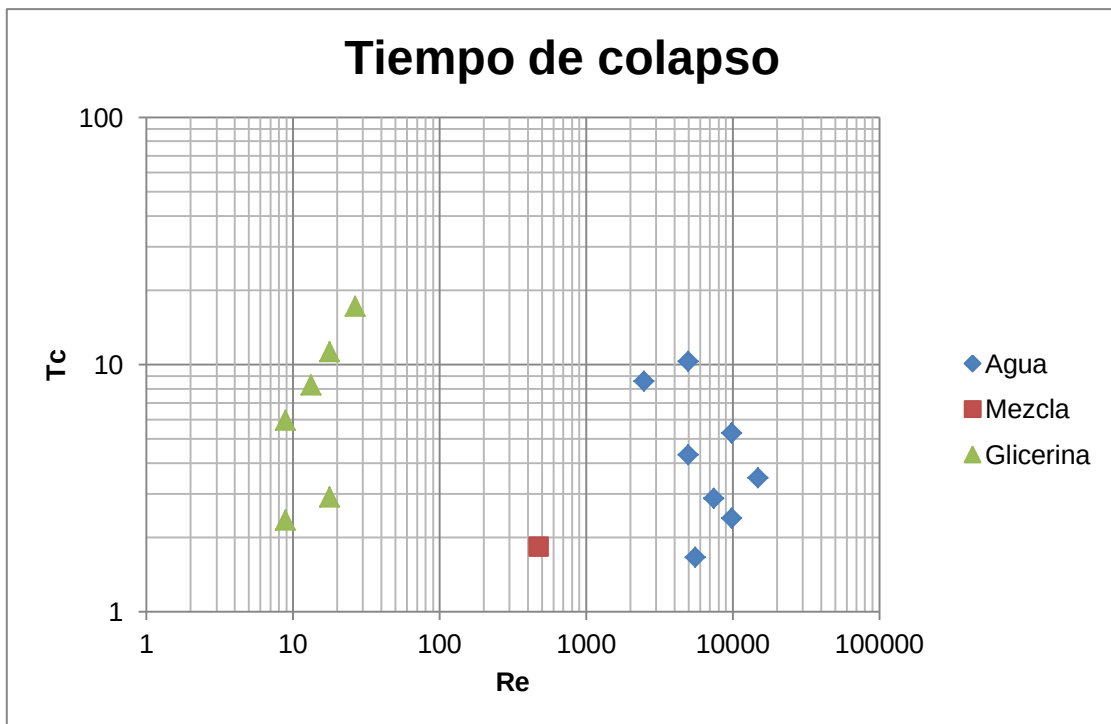


Ilustración 4.10 Tiempo de colapso adimensional frente al Re

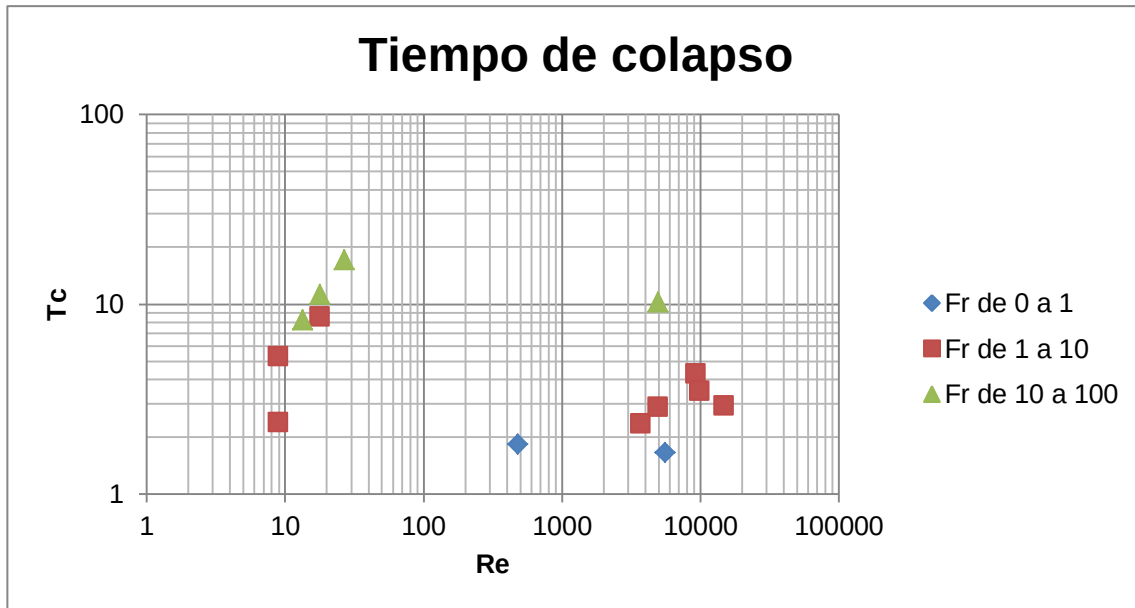


Ilustración 4.11 Tiempo de colapso adimensional frente al Re

Se observa que el tiempo de colapso frente a Re se ve como cuando este es pequeño los tiempos de colapso son mayores ya que con Re más altos estos tiempos son menores. También se puede observar como el efecto de la viscosidad trata de retrasar el colapso de la cavidad, ya que si se gráfica el tiempo de colapso en función del Re pero a Fr más o menos similares se ve como no se sigue una tendencia debido a que interviene la viscosidad.

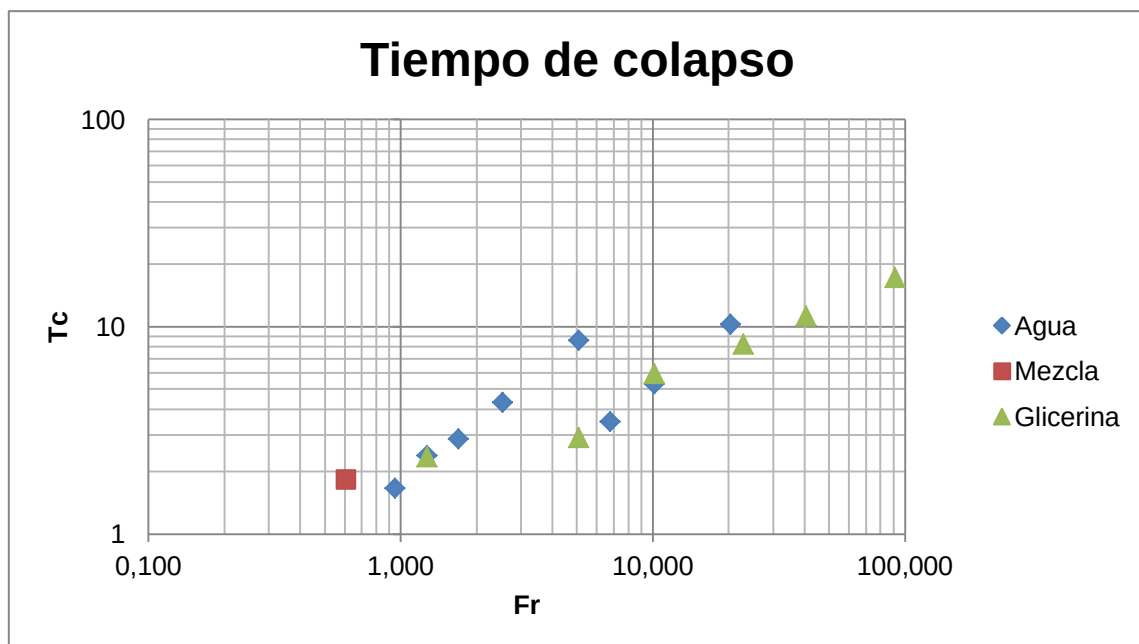


Ilustración 4.12 Tiempo de colapso adimensional frente al Fr

En cambio si se analiza frente al Fr se ve como si hay una tendencia a que cuando el Fr es más alto el tiempo de colapso es mayor y al contrario, cuando Fr es menor el tiempo colapso es menor. Se podría decir que el efecto de la gravedad acelera el colapso de la cavidad, como se ha visto en trabajos anteriores.

Y por último la profundidad frente al Re , para adimensionalizar la profundidad se hará uso del radio del disco por los mismos motivos que se han comentado anteriormente. Y luego también se representará frente a Fr .

La profundidad adimensional se define como:

$$Profundidad = \frac{\text{Altura máxima de colapso}}{h_0} \quad (4.3)$$

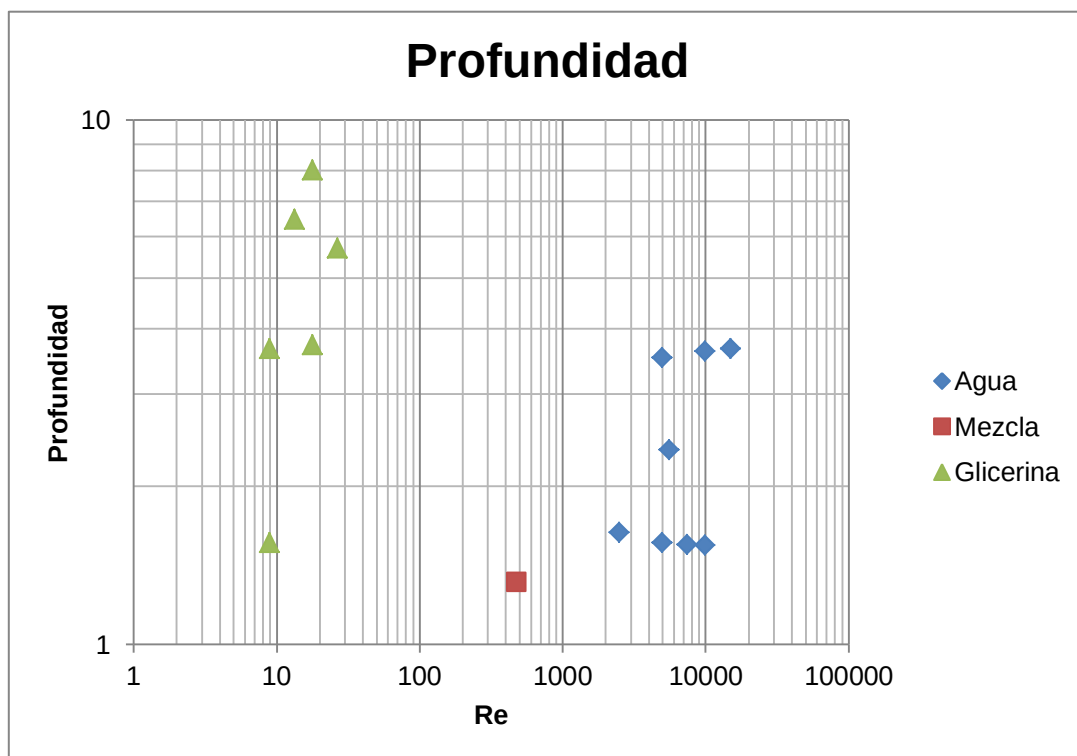


Ilustración 4.13 Profundidad adimensional frente al Re

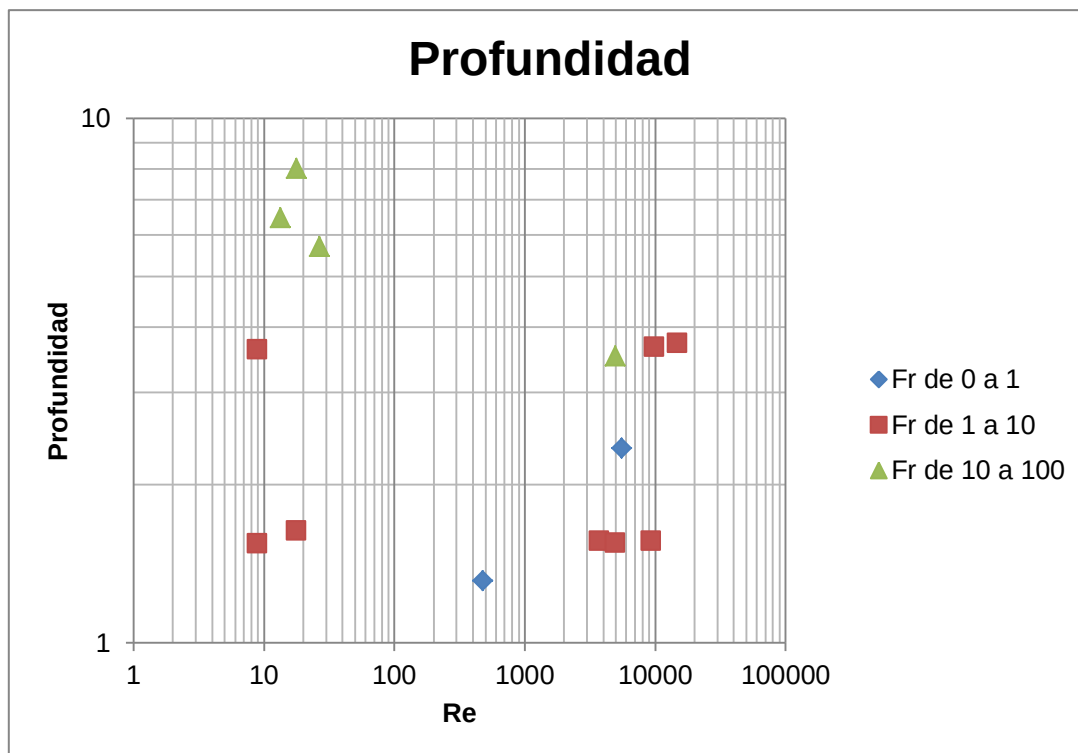


Ilustración 4.14 Profundidad adimensional frente al Re

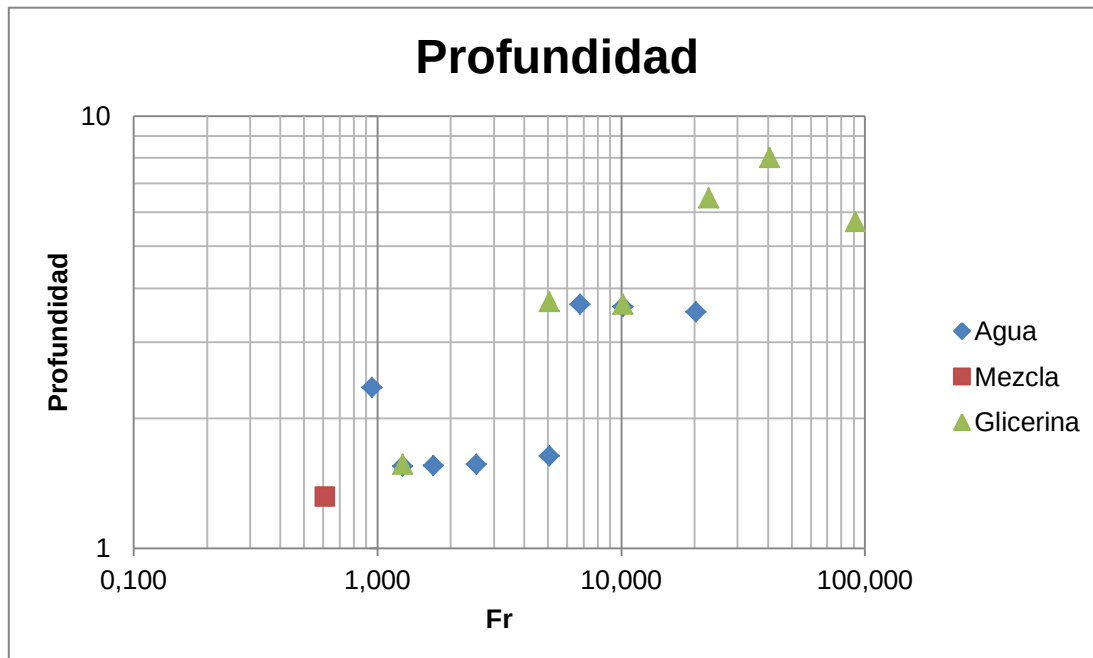


Ilustración 4.15 Profundidad adimensional frente al Fr

La profundidad se ve como cuando Re es más alto se consigue una profundidad mayor aunque como ocurría con el tiempo de colapso se ve que al depender de las propiedades del fluido se observan datos de la glicerina que con

Re bajos se tienen profundidades altas. Se puede decir que la viscosidad hace que esta profundidad sea mayor, ya que al igual que para el tiempo de colapso si se gráfica el tiempo de colapso en función del Re pero a Fr más o menos similares se ve como no se sigue una tendencia debido a que interviene la viscosidad.

En cambio si se analiza frente al Fr se ve como si hay una tendencia a que cuando el Fr es más alto la profundidad es mayor y al contrario, cuando Fr es menor la profundidad es menor. Por lo que se puede concluir al igual que para el tiempo de colapso en el que la gravedad hace que esta profundidad sea menor.

4.3.2. Formación chorro

Se empezara representando la altura máxima del chorro frente al Re, para adimensionalizar la altura máxima se hará uso del radio del disco. Y luego también se representaran frente a Fr.

Donde la altura máxima adimensional del chorro es:

$$Altura\ max = \frac{Altura\ maxima\ del\ chorro}{h_0} \quad (4.4)$$

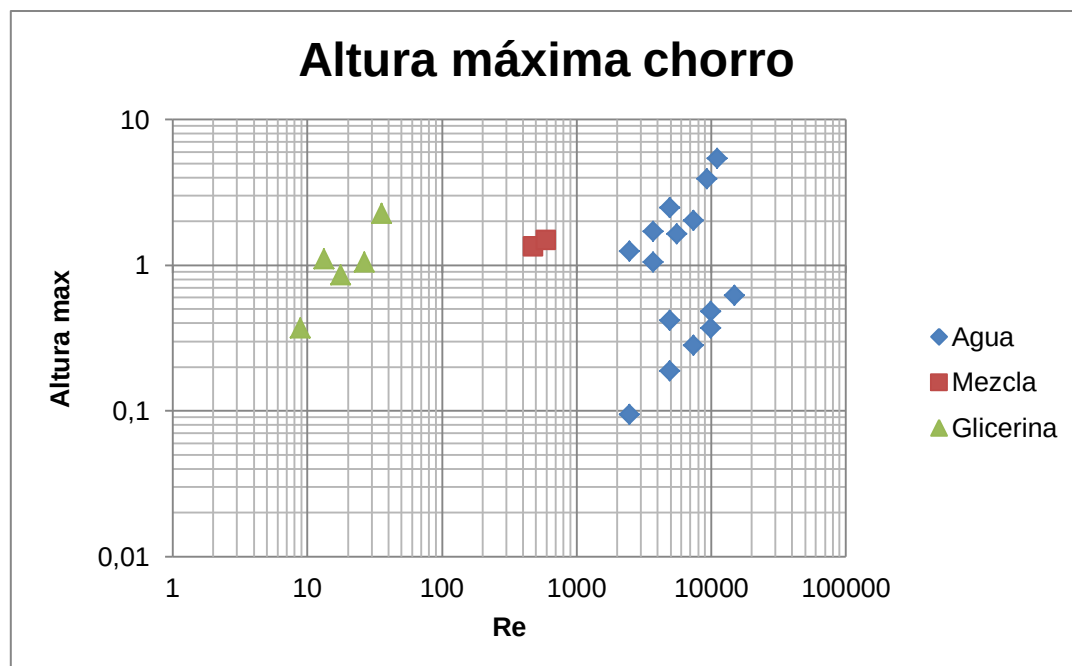


Ilustración 4.16 Altura máxima del chorro adimensional frente al Re

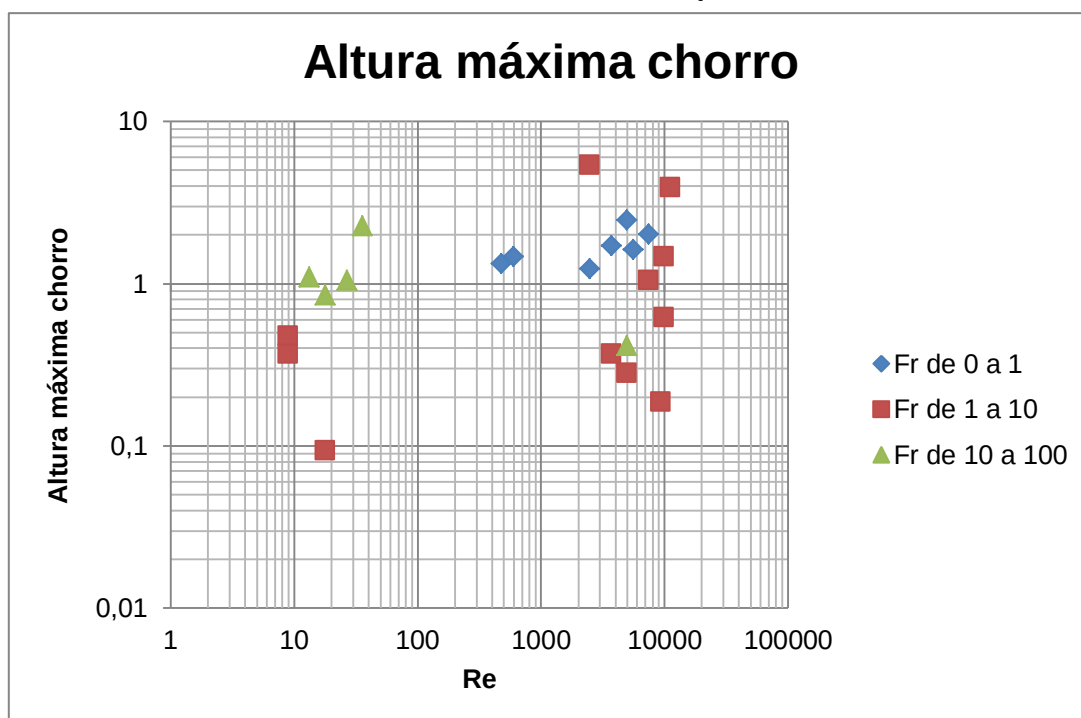


Ilustración 4.17 Altura máxima del chorro adimensional frente al Re

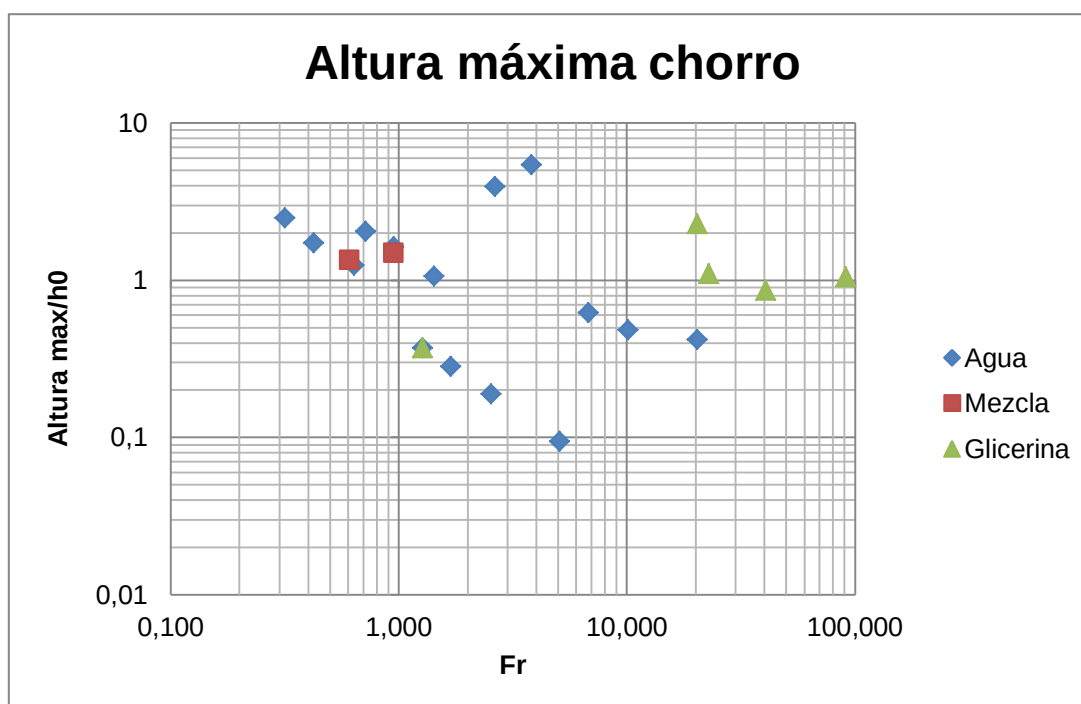


Ilustración 4.18 Altura máxima del chorro adimensional frente al Fr

Se puede ver como cuando aumenta el número Re la altura del chorro se hace mayor lo cual es lógico ya que la inercia del fluido es mucho mayor que los esfuerzos viscosos, esto si analizamos es mismo fluido. Pero se puede observar que el líquido con mayor viscosidad consigue alturas similares a las del líquido con menor viscosidad a un Re mucho menor. Por lo tanto la viscosidad hace que la

altura máxima del chorro sea mucho mayor. También se puede ver que a menor Re y mayor Fr las alturas que se consiguen son menores que para Re altos y Fr bajos.

En esta última grafica de altura máxima del chorro frente a Fr se ve como algunos ensayos con glicerina y mezcla que tienen Re bajos consiguen tener alturas similares a los ensayos con agua con Re mucho más altos. Pero en este caso el Fr no marca una tendencia clara.

Se representará también la velocidad máxima del chorro frente al Re . Como antes se hará uso de la velocidad del impacto.

$$Velocidad\ max = \frac{Velocidad\ maxima\ chorro}{v} \quad (4.5)$$

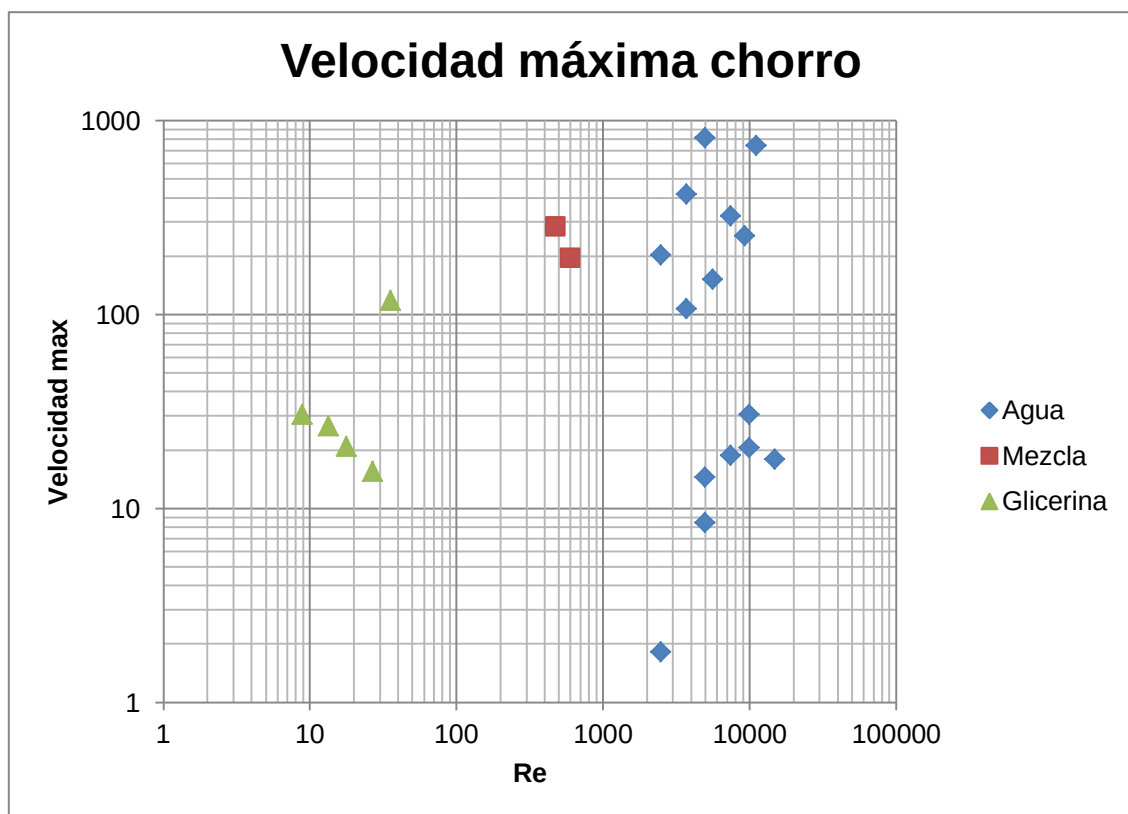


Ilustración 4.19 Velocidad máxima del chorro adimensional frente al Re

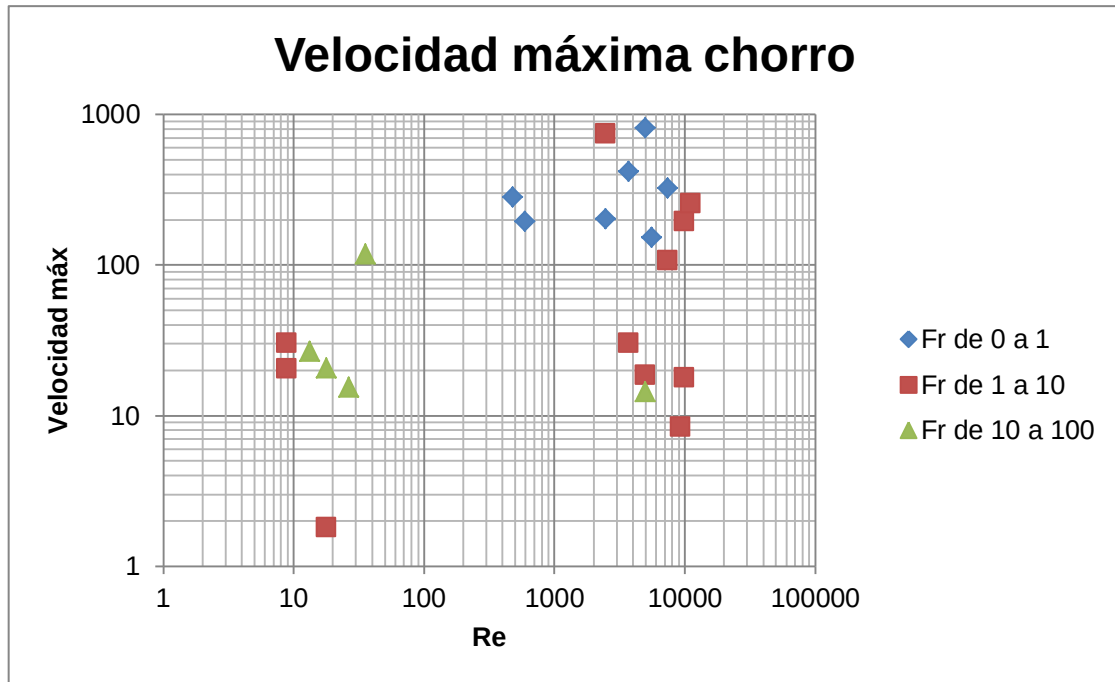


Ilustración 4.20 Velocidad máxima del chorro adimensional frente al Re

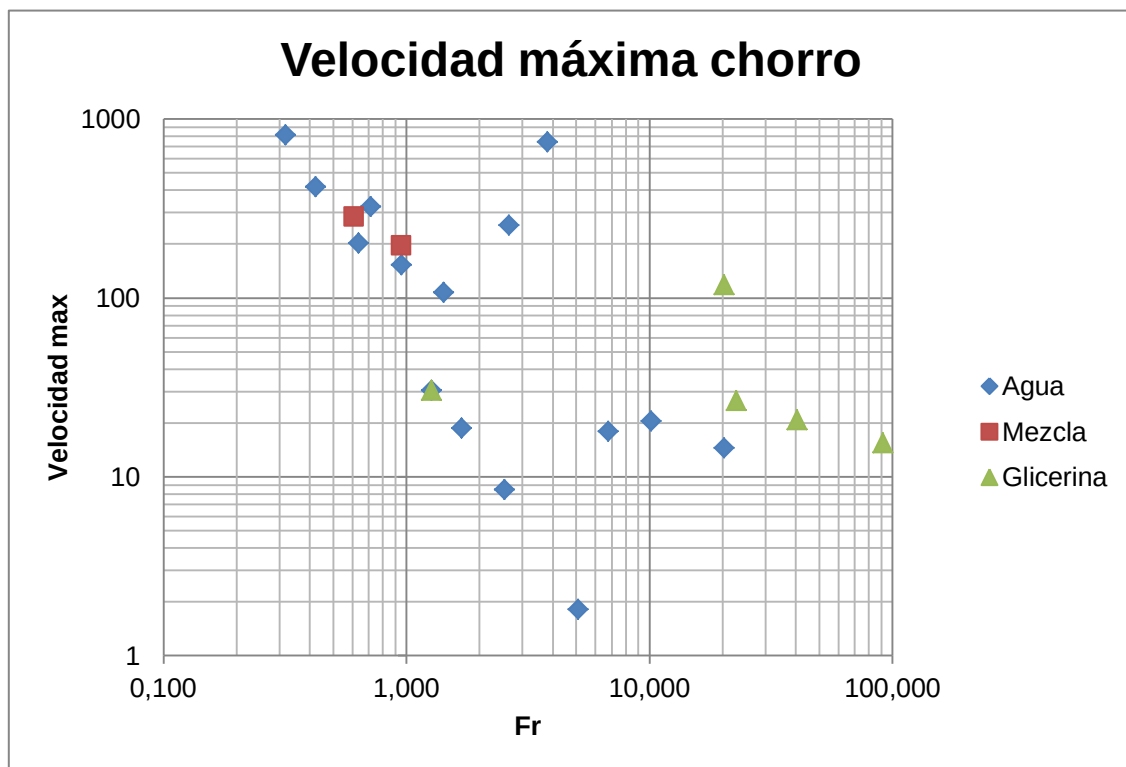


Ilustración 4.21 Velocidad máxima del chorro adimensional frente al Fr

Al igual que la altura máxima del chorro, se puede ver como cuando aumenta el número Re la velocidad del chorro se hace mayor, lo cual es lógico ya que la inercia del fluido es mucho mayor que los esfuerzos viscosos y si se analiza con el Fr no se

tiene una tendencia clara. Pero como se ha dicho en apartados anteriores la velocidad en este caso está influenciada en si se desprenden gotas o no por lo que puede haber datos que no sean muy reales. Al igual que para el caso de la altura máxima del chorro se puede ver que a menor Re y mayor Fr las alturas que se consiguen son menores que para Re altos y Fr bajos.

En esta última grafica de velocidad del chorro frente a Fr se ve como algunos ensayos con glicerina y mezcla que tienen Re bajos consiguen tener velocidades similares a los ensayos con agua con Re mucho más altos, lo que hace que no haya una tendencia clara.

Y por último el volumen frente al Re , para adimensionalizar el volumen en este caso se hará uso del radio del disco pero al cubo. Con lo que el volumen adimensional quedaría como:

$$V_a = \frac{Volumen}{h_0^3} \quad (4.6)$$

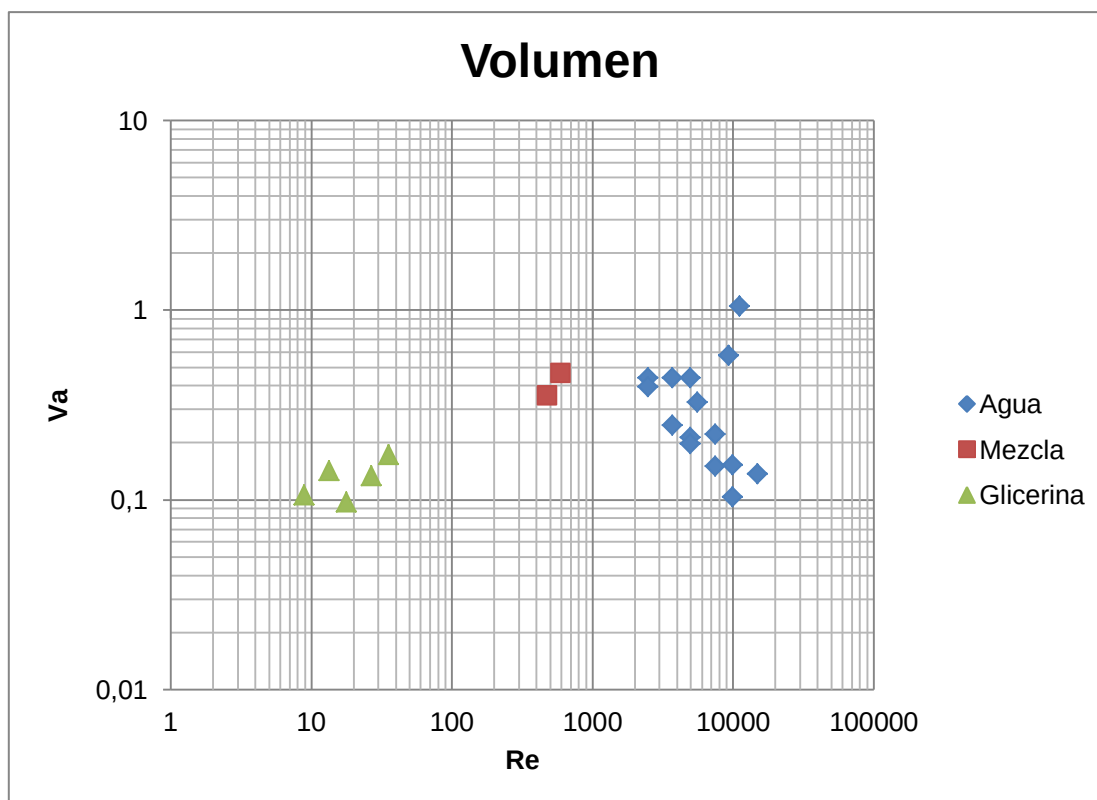


Ilustración 4.22 Volumen del chorro adimensional frente al Re

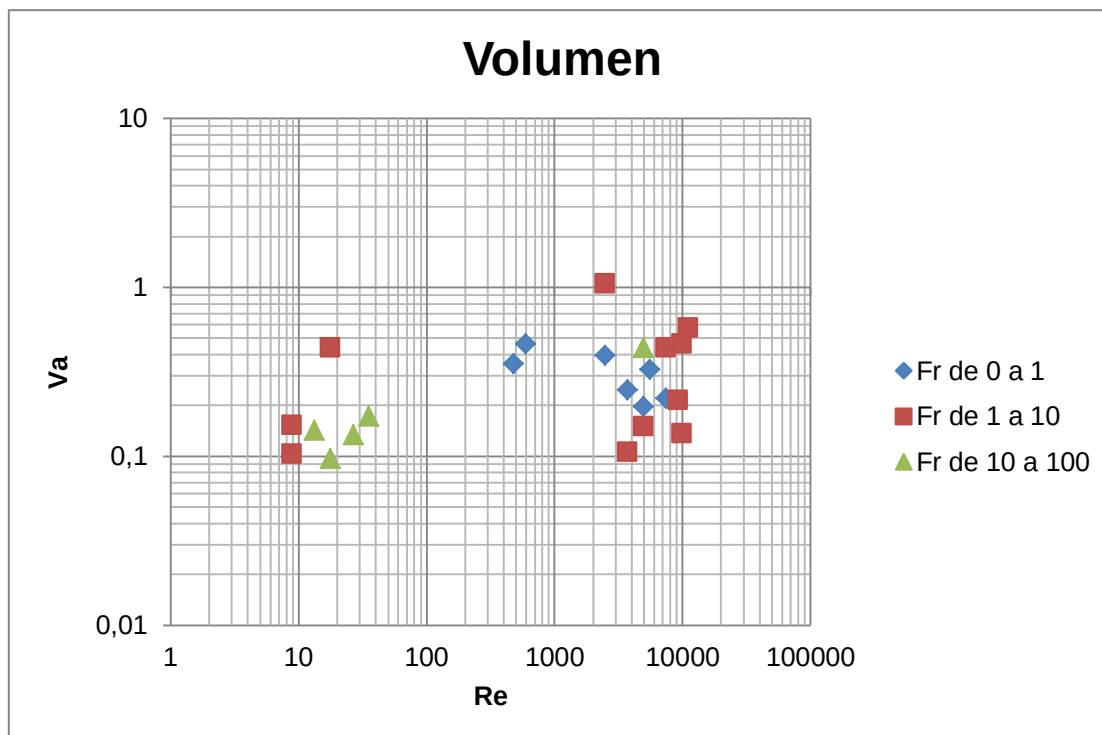


Ilustración 4.23 Volumen del chorro adimensional frente al Re

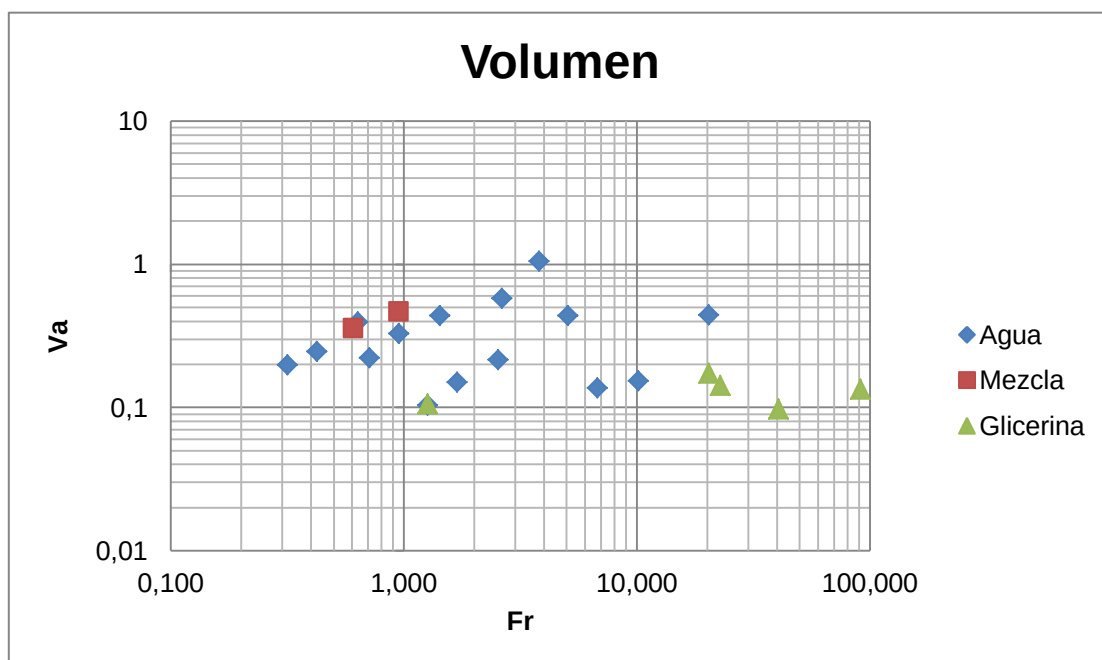


Ilustración 4.24 Volumen del chorro adimensional frente al Fr

Por último, en cuanto al volumen se ve como cuando el Re es mayor el volumen del chorro es mayor y si se ve en función del Fr no sigue una tendencia clara. Ya que como se ha visto hasta ahora al ser Re altos, es lógico ya que la inercia del fluido es mucho mayor que los esfuerzos viscosos. Y como ocurría en los

dos apartados anteriores se observa que a menor Re y mayor Fr las alturas que se consiguen son menores que para Re altos y Fr bajos.

Pero en esta última grafica de volumen frente a Fr se ve como algunos ensayos con glicerina y mezcla que tienen Re bajos consiguen tener volúmenes similares a los ensayos con agua con Re mucho más altos.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha estudiado experimentalmente la generación y desarrollo del chorro de Worthington tras el impacto de un disco sobre un líquido, lo que da lugar al colapso de una cavidad de aire axisimétrica en el fluido. La energía cinética del flujo se enfoca en un pequeño volumen que desaparece con una velocidad cuya magnitud diverge a medida que se acerca el momento de pinzamiento. La rotura capilar da lugar a los chorros de Worthington de alta velocidad eyectados después de un colapso de la cavidad en agua se produce debido al alto número de Reynolds.

Tras la revisión de toda la literatura que hay relacionada sobre el tema se observa como se trata de un problema de investigación ya que hasta día de hoy se siguen realizando ensayos para tener una mejor comprensión sobre este complejo fenómeno, como se pueden ver en la cantidad de artículos que se han mencionado. Como se ha dicho es un problema actual ya que en la revista “Nature” acaba de publicarse el 22 de junio de 2018 un artículo basado en este tema llamado “The Sound Produced by a Dripping Tap is Driven by Resonant Oscillations of an Entrapped Air Bubble”.

Otro aspecto muy importante sobre el presente trabajo es como se puede observar que todas las investigaciones mencionadas anteriormente son para líquidos cuya viscosidad es poco importante, en este trabajo se va a tener en cuenta este aspecto para su investigación.

Para hacer una primera aproximación al problema de estudio se analiza el problema mediante un análisis dimensional del mismo ya es una técnica muy potente con la que se puede llegar a las mismas conclusiones que se realiza un estudio analítico del mismo problema. El método a utilizar va a ser el teorema de π o Vaschy – Buckingham. Con este método se reduce la complejidad de los problemas. De este análisis se obtenía que los números adimensionales que tenían importancia en el estudio son el número de Reynolds y Froude, aparecía otro número que era el Weber pero este era mucho mayor que 1 por lo tanto se podía decir que la tensión superficial no era demasiado importante en este problema.

Para obtener los datos experimentales de este problema es necesario analizar las imágenes de alta velocidad adquiridas durante los ensayos. Para ello, se han desarrollado unos códigos de Matlab basada en visión por computador para el análisis automático de las imágenes registradas durante los ensayos. Los códigos permiten caracterizar el ensayo, detectando el momento de rotura de la cavidad de aire y registrando los demás elementos característicos del proceso: radio mínimo, altura donde se produce el radio mínimo, radio máximo del chorro, altura máxima del chorro y volumen del chorro.

Para validar el correcto funcionamiento de estos códigos, se ha realizado un código para tratar de ver si la velocidad real del motor (al cual va acoplado la varilla y el disco) se corresponde con la que se obtiene a partir del análisis de imágenes.

Debido a las dificultades que presentaban las imágenes tomadas, ya que estas contenían un nivel de iluminación poco uniforme, la presencia de gotas debidas al chapoteo de otros ensayos y la líneas verticales que generaba el fondo, se han tenido que utilizar técnicas de preprocesado de imágenes, detección de bordes y segmentación para intentar de obtener los mejores resultados con el menor ruido posible. De estas técnicas se han realizado apertura a las imágenes para intentar corregir los defectos de iluminación y eliminar los elementos de pequeño tamaño que pudiesen aparecer, también se ha ecualizado el histograma de la imagen para que no fuese tan oscura y así no tener todos los puntos con una misma intensidad de gris, detectar regiones mediante crecimiento de regiones a partir de una semilla que se daba de forma manual para así solo detectar una región (la que se va buscando), eliminar el posible ruido que hubiese tras detectar la región. Por otro lado también se ha sacado del video del ensayo una imagen para tenerla como fondo para que con las imágenes posteriores hacer la diferencia y detectar la región ya que de esta forma se detecta solo lo que se está moviendo, también se han detectado regiones mediante umbralización.

Una vez que se tenían las imágenes listas con la gran mayoría del ruido que presentaba reducido se ha pasado a extraer las características que se han mencionado anteriormente y para ello se han creado unas funciones para dicho fin.

En cuanto a los resultados obtenidos para ciertos casos se ve como el análisis de imágenes ha permitido obtener ciertos parámetros de interés del problema a estudiar. En general se han podido sacar las gráficas de los distintos parámetros del problema además de los valores más interesantes para su análisis.

En cuanto al análisis de los parámetros más interesantes se ve como el tiempo de colapso de la cavidad el líquido más viscoso con menor número de Re consigue tener un tiempo de colapso similar al de líquidos menos viscosos con mayor Re . Con esto se puede decir que a igualdad de Re el tiempo sería menor el tiempo de colapso del líquido más viscoso. En cuando a la profundidad a la que se da el radio mínimo también se llega a la misma conclusión que para el tiempo de colapso por los mismos motivos.

Si ahora se analiza que es lo que sucede con el chorro se ve que la altura máxima del chorro del líquido más viscoso es equiparable al de líquidos menos viscosos con un Re aproximadamente entre 4-5 veces superior, por lo que se puede decir que a igualdad de Re esta altura máxima del chorro sería muy superior la del líquido viscoso sobre la del menos viscoso. En cuanto a la velocidad máxima del chorro se ve como ocurre lo comentado anteriormente pero en menor medida ocurre lo mismo pero la diferencia entre el número de Re ya no es tan grande, aunque en este apartado de la velocidad al tener que el chorro se divide en gotas puede provocar que alguno de estos datos no esté bien y por eso se vean algunos puntos que no representan nada realmente.

Por último, en cuanto al volumen del chorro aquí se muestra como el líquido más viscoso tiende a tener menos volumen que el menos viscoso puesto que como se podía ver en los ensayos la altura de uno y otro son muy distintas y hacia que el chorro del líquido viscoso fuese más esbelto que el del líquido menos viscoso, en cuanto a la mezcla se ve como se encuentra más cercana al líquido menos viscoso.

Como trabajo futuro generado en este trabajo, hay que señalar dos principalmente que serían: por un lado, comparar con los resultados de otros artículos sobre todo para número de Re altos ya que para Re bajos no hay nada en la literatura consultada. Y por otro lado sería realizar un análisis teórico y un modelado que expliquen los resultados obtenidos, tanto para la cavidad como para

el chorro. Para el cierre de la cavidad se podrían hacer además experimentos adicionales con mayor resolución temporal que permitan resolver mejor los últimos instantes del colapso y así poder comparar con artículos recientes de esta temática.

Bibliografía

ANTKOWIAK, A., BREMOND, N., LEDIZES, S., VILLERMAUX, E. (2007). Short-term dynamics of a density interface following an impact. *Journal of Fluid Mechanics*, 577, 241-250.

Bartolo, D., Josserand, C., Bonn, D., (2006). Singular Jets and Bubbles in Drop Impact. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. 96, 124501

BERGMANN, R., VAN DER MEER, D., GEKLE, S., VAN DER BOS, A., LOHSE, D., (2008). Controlled impact of a disk on a water surface: cavity dynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, 633, 381-409.

ENRIQUEZ, O., PETERS, I., GEKLE, S., SCHMIDT, L., LOHSE, D., VAN DER MEER, D., (2012). Collapse and pinch-off of a non-axisymmetric impact-created air cavity in water. *Journal of Fluid Mechanics*,

Gekle, S., Gordillo, J. M., (2010). Compressible air flow through a collapsing liquid cavity. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS*. *Journal of Fluid Mechanics*, 67, 1456-1469.

Gekle, S., Gordillo, J. M., (2010). Generation and breakup of Worthington jets after cavity collapse. Part 1. *Journal of Fluid Mechanics*, 663, 331-346.

Gekle, S., Gordillo, J. M., (2010). Generation and breakup of Worthington jets after cavity collapse. Part 2. Tip breakup of stretched jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 663, 293-330.

BERGMANN, R., VAN DER MEER, D., GEKLE, S., VAN DER BOS, A., LOHSE, D., (2008). Noncontinuous Froude Number Scaling for the Closure Depth of a Cylindrical Cavity. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. 100, 084502.

Gekle, S., Gordillo, J. M., Van Der Meer, D., Lohse, D., (2009). High-Speed Jet Formation after Solid Object Impact. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. 102, 034502.

Gekle, S., Gordillo, J. M., Peters, I., Van Der Meer, D., Lohse, D., (2009). Supersonic Air Flow due to Solid-Liquid Impact. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. 104, 024501.

Gekle, S., Gordillo, J. M., Peters, I., Van Der Meer, D., Lohse, D., (2010). Supersonic Air Flow due to Solid-Liquid Impact. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*.

Ghabache, E., Séon, T., Antkowiak, A., (2014). Liquid jet eruption from hollow relaxation. *Journal of Fluid Mechanics*, 761, 206-219.

Gekle, S., Peters, I., Van Der Meer, D., Lohse, D., (2013). Air flow in a collapsing cavity. *American Institute of Physics*, 25, 032104

Physical Properties of Glycerine.

Apuntes asignatura Automatización y Control

Vera, M., Iglesias, I., Sánchez, A., Martínez, C., (2012). Ingeniería fluidomecánica. España. Paraninfo.

Phillips.S., Agarwal.A., Jordan.P.,(2018). The Sound Produced by a Dripping Tap is Driven by Resonant Oscillations of an Entrapped Air Bubble. Nature.

6. Anexos

6.1. Anexo I. Validación código

```

close all
clear all
clc

[FileName,PathName,FilterIndex] = uigetfile ('.avi');

vidObj = VideoReader(FileName);
vidObj.CurrentTime = 25;%17;%100 y 120-130 117
frame_leido = false;
frame_org = [];

fps=20000;
tiempo=1/fps;
pixmm=10/55;
ind=1;

x=0;
y=0;

while hasFrame(vidObj)

frame = readFrame(vidObj);
parte_fps = find ( frame(:,end) == 0);
    if isempty(parte_fps)
        frame = frame;
        frame_org = frame;
    else
        frame = frame ( 1:(parte_fps(1)-1),:);
        frame_org = frame;
    end

SE = strel('disk',10);%10
tophatFiltered = imtophat(frame,SE);

im_eq1 = histeq (tophatFiltered);
    if(x == 0 || y == 0)
        imshow(im_eq1,[0 255]);
        [x,y] = ginput(1);
    end
    im_eq1(1:1:y-5,:)=255;
    im_eq1 = im2double(im_eq1);
    [imbw I1] = segCroissRegion(0.25,im_eq1,y,x); %

title(['Tiempo:',num2str(vidObj.CurrentTime),'/',num2str(vidObj.Duration)])

props = objectTracking(imbw);
subplot(2,2,1:2:3),imshow(frame_org)
title(['Tiempo:',num2str(vidObj.CurrentTime),'/',num2str(vidObj.Duration)])
[valor_min fila columnas long_cav(ind)] = minCavidad (props,imbw);
hold on
    for i = 1:length(props)

```

```
bb = props(i).BoundingBox;  
bc = props(i).Centroid;  
  
bb = [ bb(1:3) long_cav(ind)];  
rectangle ('Position',bb,'EdgeColor','y','LineWidth',2)  
  
end  
  
subplot(2,2,2),plot(long_cav*pixmm,'bo')  
  
if isempty(props)  
    velocidad(ind) = 0;  
else  
    altura(ind)=props(end).BoundingBox(4);  
    if ind<=2 %length(tiempo) <= 2  
        velocidad = 0;  
    else  
        velocidad(ind) = -(long_cav(ind)-long_cav(ind-1))/(tiempo  
    end  
end  
  
subplot(2,2,4),plot(velocidad*pixmm,'bo')  
  
ind = ind +1;  
  
hold off  
vel_med=(max(long_cav)*pixmm-long_cav(1)*pixmm)/(ind/fps)  
  
end
```

6.2. Anexo II. Código para obtener características cavidad

```

close all
clear all
clc

[FileName,PathName,FilterIndex] = uigetfile ('.avi');

vidObj = VideoReader(FileName);
vidObj.CurrentTime = 0;
frame_leido = false;
frame_org = [];

x=0;
y=0;
ind=1;
pixmm=40/89;
fps=20000;

while hasFrame(vidObj)

frame = readFrame(vidObj);
parte_fps = find ( frame(:,end) == 0);
    if isempty(parte_fps)
        frame = frame;
        frame_org = frame;
    else
        frame = frame ( 1:(parte_fps(1)-1),:);
        frame_org = frame;
    end
    SE = strel('disk',10);%10
    tophatFiltered = imtophat(frame,SE);

    im_eq1 = histeq (tophatFiltered);
    if(x == 0 || y == 0)
        imshow(im_eq1,[0 255]);
        [x,y] = ginput(1);
    end
    im_eq1(1:1:y-5,:)=255;
    im_eq1 = im2double(im_eq1);
    [imbw I1] = segCroissRegion(0.25,im_eq1,y,x);

title(['Tiempo:',num2str(vidObj.CurrentTime),'/',num2str(vidObj.Duration)])

props = objectTracking(imbw);
imshow(frame_org)
title([ 'Tiempo:',num2str(vidObj.CurrentTime),'/',num2str(vidObj.Duration)])

    hold on
    redAndBlueChannel = 255 * uint8(1-I1);
    greenChannel = 255 * ones(size(I1), 'uint8'); % Green Everywhere.
    rgbImage = cat(3, redAndBlueChannel, greenChannel, redAndBlueChannel);

    set(imshow(rgbImage),'AlphaData', 0.6)
    for i = 1:length(props)

        bb = props(i).BoundingBox;
        bc = props(i).Centroid;

```

```
rectangle ('Position',bb,'EdgeColor','r','LineWidth',2)
plot(bc(1),bc(2),'-m+')

end

[valor_min(ind) fila(ind) columnas] = minCavidad (props,imbw);
text(mean(columnas),fila(ind)-10,num2str(valor_min(ind)*pixmm),'Color','y')
plot([columnas(1) columnas(2)],[fila(ind) fila(ind)],'y','LineWidth',2)

ind=ind+1;
hold off
end
```

.

6.3. Anexo III. Código para obtener características chorro

```
close all
clear all
clc

[FileName,PathName,FilterIndex] = uigetfile ('.avi');

vidObj = VideoReader(FileName);
vidObj.CurrentTime = 103;% 145 150
frame_leido = false;
frame_org = [];

x=0;
y=0;
x1=0;
y1=0;
ind=1;
tiempo_ant=vidObj.CurrentTime;
pixmm=40/89;
fps=20000;

while hasFrame(vidObj)

    if frame_leido == false

        frame_ant = readFrame(vidObj);
        parte_fps = find ( frame_ant(:,end) == 0);
        if isempty(parte_fps)
            frame_ant = frame_ant;
            frame_org = frame_ant;
        else
            frame_ant = frame_ant ( 1:(parte_fps(1)-1),:);
            frame_org = frame_ant;
        end

        frame_leido = true;

    else

        frame = readFrame(vidObj);
        parte_fps = find ( frame(:,end) == 0);
        if isempty(parte_fps)
            frame = frame;
            frame_org = frame;
        else
            frame = frame ( 1:(parte_fps(1)-1),:);
            frame_org = frame;
        end

        frame = frame (1:y1,:);

        im = imabsdiff(frame_ant(1:y1,:),frame_org(1:y1,:));
```

```

umbral = 0.1;
imbw = im2bw (im,umbral);
imbw = bwareaopen (imbw,25);
imbw = imfill(imbw, 'holes');
props = regionprops (imbw, 'Area', 'BoundingBox', 'Centroid');
if length(props)==1 || length(props) == 0
    props=props;
else
    props = struct2cell(props);
    props = props';
    props = sortrows (props,1);
    props = cell2struct(props,{'Area';'Centroid';'BoundingBox'},2);
end

if isempty(props)
    volumen(ind)=0;
else
    sup = props(end).Area;
    volumen(ind) = sup*pi*pixmm^2;
end

imshow(frame_org)
title([' Tiempo :
',num2str(vidObj.CurrentTime), '/', num2str(vidObj.Duration)])

hold on

SE = strel('disk',1,0);
ImErd = imerode(imbw,SE);
I1 = imbw - ImErd;
[xx yy] = dibujarLineas(I1);
plot(xx,yy, 'LineWidth',2, 'Color', 'green')

for i = 1:length(props)

    if isempty (props), break, else

        bb = props(i).BoundingBox;
        bc = props(i).Centroid;

        rectangle ('Position',bb, 'EdgeColor', 'r', 'LineWidth',2)
        plot(bc(1),bc(2), '-m+')
    end
end

[valor_max(ind) fila columnas] = maxChorro (props,imbw);
if valor_max(ind) == 0 && fila == 0 && columnas(1) == 0 &&
columnas(2) == 0

    else
text(mean(columnas),fila-10,num2str(valor_max(ind)*pixmm), 'Color', 'y')
plot([columnas(1) columnas(2)], [fila fila], 'y', 'LineWidth',2)
end

if isempty (props)
    altura_chorro(ind) = 0;

```

```
else
    altura_chorro(ind) = props(end).BoundingBox(4)*pixmm;
end

    hold off
end
ind=ind+1;
end
```

6.4. Anexo V. Función “segCroissRegion”

```

function [Phi Phi2] = segCroissRegion(tolerance,Igray,x,y)
if(x == 0 || y == 0)
    imshow(Igray,[0 255]);
    [x,y] = ginput(1);
end
Phi = false(size(Igray,1),size(Igray,2));
ref = true(size(Igray,1),size(Igray,2));
PhiOld = Phi;
% Phi(uint8(x),uint8(y)) = 1;
Phi(x,y)=1;
while(sum(Phi(:)) ~= sum(PhiOld(:)))
    PhiOld = Phi;
    segm_val = Igray(Phi);
    meanSeg = mean(segm_val);
    posVoisinsPhi = imdilate(Phi,strel('disk',1,0)) - Phi;
    voisins = find(posVoisinsPhi);
    valeursVoisins = Igray(voisins);
    Phi(voisins(valeursVoisins > meanSeg - tolerance & valeursVoisins <
meanSeg + tolerance)) = 1;
end

% Uncomment this if you only want to get the region boundaries
SE = strel('disk',1,0);
ImErd = imerode(Phi,SE);
Phi2 = Phi - ImErd;

```

6.5. Anexo VI. Función “objectTracking”

```

function [props]= objectTracking(imbw)
%seguir objeto en una imagen binarizada
imbw = bwareaopen(imbw,50);
imbw = imfill(imbw,'holes');
imbw = bwlabel(imbw,8);

props = regionprops(imbw,'BoundingBox','Centroid');

end

```


6.6. Anexo VII. Función “dibujarLineas”

```
function [xx yy] = dibujarLineas(I1);
    I1 = edge (I1, 'Canny', 0.62); %0.6-0.65
    [H,T,R]=hough(I1, 'RhoResolution', 0.5);
    P = houghpeaks(H, 36, 'threshold', ceil(0.01*max(H(:))));%36 y 0.25
    x = T(P(:,2)); y = R(P(:,1));
    lines = houghlines(I1,T,R,P, 'FillGap', 5, 'MinLength', 7); % 5 7, 8

    %Codigo vectorizado
    xy1 = [lines.point1; lines.point2];
    xx=xy1(:,1:2:end);
    yy=xy1(:,2:2:end);
end
```

6.7. Anexo VIII. Función “minCavidad”

```
function [valor_min fila columnas long_cav] = minCavidad (props,imbw)

d=15;
if isempty(props)
    valor_min = 0;
    fila = 0;
    columnas = [0 0];
    return
else
    f_comienzo = ceil (props(1).BoundingBox(2))-1+d;
    f_fin = f_comienzo+ceil (props(1).BoundingBox(4))-1;
end

long = zeros (1,ceil (props(end).BoundingBox(4))-d);
for i = 1:length(long)
    a = find(imbw(f_comienzo+i-1,:)==1);
    if isempty(a)
        long(i) = 0;
    else
        long(i) = a(end)-a(1);
    end
end

b = zeros (1,length(long));
b(1)=1;

for i = 2:length(b)
    b(i) = long(i-1)-long(i);
end

[row1 col1 v1] = find (b >= 10);
if isempty(row1) && any(b >= 10)
    col1=0;
    columnas = [0 0];
end
```

```
valor_min=0;
fila=0;
long_cav = 0;
else

    if isempty(coll) && all(b < 10)
        [ a , coll] = min(long);
    end

    [M,I] = min(long(1,1:coll(1)-5));%4 2
    valor_min = M;
    fila = f_comienzo+I;

    c = find(imbw(fila,:)==1);
    if isempty(c) || length(c) == 1
        columnas = [0 0];
        fila = 0;
        valor_min = 0;
    else
        columnas = [c(1) c(end)];
    end
    long_cav = coll(1);
end

end
```

6.8. Anexo VIII. Función “maxChorro”

```

function [valor_max fila columnas] = maxChorro (props,imbw)

if isempty(props)
    valor_max = 0;
    fila = 0;
    columnas = [0 0];
    return
else
    f_comienzo = ceil (props(end).BoundingBox(2))-1;
    f_fin = f_comienzo+ceil (props(end).BoundingBox(4))-1;

    end

    long = zeros (1,ceil (props(end).BoundingBox(4)));
    for i = 1:length(long)
        a = find(imbw(f_comienzo+i-1,:)==1);
        if isempty(a) && sum(imbw(f_comienzo+i-1,:)) < 1%0
            long(i) = 0;
        else
            long(i) = a(end)-a(1);
        end
    end

    b = zeros (1,length(long));
    b(1)=1;

    for i = 2:length(b)
        b(i) = long(i-1)-long(i);
    end

    [row1 col1 v1] = find (b < -10);
    if isempty(row1)
        col1=0;
        [M,I] = max(long);
        valor_max = M;
        fila = f_comienzo+I;
        c = find(imbw(fila,:)==1);
        columnas = [c(1) c(end)];
    else
        [M,I] = max(long(1,1:col1(1)-2));%4
        valor_max = M;
        fila = f_comienzo+I;
        c = find(imbw(fila,:)==1);
        if isempty(c) || length(c) == 1
            columnas = [0 0];
            fila = 0;
            valor_max = 0;
        else
            columnas = [c(1) c(end)];
        end
    end

end

end

```

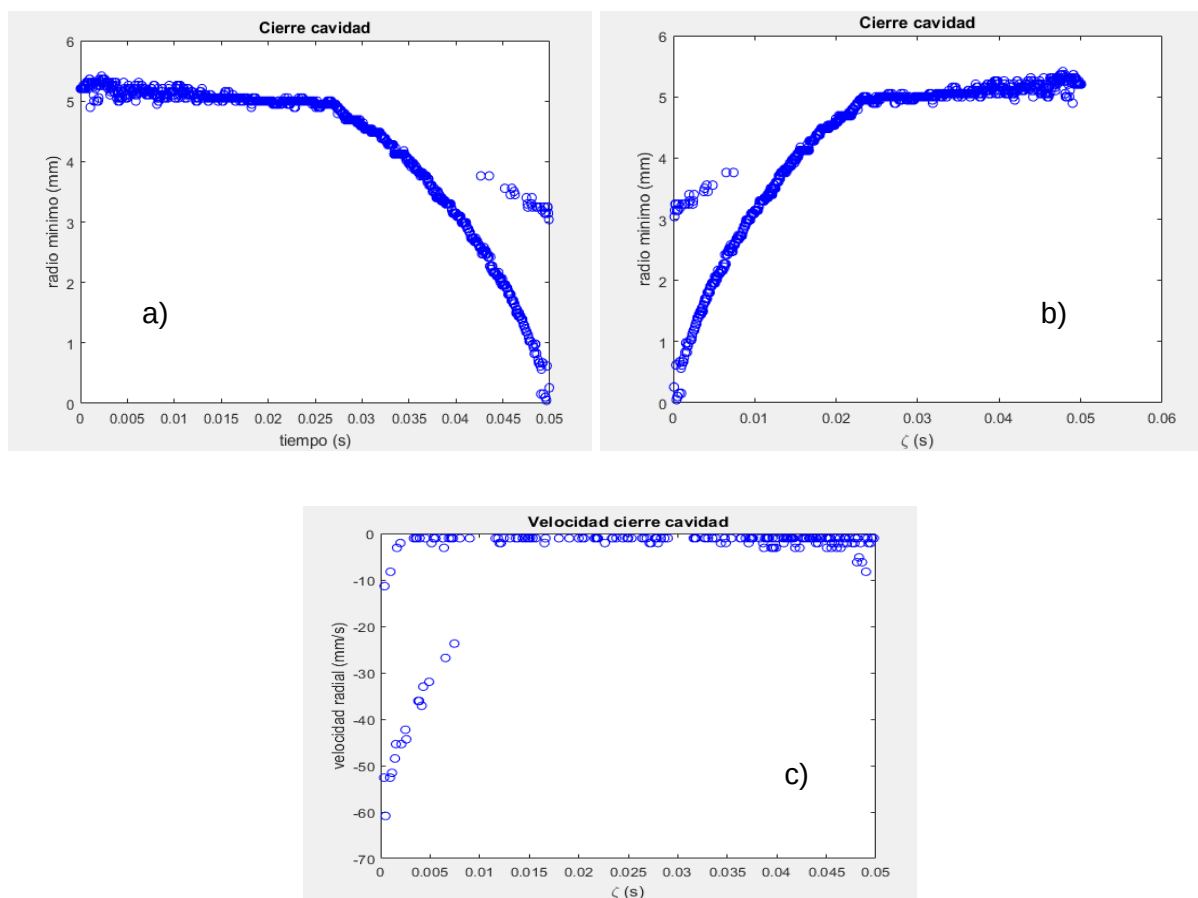
6.9. Anexo IX. Resto de resultados de los ensayos

Ilustración 6.1 Ensayo 2, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

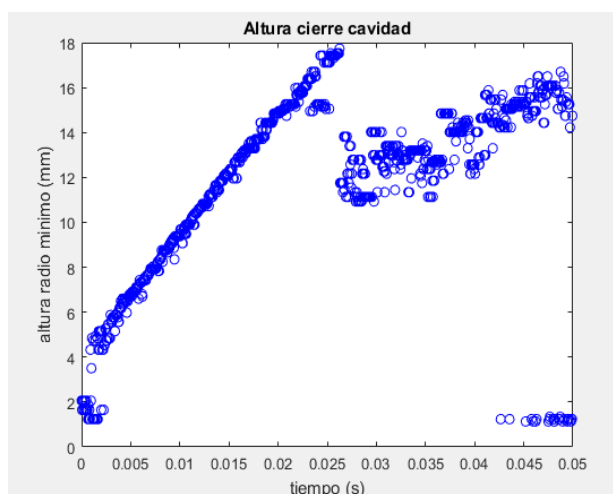


Ilustración 6.2 Ensayo 2 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

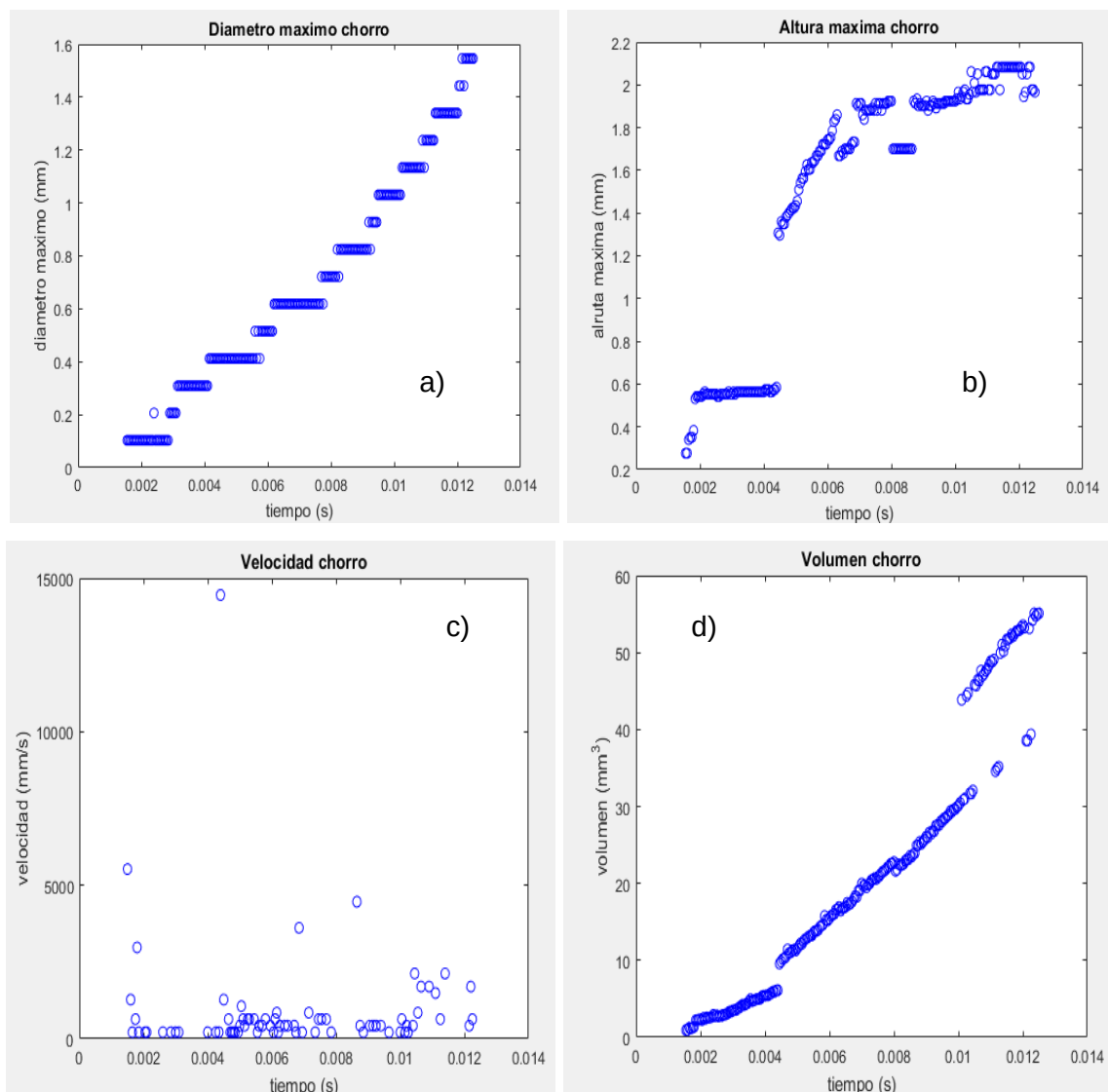


Ilustración 6.3 Ensayo 2 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

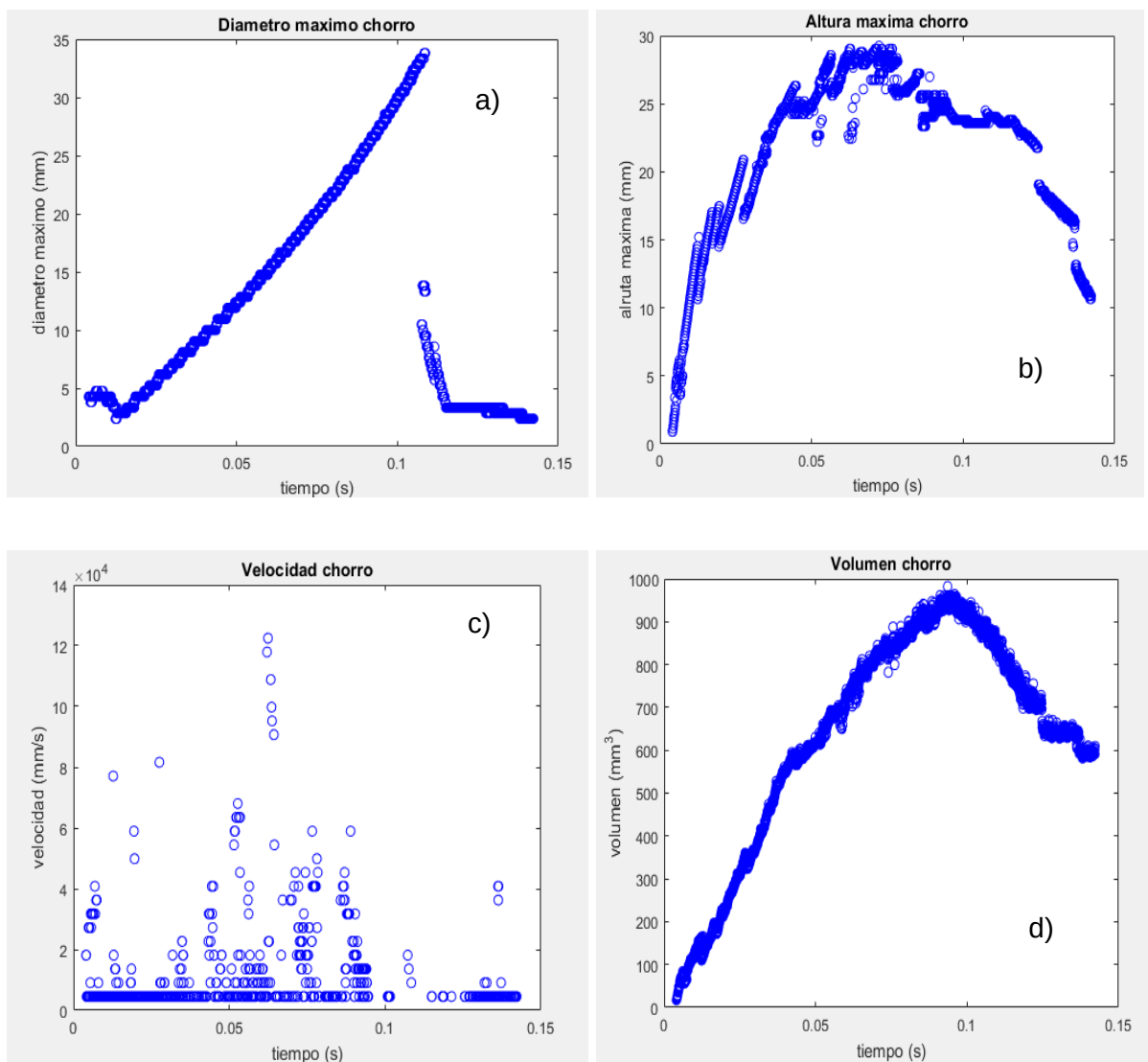


Ilustración 6.4 Ensayo 3 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

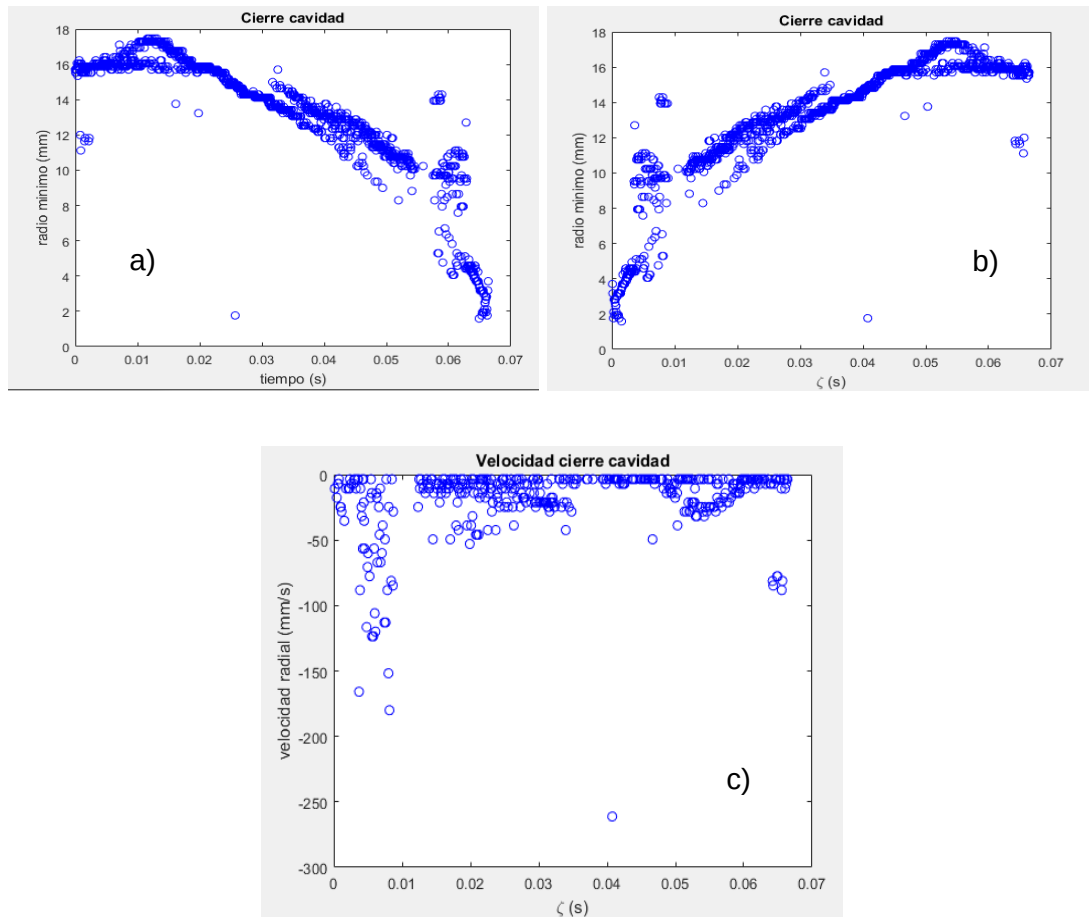


Ilustración 6.5 Ensayo 4, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

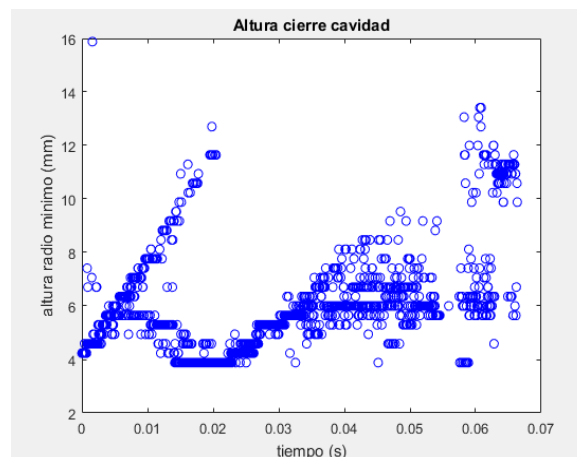


Ilustración 6.6 Ensayo 4 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

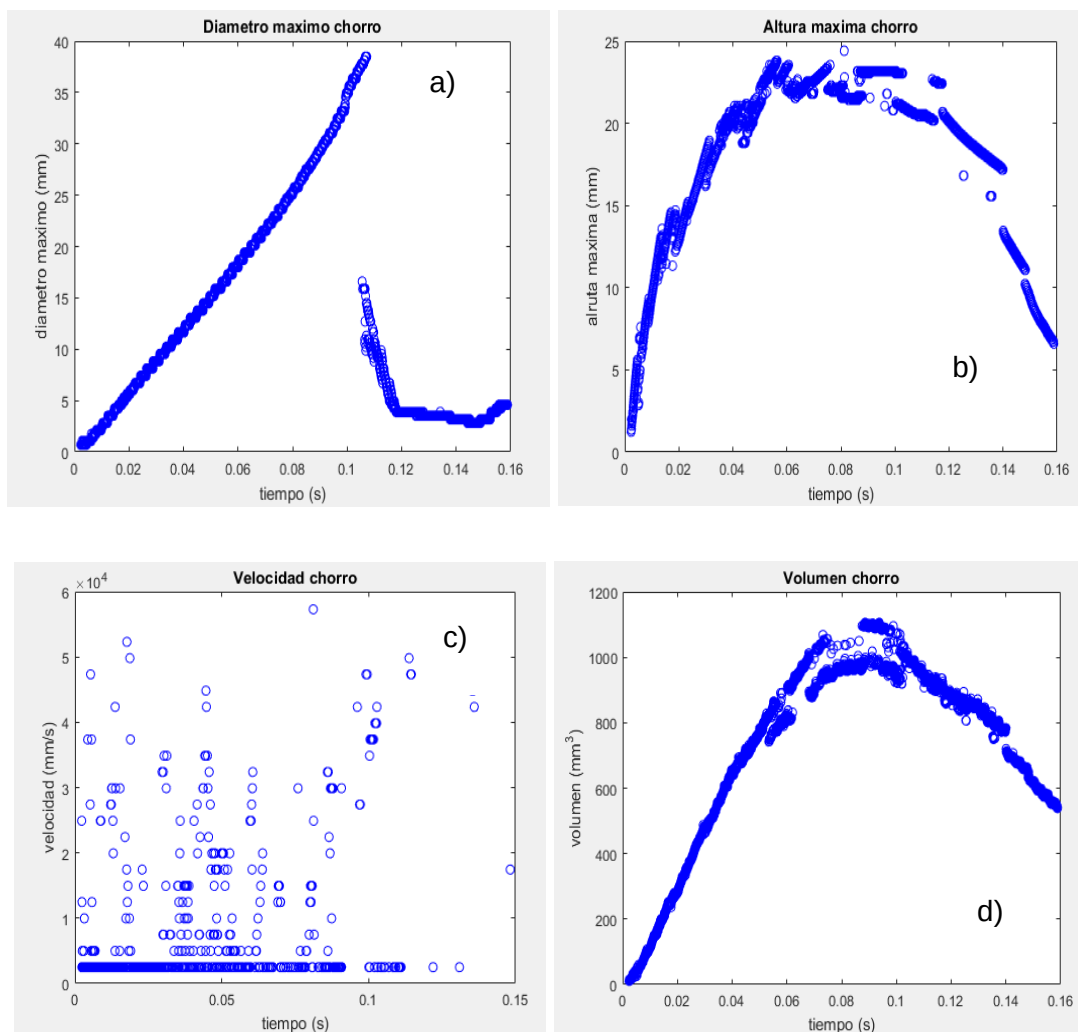


Ilustración 6.7 Ensayo 4 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

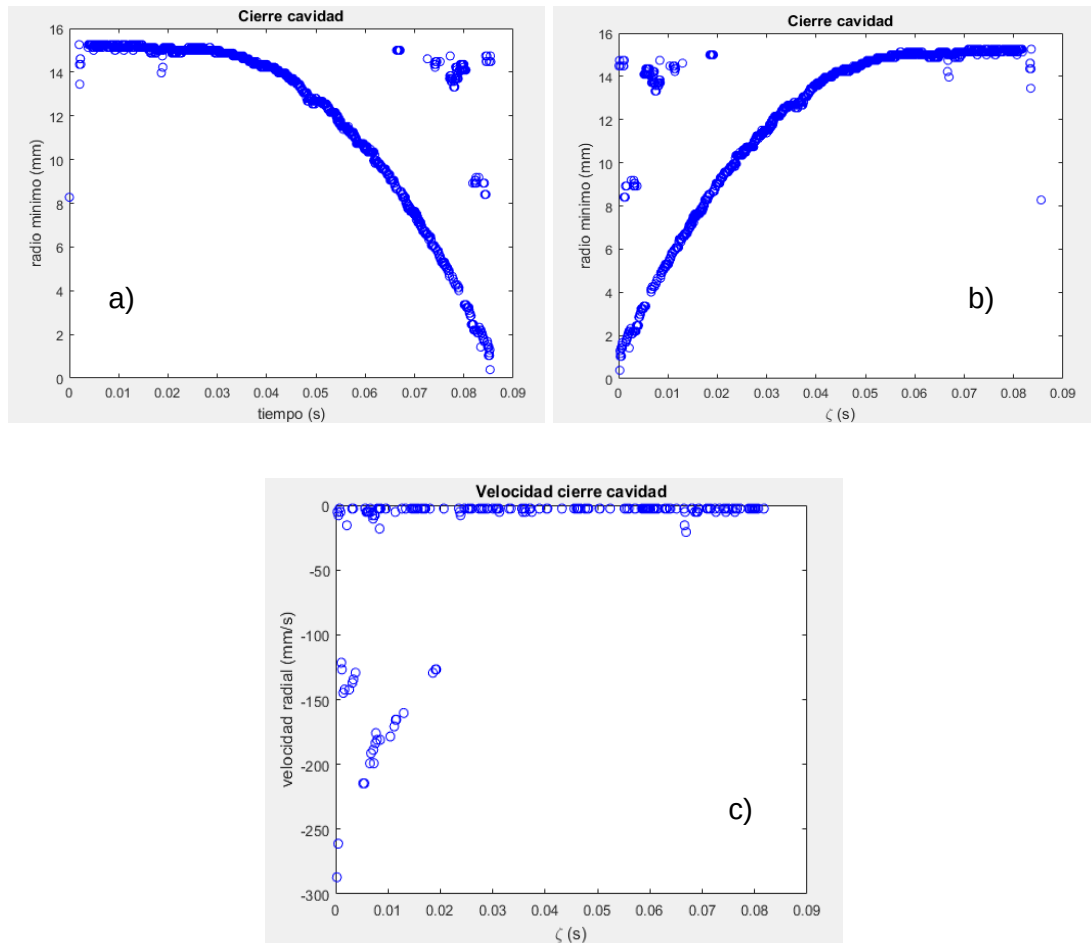


Ilustración 6.8 Ensayo 5, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

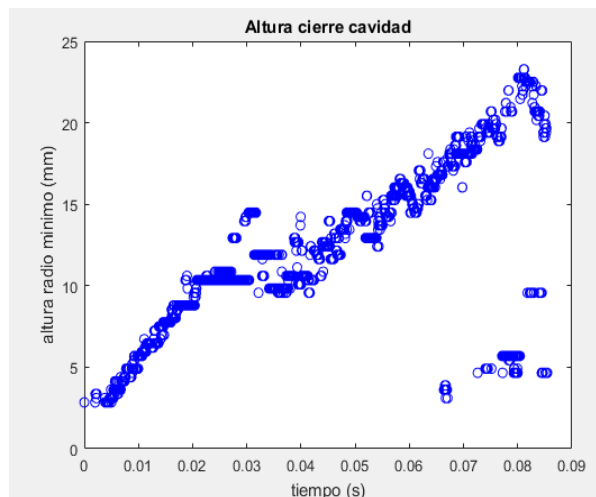


Ilustración 6.9 Ensayo 5 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

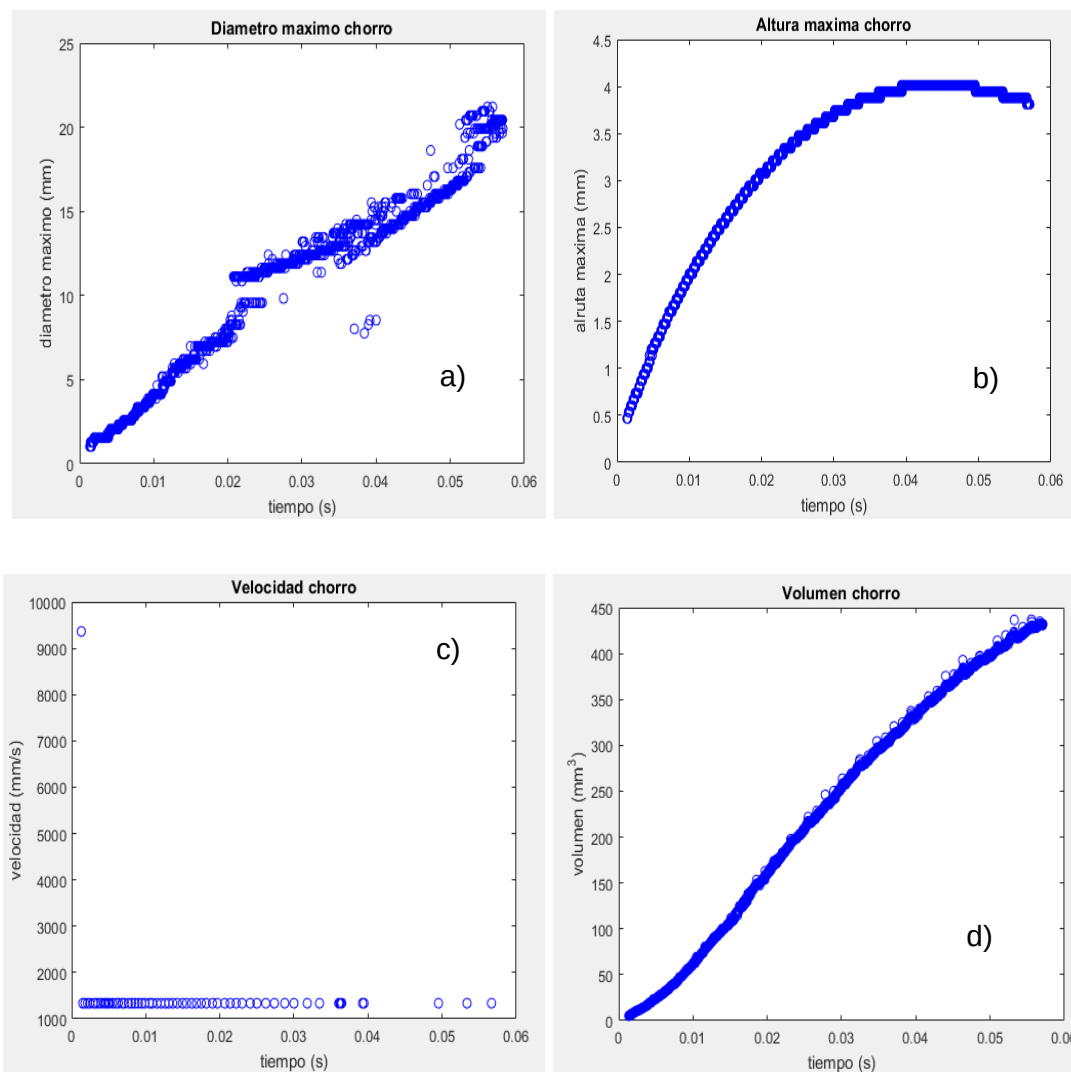


Ilustración 6.10 Ensayo 5 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

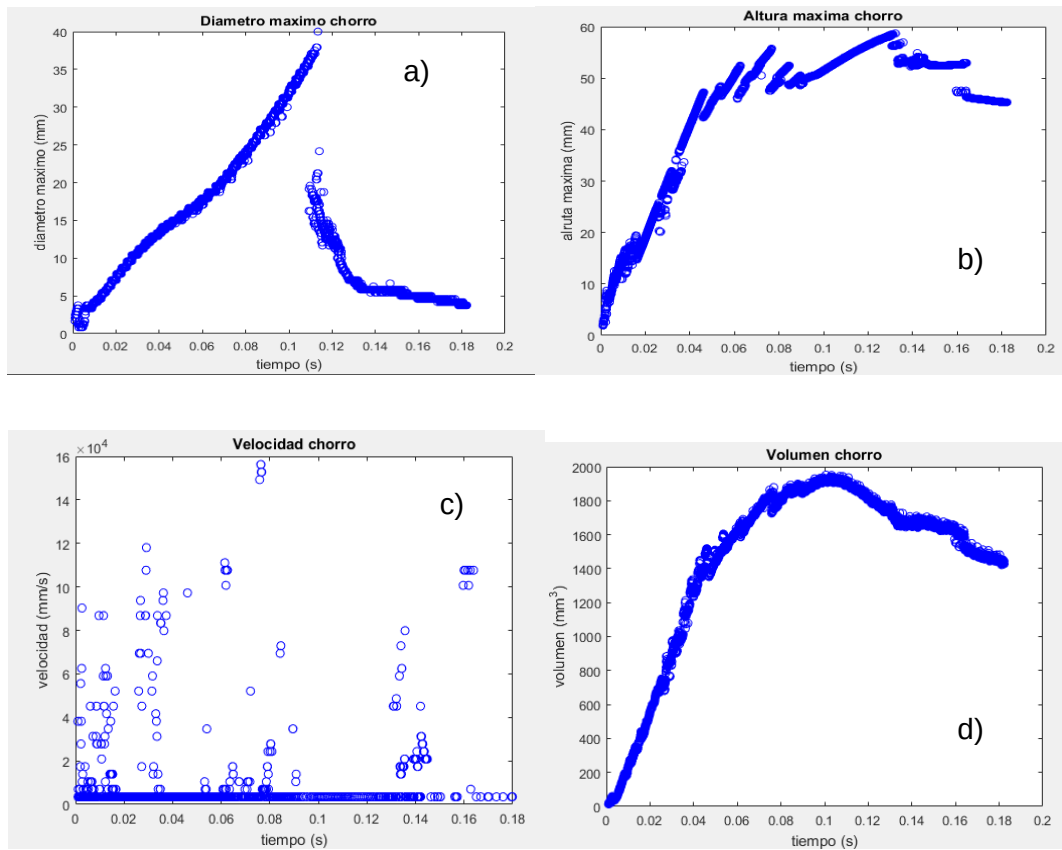


Ilustración 6.11 Ensayo 6 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

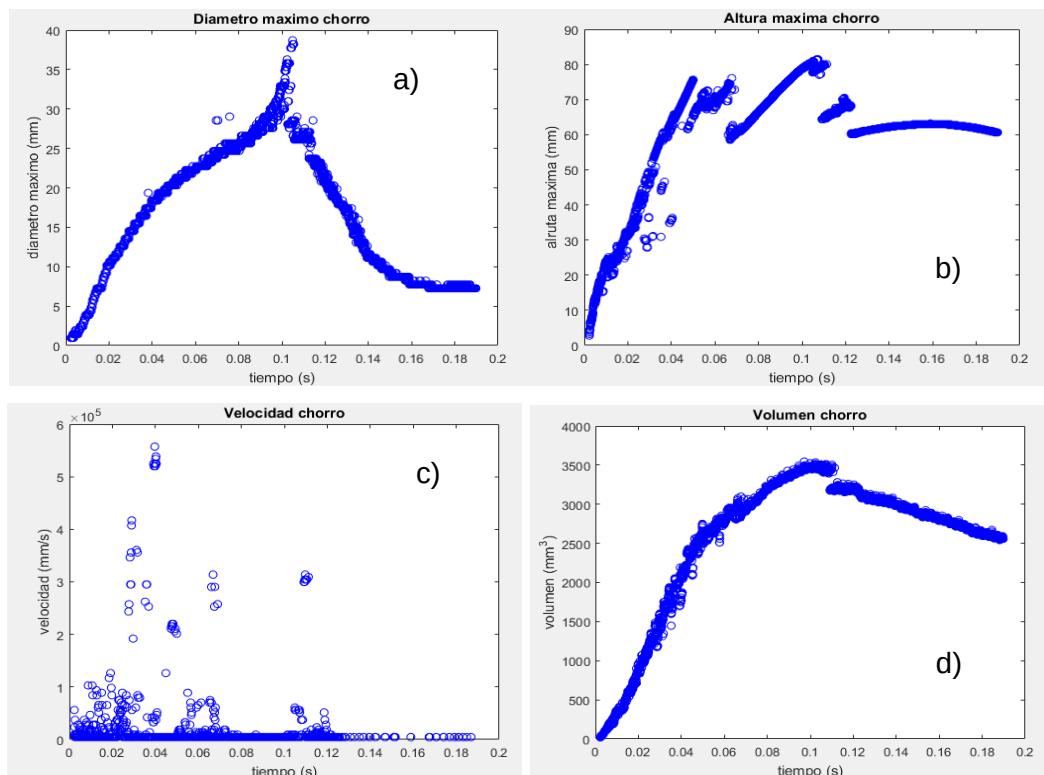


Ilustración 6.12 Ensayo 7 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

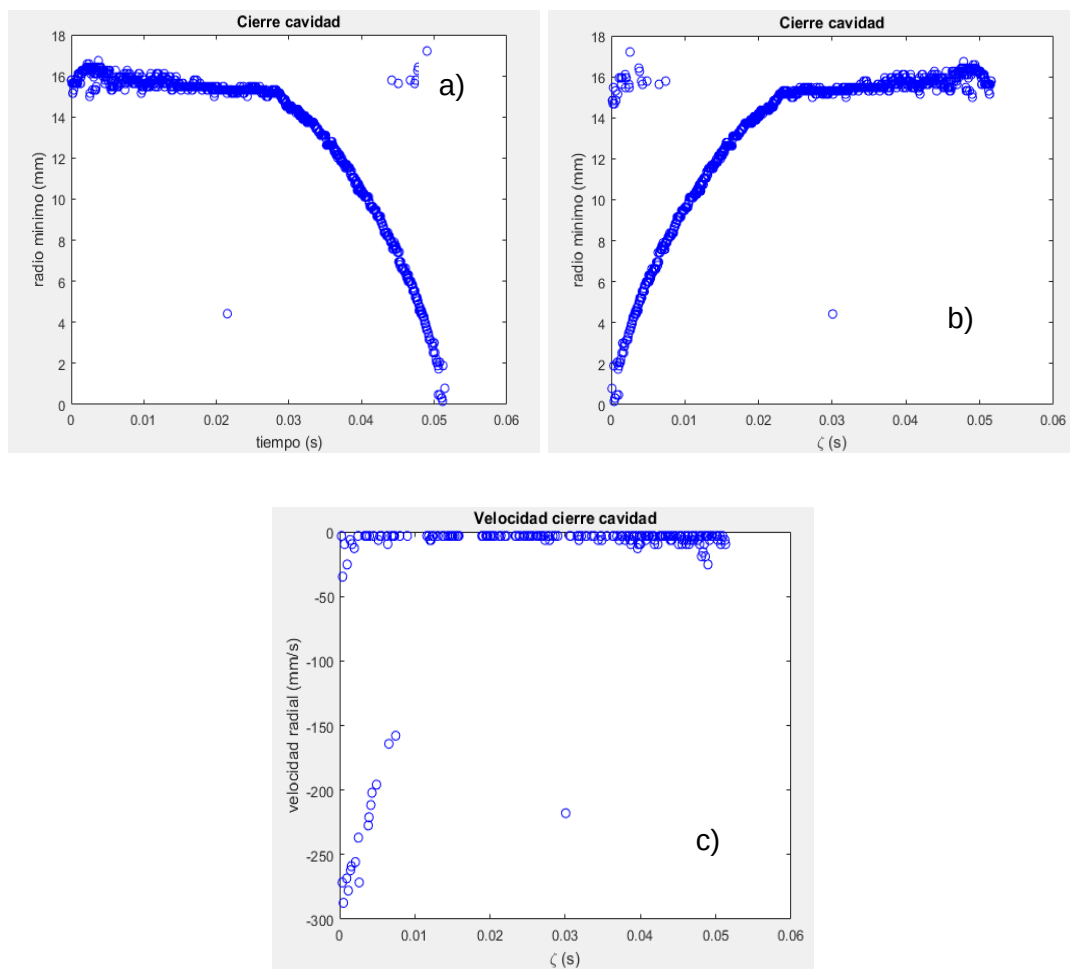


Ilustración 6.13 Ensayo 8, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

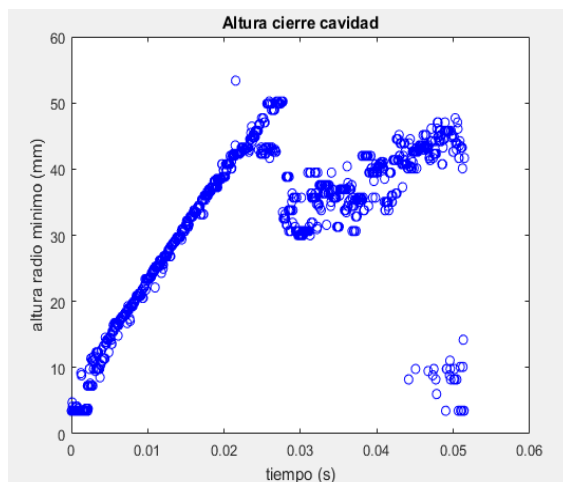


Ilustración 6.14 Ensayo 8 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

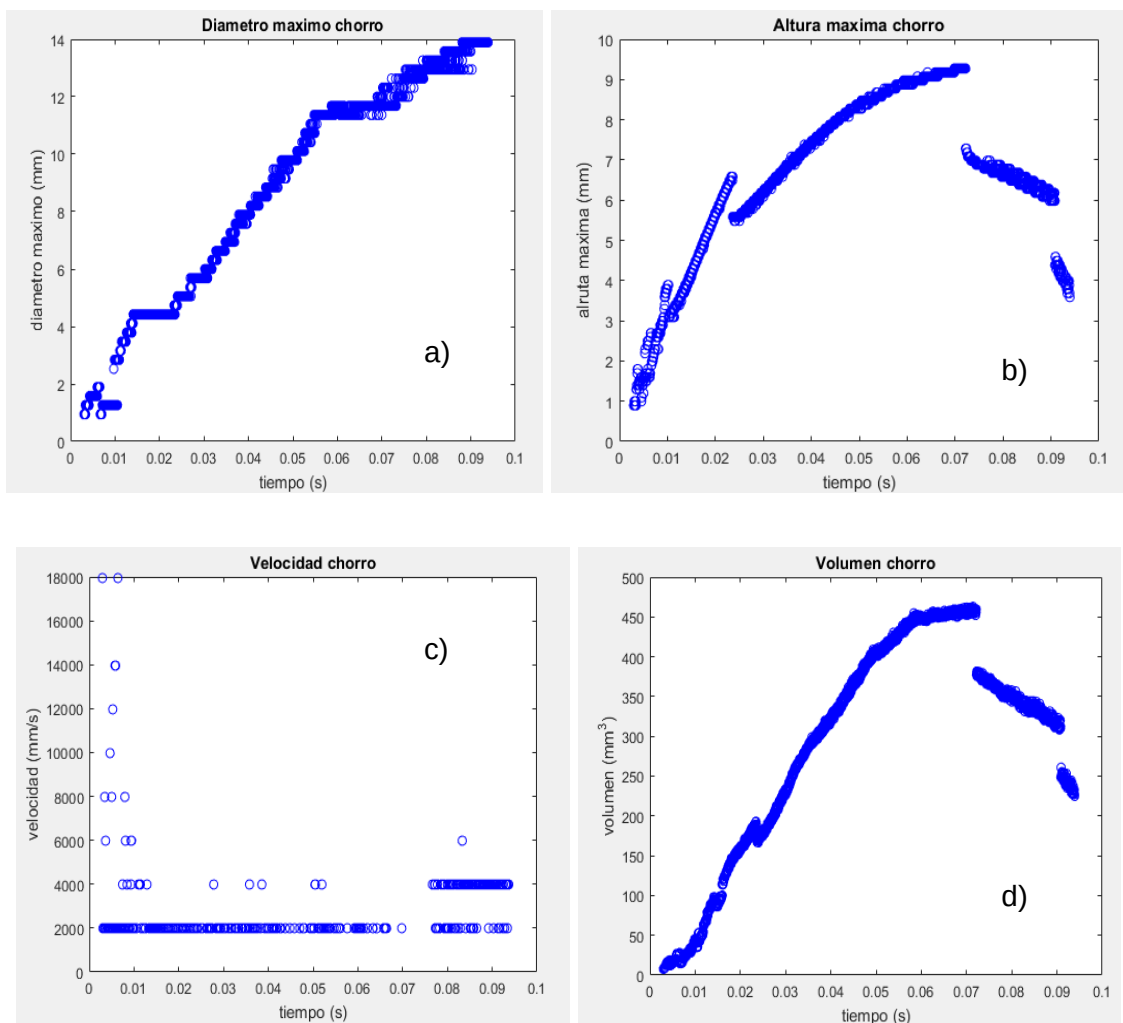


Ilustración 6.15 Ensayo 8 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

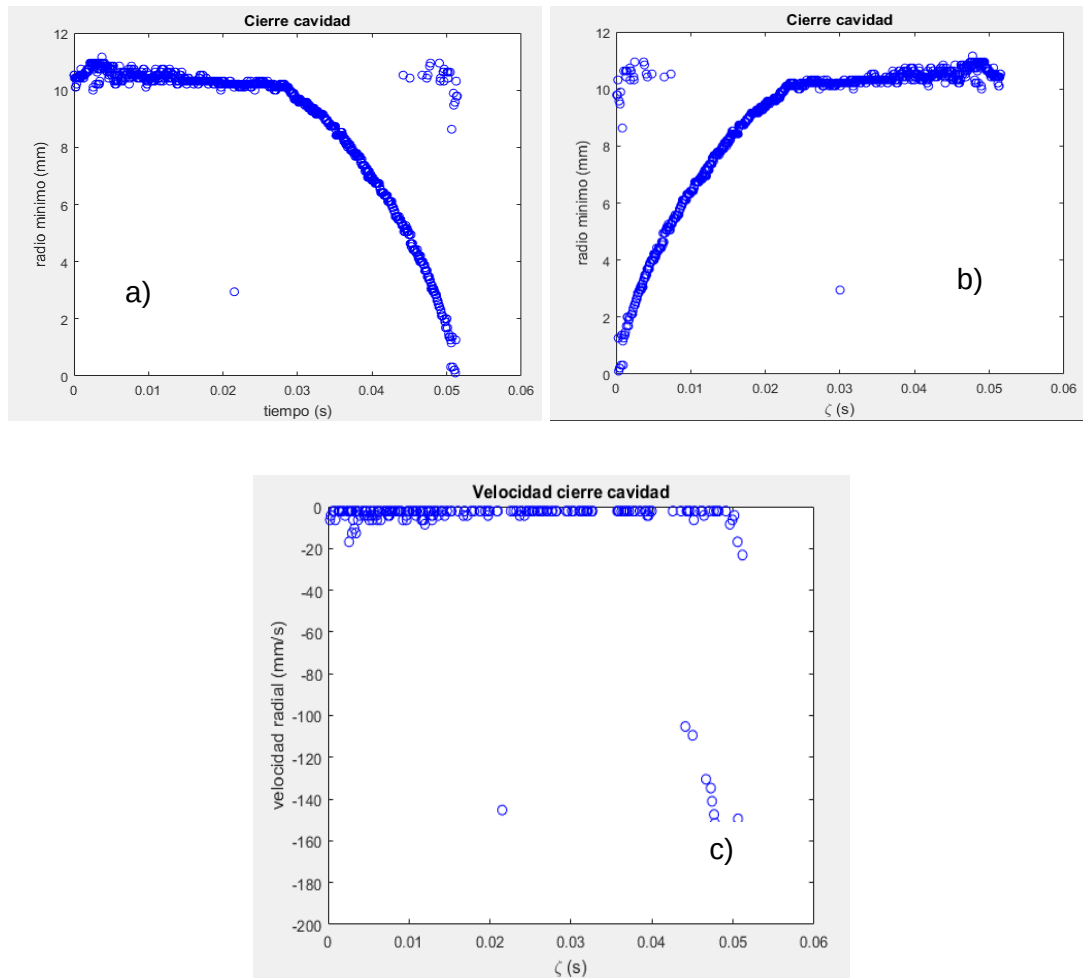


Ilustración 6.16 Ensayo 9, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

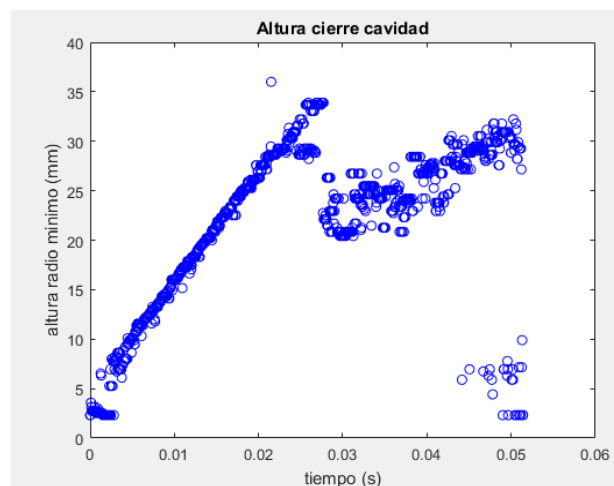


Ilustración 6.17 Ensayo 9 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

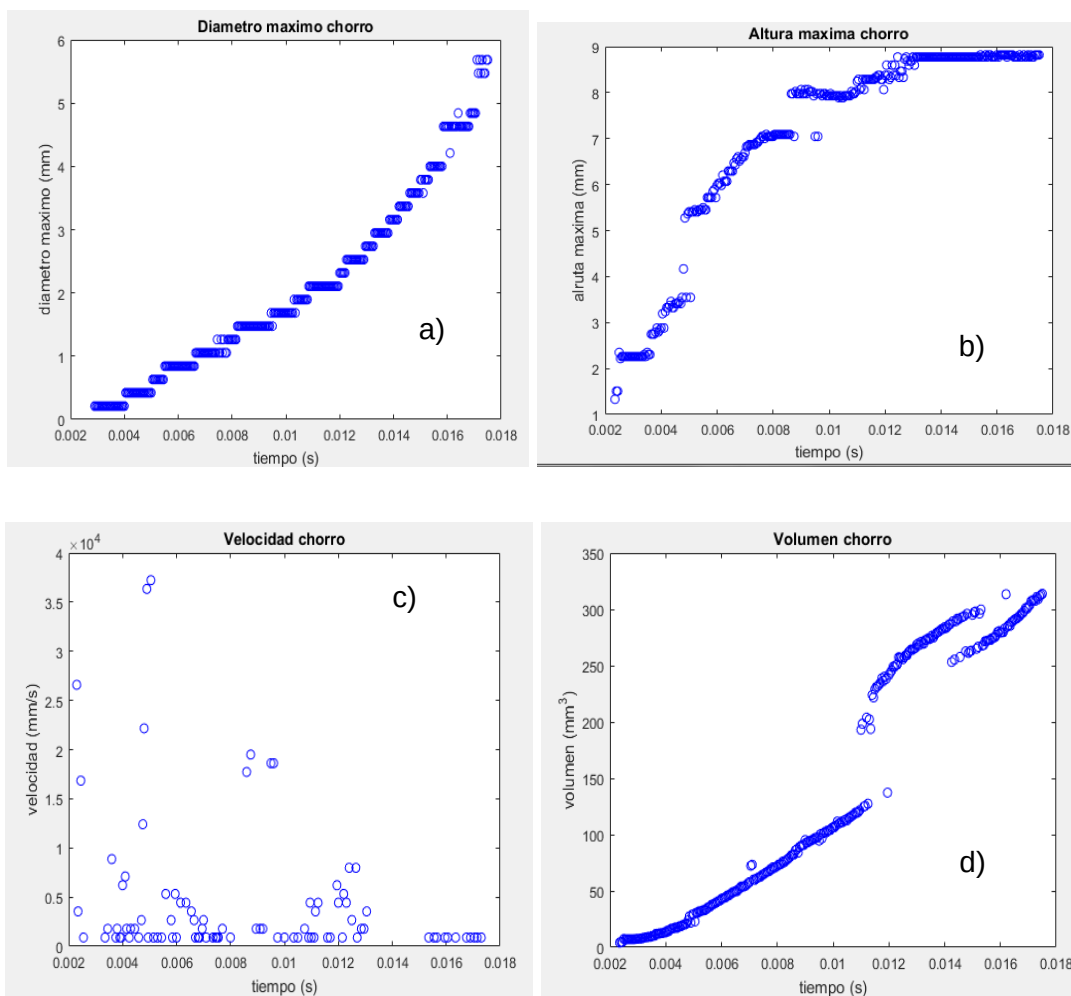


Ilustración 6.18 Ensayo 9 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

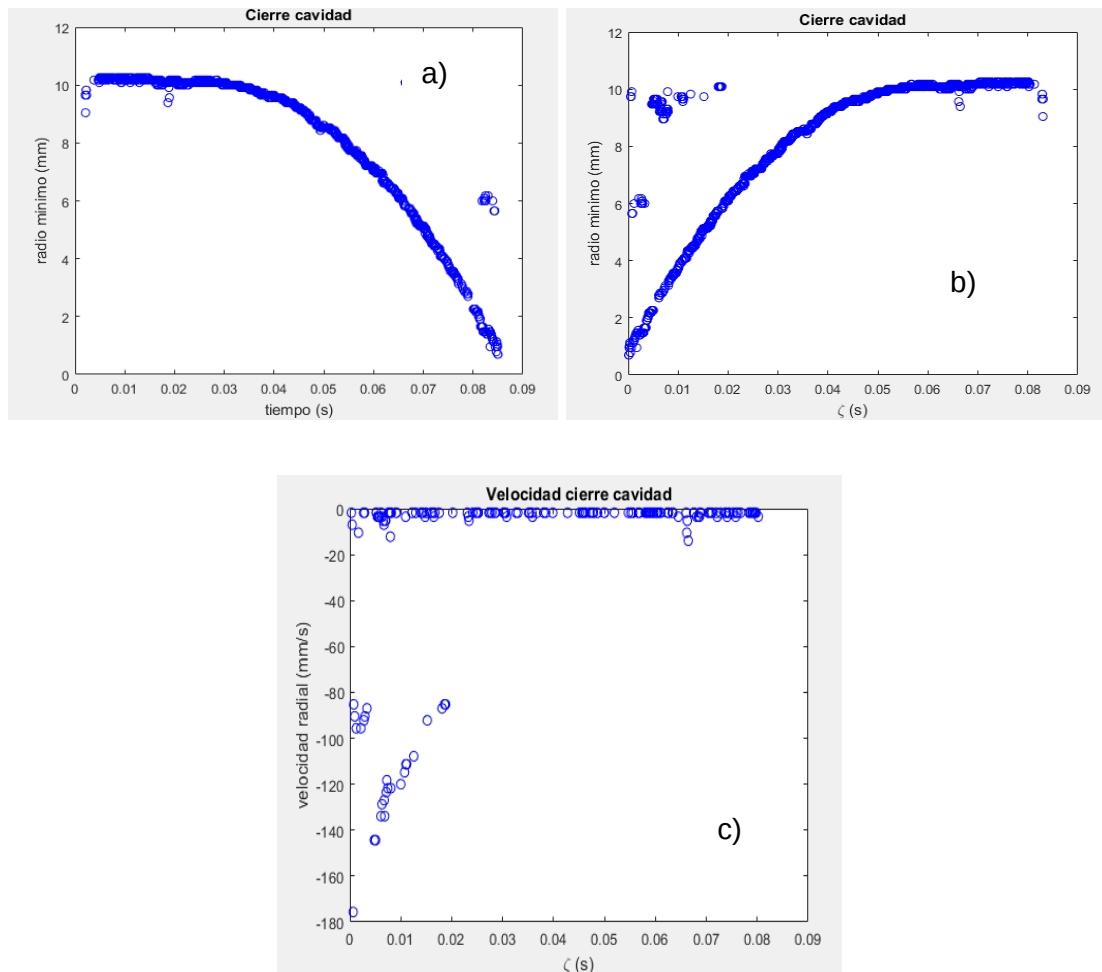


Ilustración 6.19 Ensayo 10, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

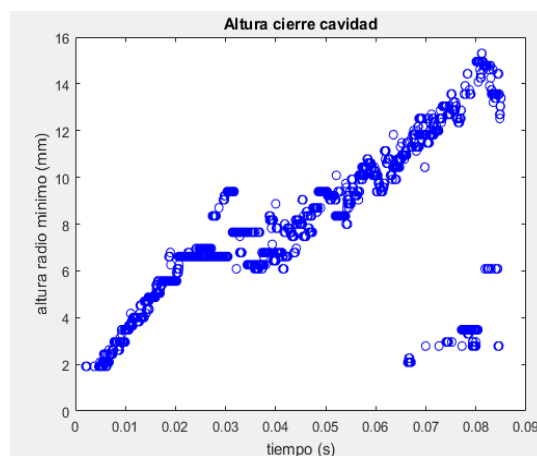


Ilustración 6.20 Ensayo 10 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

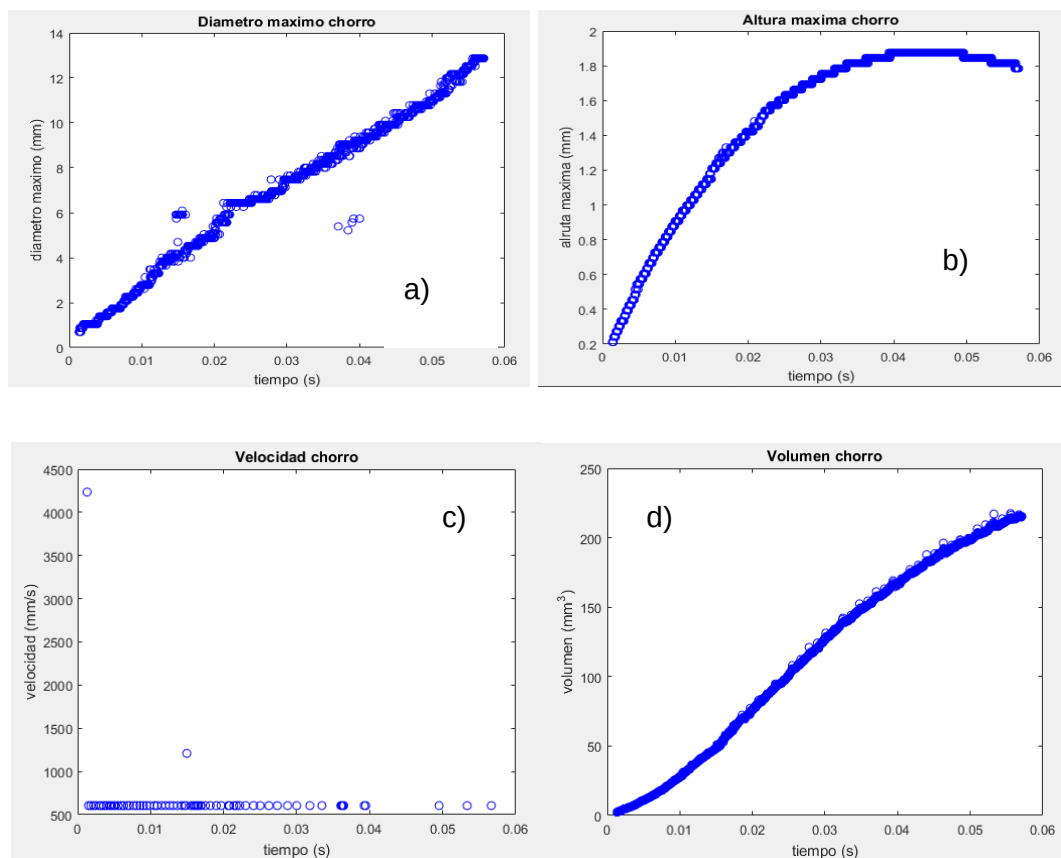


Ilustración 6.21 Ensayo 10 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

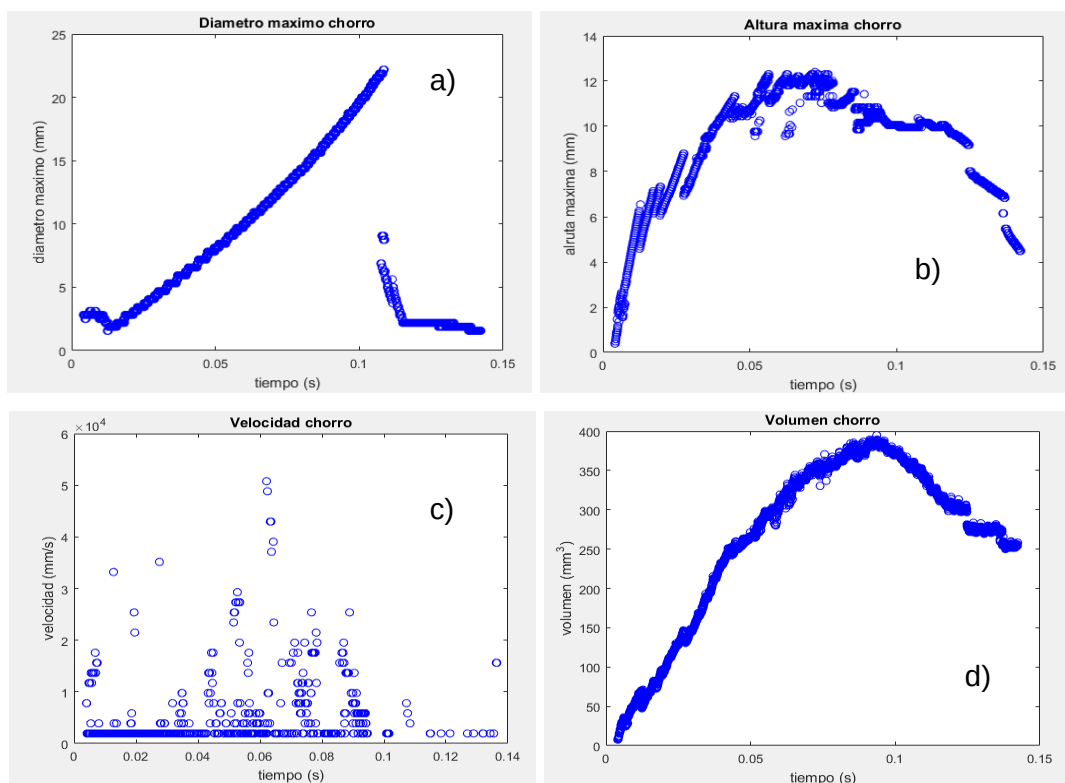


Ilustración 6.22 Ensayo 11 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

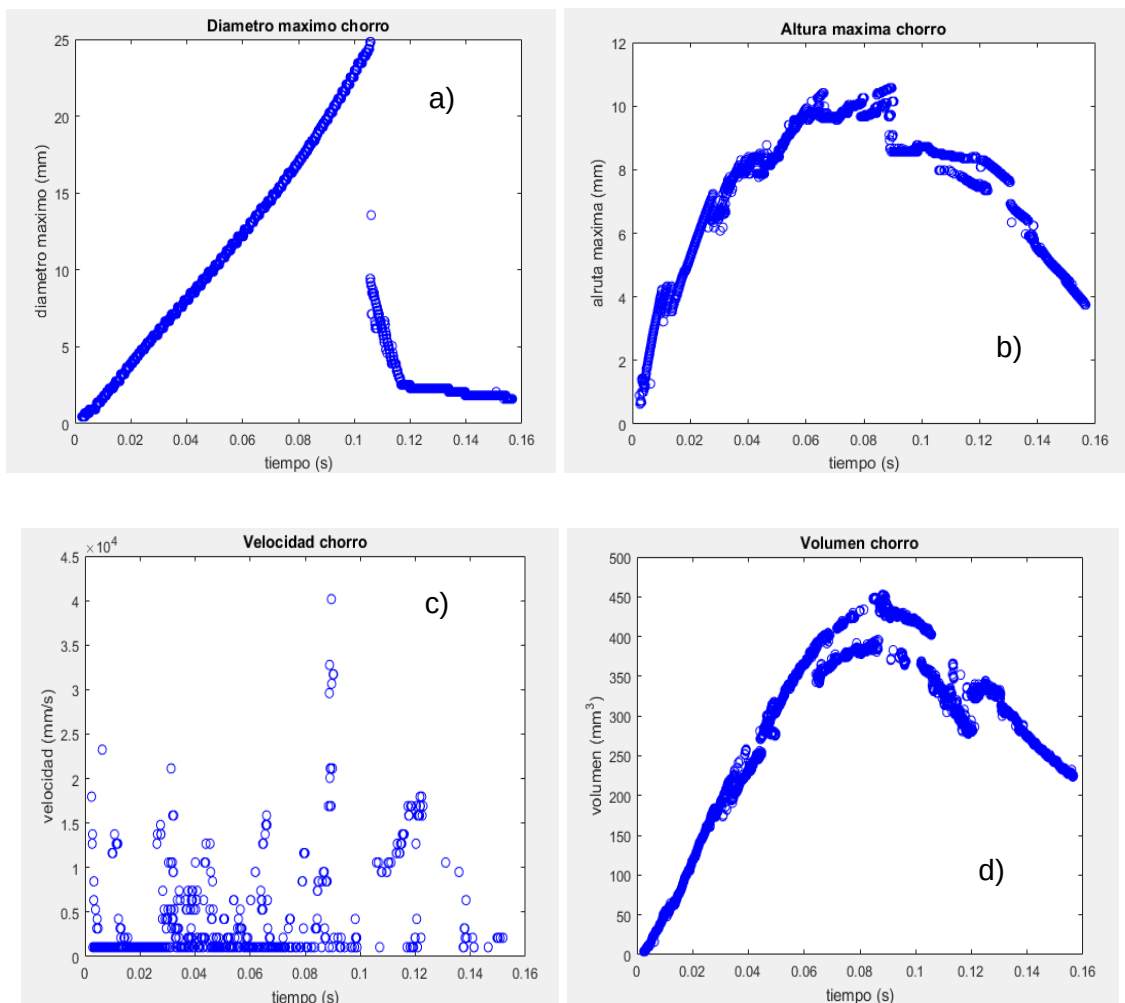


Ilustración 6.23 Ensayo 12 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

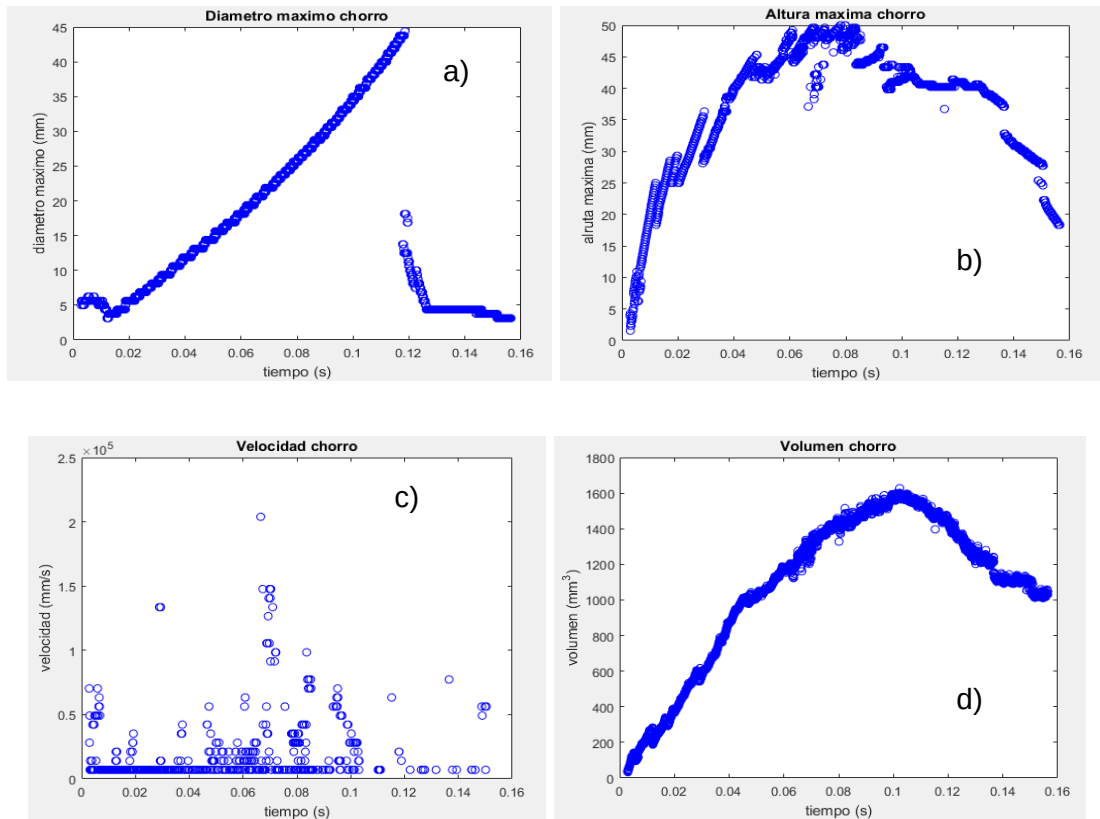


Ilustración 6.24 Ensayo 13 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

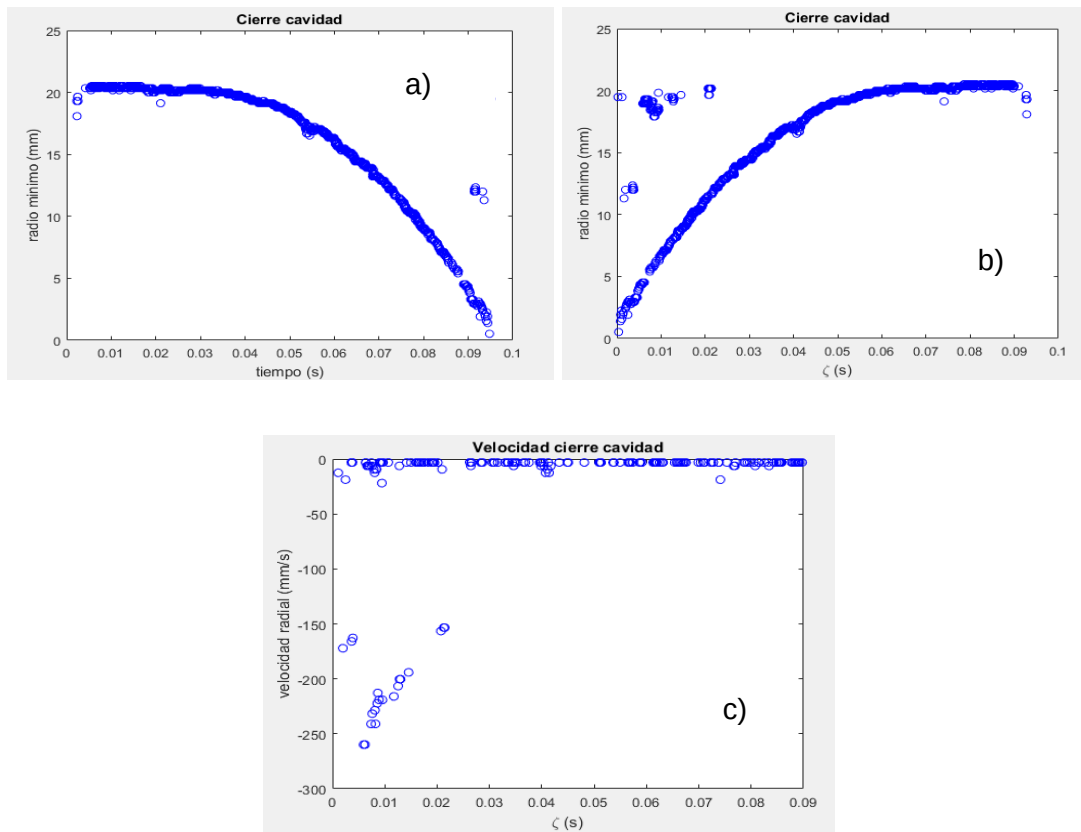


Ilustración 6.25 Ensayo 14, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

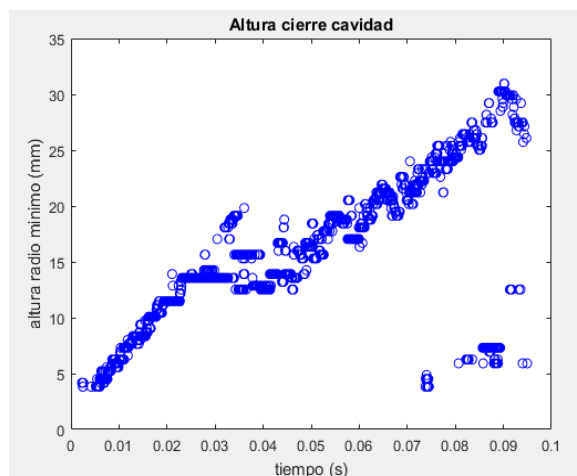


Ilustración 6.26 Ensayo 14 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

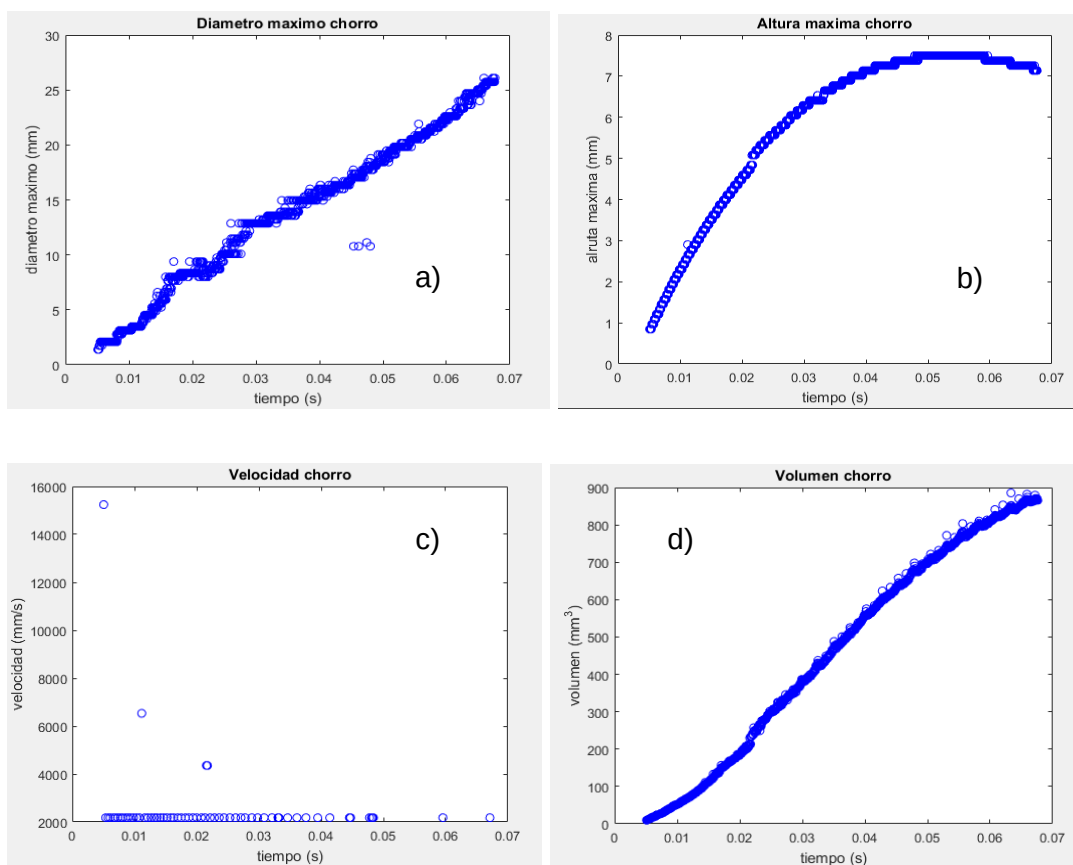


Ilustración 6.27 Ensayo 14 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

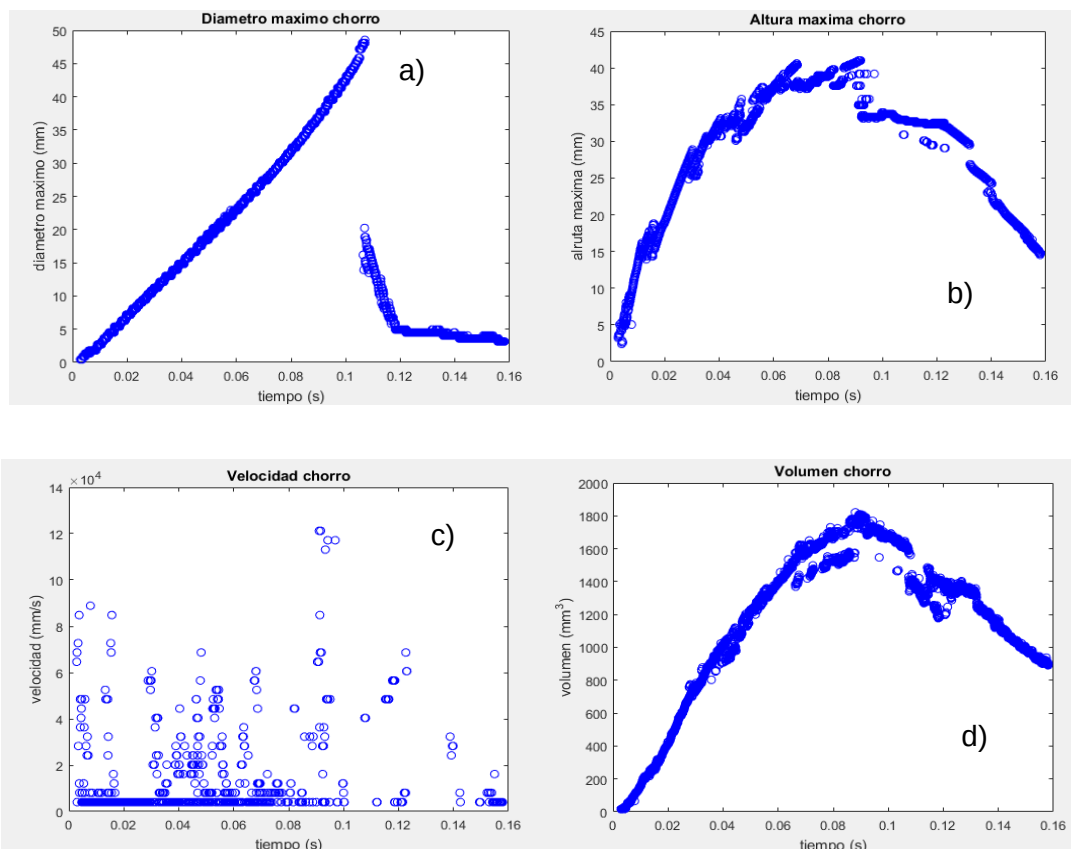


Ilustración 6.28 Ensayo 15 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

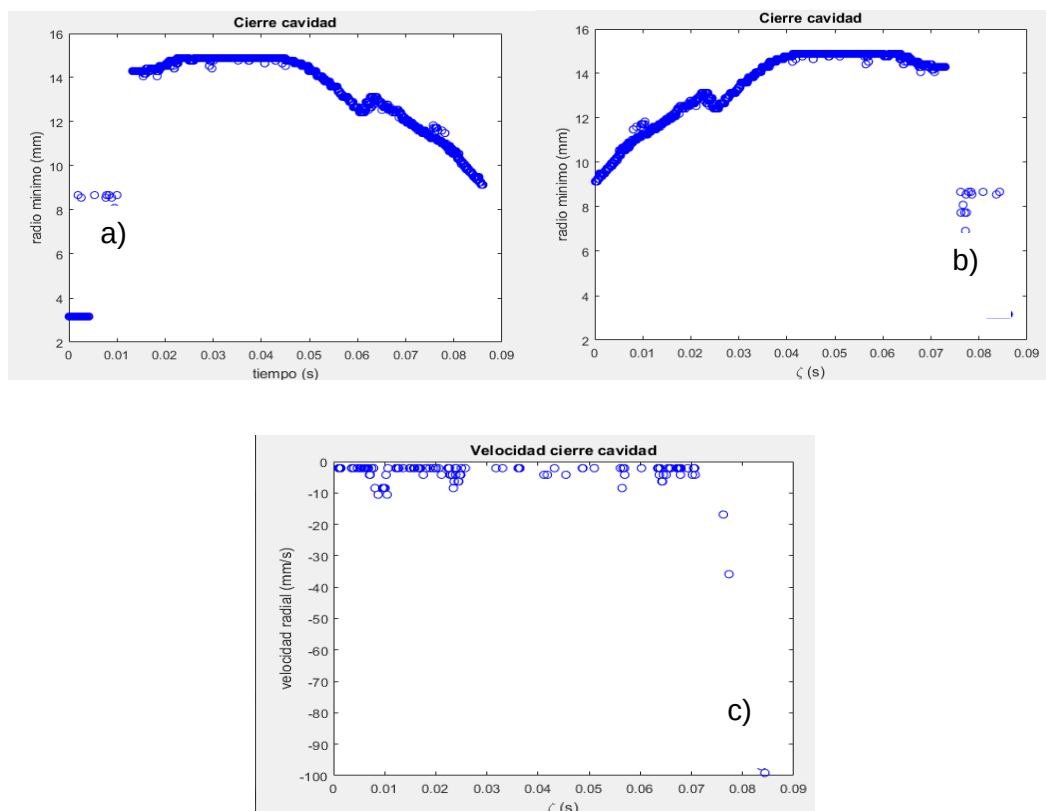


Ilustración 6.29 Ensayo 16, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

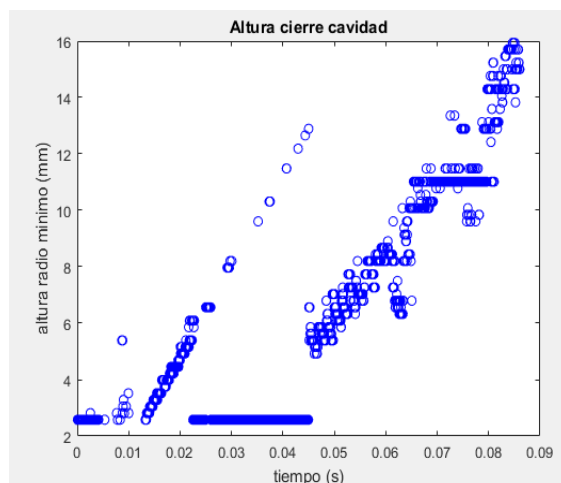


Ilustración 6.30 Ensayo 16 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

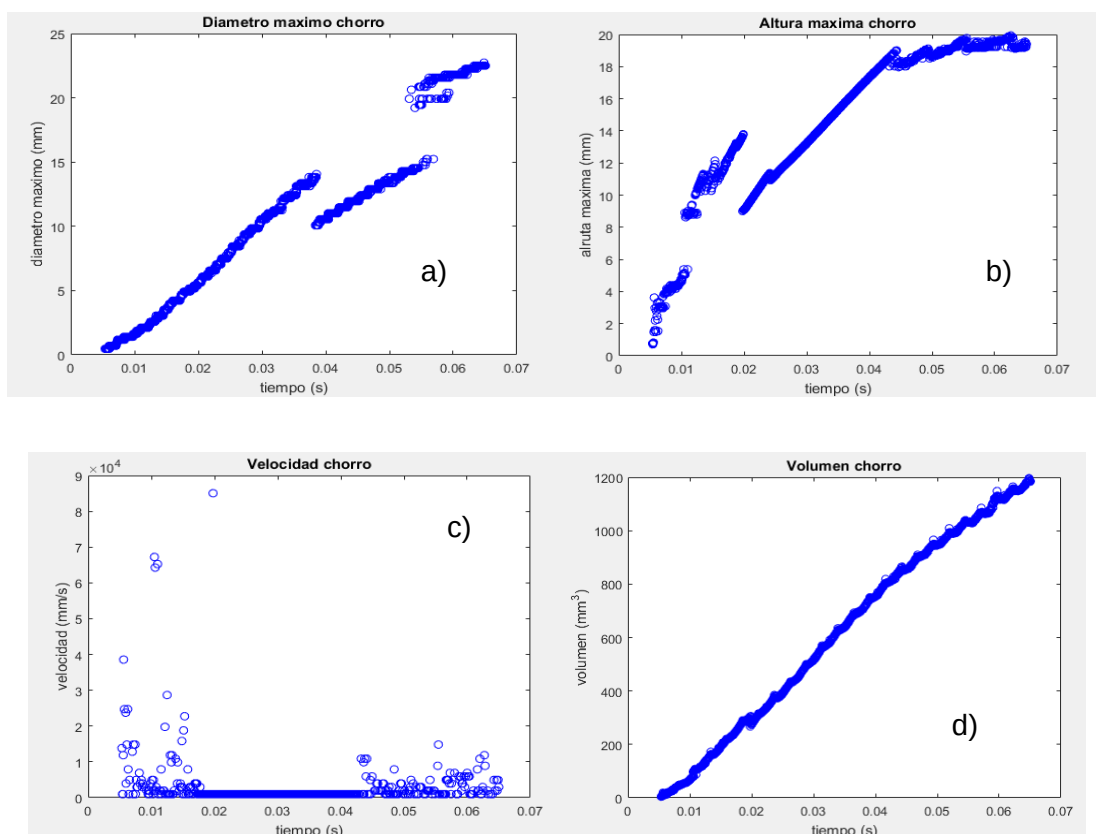


Ilustración 6.31 Ensayo 16 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

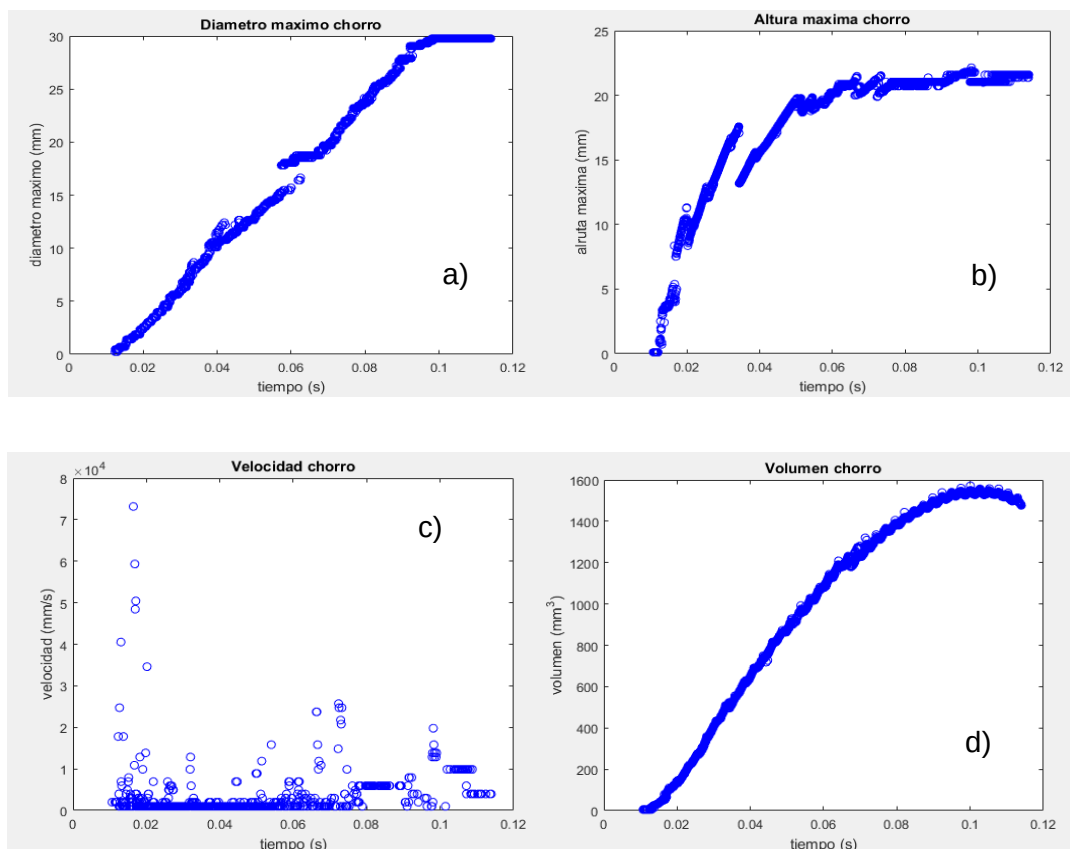


Ilustración 6.32 Ensayo 17 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

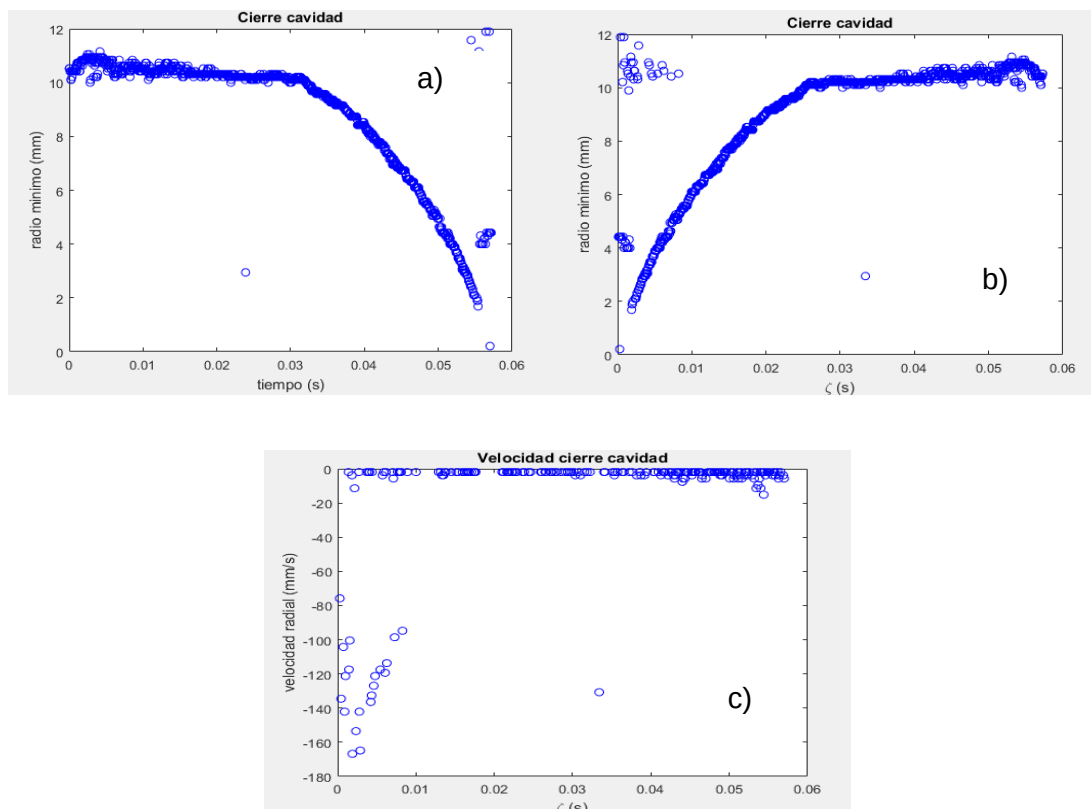


Ilustración 6.33 Ensayo 18, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

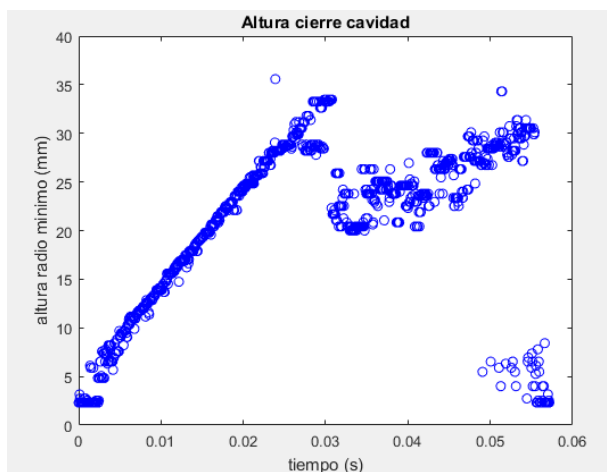


Ilustración 6.34 Ensayo 18 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

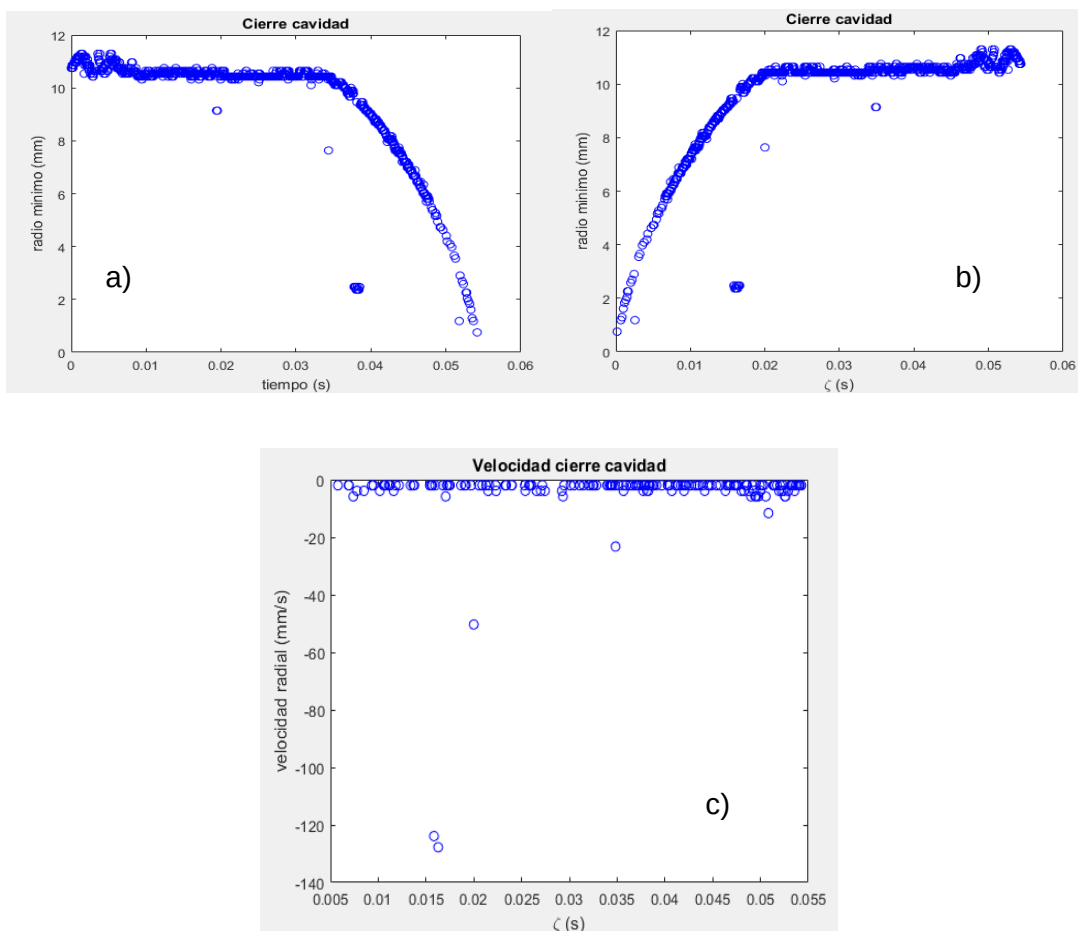


Ilustración 6.35 Ensayo 19, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

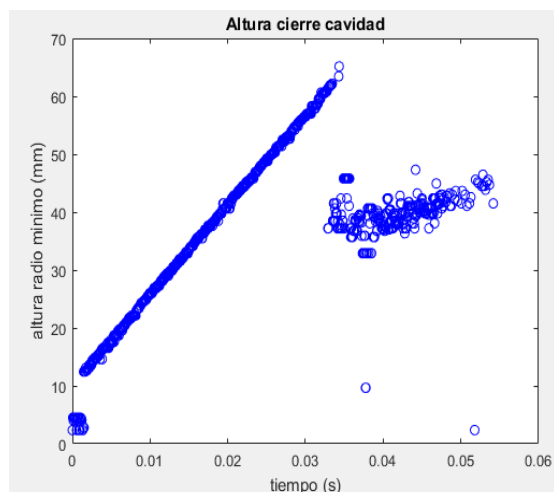


Ilustración 6.36 Ensayo 19 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

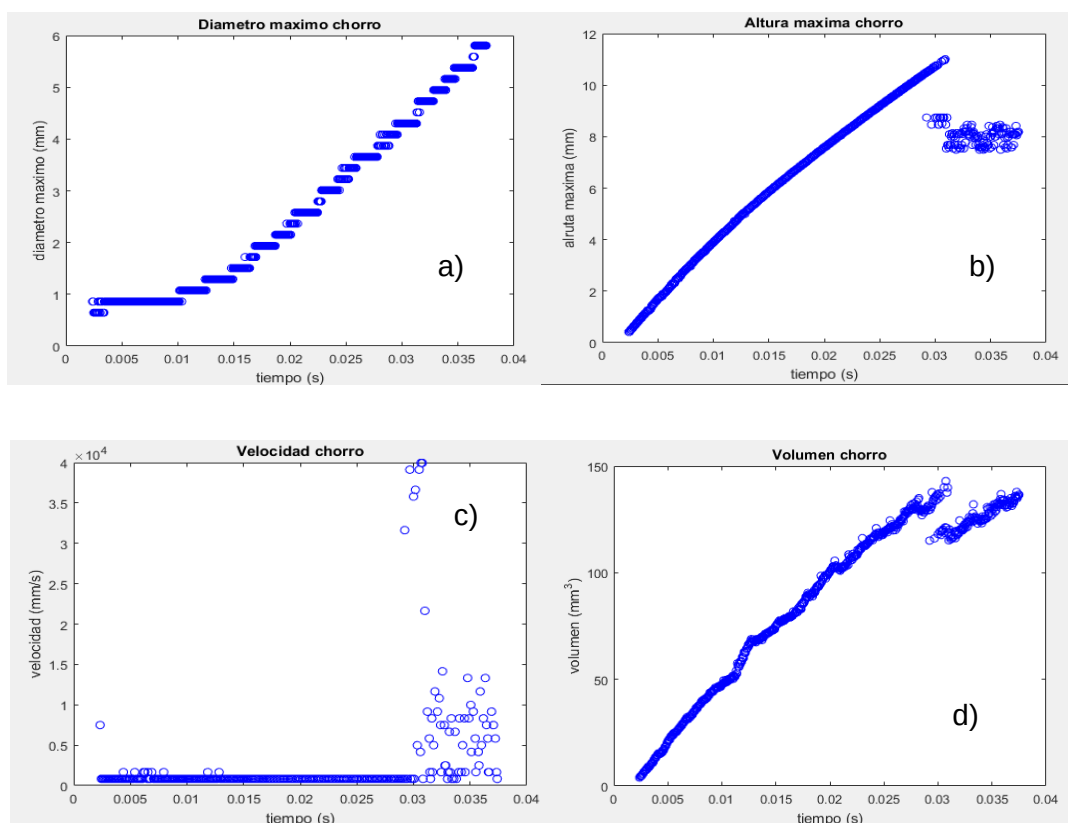


Ilustración 6.37 Ensayo 19 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

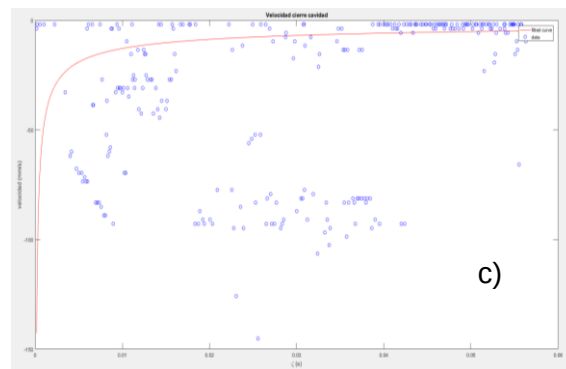
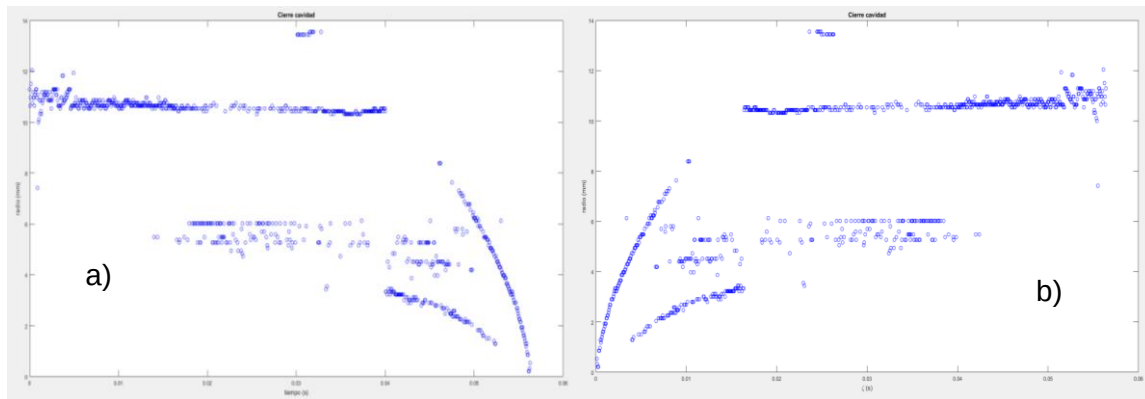


Ilustración 6.38 Ensayo 20, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

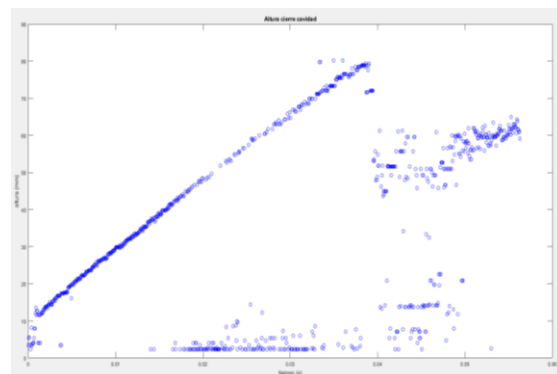


Ilustración 6.39 Ensayo 20 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

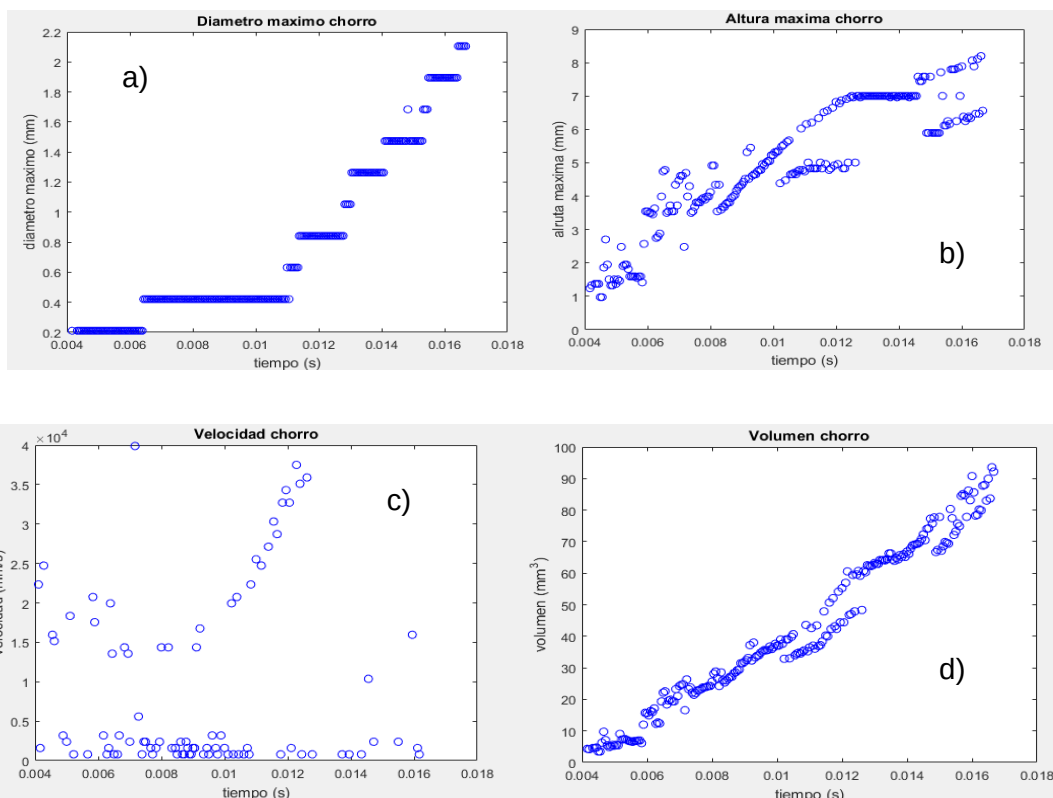


Ilustración 6.40 Ensayo 20 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

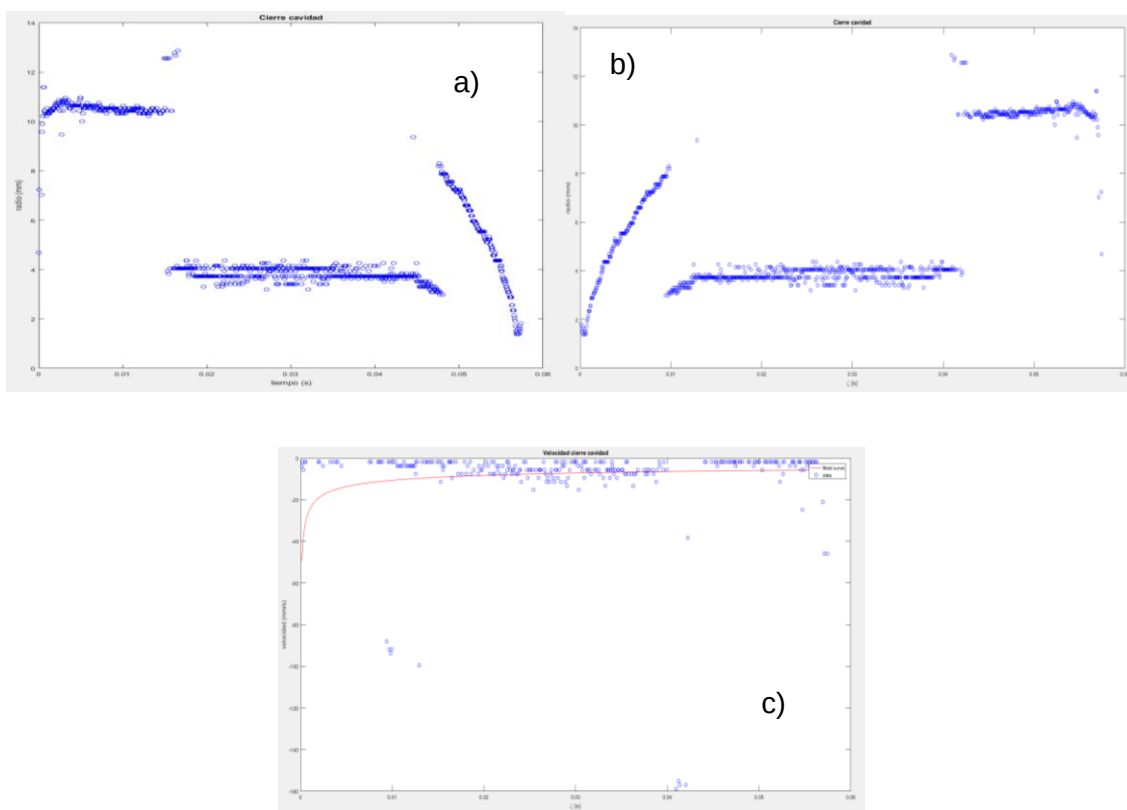


Ilustración 6.41 Ensayo 21, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

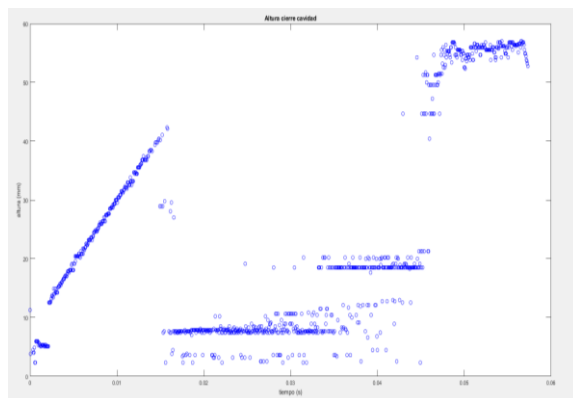


Ilustración 6.42 Ensayo 21 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

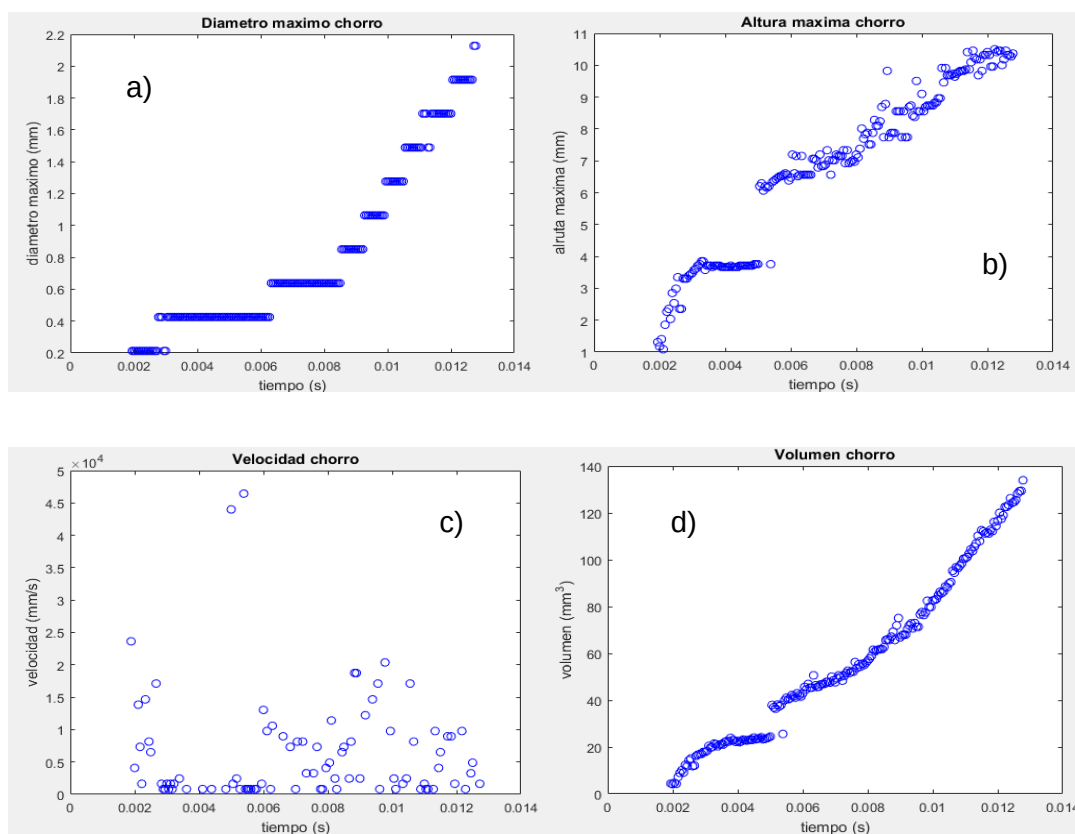


Ilustración 6.43 Ensayo 21 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.

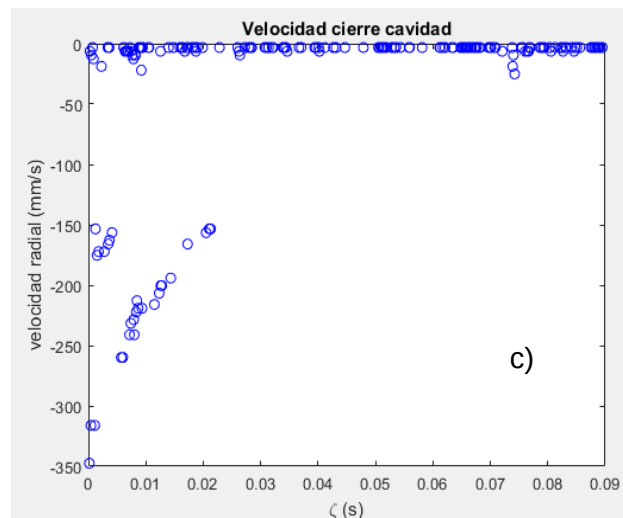
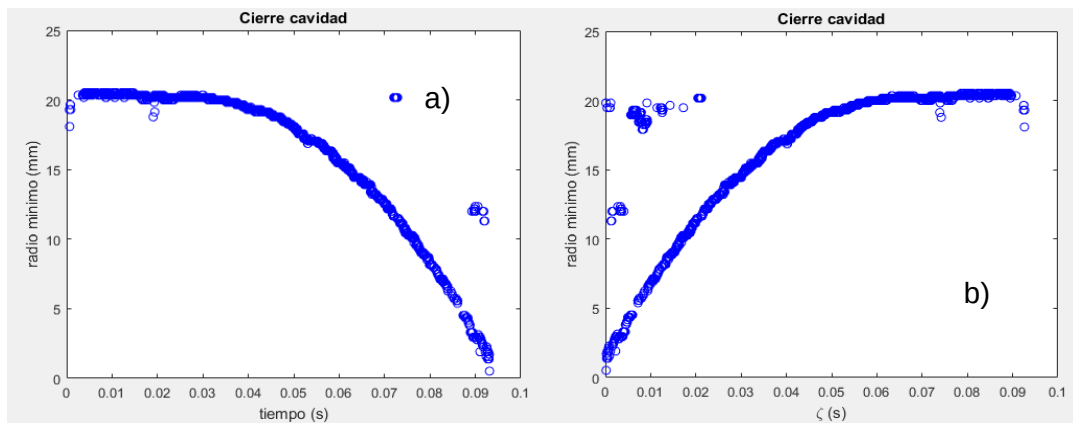


Ilustración 6.44 Ensayo 22, a) Radio mínimo frente al tiempo, b) Radio frente a τ , c) Velocidad cierre cavidad

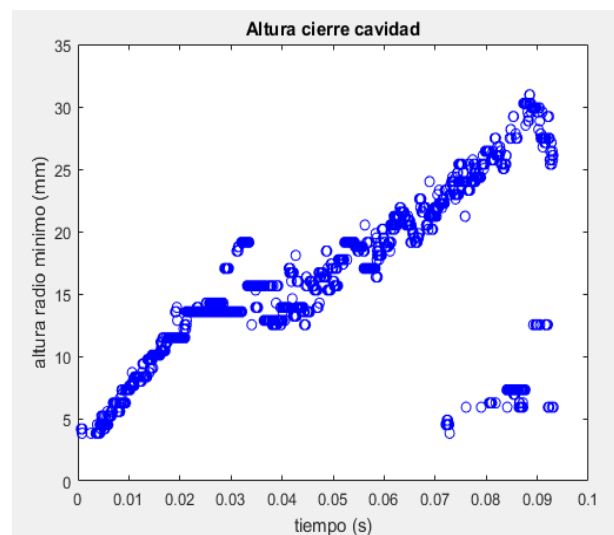


Ilustración 6.45 Ensayo 22 Altura del mínimo de la cavidad sobre la superficie libre del líquido.

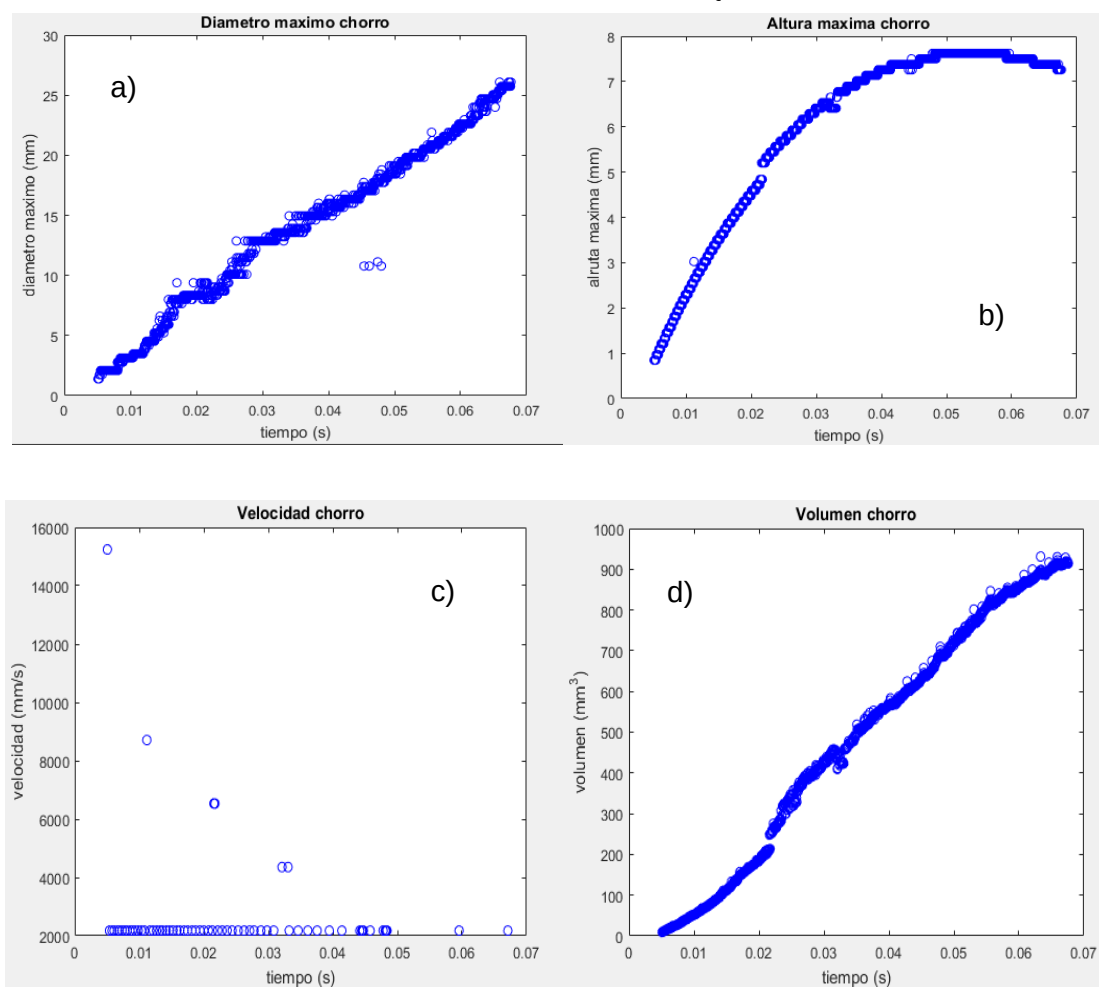


Ilustración 6.46 Ensayo 22 a) Diámetro mayor del chorro, b) Altura del chorro frente al tiempo, c) Velocidad crecimiento chorro y d) Volumen del chorro.