



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Grado

DEFORMACIÓN Y RUPTURA DE BURBUJAS EN PRESENCIA DE VORTEX RINGS

Alumno: Daniel Matarán Robles

Tutor: Prof. D. Cándido Gutiérrez Montes
Prof. D. Carlos Martínez Bazán

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2018



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

Don Cándido Gutiérrez Montes y Don Carlos Martínez Bazán , tutores del Trabajo Fin de Grado titulado: Deformación y ruptura de burbujas en presencia de vortex rings, que presenta Daniel Matarán Robles, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Noviembre de 2018

El alumno:

Los tutores:

Daniel Matarán Robles

Cándido Gutiérrez Montes

Carlos Martínez Bazán

Índice

<i>Prólogo</i>	10
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	11
2. ANÁLISIS TEÓRICO	16
2.1. Vórtices.....	16
2.1.1 Esquema	16
2.1.2 Descripción Euleriana.....	16
2.1.3. Análisis de flujo potencial. Función de corriente.	19
2.1.4 Análisis de anillos de vorticidad en forma integral	19
2.1.5 Anillos de vorticidad Lamb-Oseen	21
2.2 Burbujas	23
2.2.1 Ascenso	24
2.2.2 Formación	26
2.2.3 Parámetros característicos	27
2.3 Interacción	32
3. MÉTODO	34
3.1 Variables.....	34
3.1.1 Presión de entrada	34
3.1.2 Tiempo de apertura de la electroválvula	35
3.1.3 Diámetro de salida de la tobera.	36
3.2 Análisis dimensional	37
3.2.1 Parámetro adimensional 1. Circulación, Velocidad de avance y Diámetro de salida.	38
3.2.2 Parámetro adimensional 2. Circulación, presión de descarga y tiempo de apertura.	38
3.2.3 Parámetro adimensional 3. Numero de Reynolds.....	39
4. INSTALACIONES.....	40
4.1 Recinto	40
4.1.1 Banco de ensayos metálico nivelable.	40
4.1.2 Estructura de perfiles <i>fasten</i>	41
4.1.3 Mesa de trabajo.....	42
4.1.4 Urna	42
4.2 Agua	43
4.2.1 Componentes	43
4.2.2 Funciones.....	47

4.3 Aire	50
4.4 Control	51
4.4.1 Componentes	51
4.1.2 Funciones	55
4.5 Sistema de velocimetría	56
4.5.1 Sistema de adquisición de imágenes	56
4.5.2 Laser	59
4.5.3 CPU y hardware de sincronización	61
5. TÉCNICA DE VELOCIMETRÍA	68
5.1 Principio	68
5.2 Partículas trazadoras	69
5.3 Iluminación	71
5.4 Procesado	73
5.5 Análisis de los resultados	76
6. EXPERIMENTOS	79
6.1 Árbol de casos.	79
6.2 Calibrado	79
6.2.1 Cámara	79
6.2.2 Laser de pulsos	80
6.3 Homogeneidad	82
7. POSTPROCESADO	82
8. CONCLUSIONES	84
9. TRABAJOS FUTUROS	92
9.1 Mejoras en de automatización del sistema hidráulico/neumático.	92
9.2 Estudio de pseudotransitoriedades	94
9.3 Análisis de interacción anillo de vorticidad-burbuja.	95
ANEXO I: Planos	96
a. Esquema de la instalación hidráulica/neumática	97
b. Circuito de control	98
c. Urna	99
d. Tobera de salida de 10 mm	100
e. Tobera de salida de 15.55 mm	101
ANEXO II: Graficas	102
a. Tobera 20 mm	102
b. Tobera 15.55 mm	109
c. Tobera 10 mm	112

d. Variando el diámetro de la tobera	114
ANEXO III: Códigos.....	116
a. Script para MATLAB.	116
b. Arduino	119
1. Control para accionar con pulsador.	119
2. Control accionado por la sonda de burbuja.	121
Bibliografía	123

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1.1 Calle de vórtices de Von Kármán (izquierda). Una gloria y una calle de vórtices en la zona meridional de la Península de Baja California (derecha), (Wikipedia, s.f.).	11
Ilustración 1.2 Momento de creación de una burbuja de aire en la urna durante un experimento (autor).	12
Ilustración 1.3 Helicóptero con aspersores de agua para visualizar las líneas de corriente durante <i>vortex ring state</i> , (AERIALSTAGE, s.f.).	13
Ilustración 1.4 Generadores de vórtices del ala delantera de un F1 (izquierda). Vórtices saliendo del ala trasera (derecha).	13
Ilustración 1.5 Aerodinámica de un Formula 1.	14
Ilustración 1.6 Esquema de la generación de vórtices realizada en el laboratorio	15
Ilustración 2.1 Esquema de anillo de vorticidad	16
Ilustración 2.2 Anillo de vorticidad en coordenadas cilíndricas. (Akhmetov, 2009).	18
Ilustración 2.3 Sección transversal de anillo Lamb-Oseen (Akhmetov, 2009)	21
Ilustración 2.4 Esquema de la variación del radio en ascenso de una burbuja (Linares Ureña, 2017).	24
Ilustración 2.5 Esquema de formación de burbuja (Simmons, Sprittles, & Shikhmurzaev, 2015).	26
Ilustración 2.6 Esquema de esfuerzos en la formación de burbujas (Inaipil Leal, 2015)	27
Ilustración 2.7 Características de la trayectoria seguida por una burbuja en función de Mo , Bo , Ga , St (Martínez Bazán & Cano-Lozano, 2016)	30
Ilustración 2.8 Geometría de la burbuja en función del <i>Reynolds</i> y <i>Eotvos</i> (Inaipil Leal, 2015)	31
Ilustración 3.1 Manómetro/purgador de la instalación (autor)	35
Ilustración 3.2 Placa <i>Arduino UNO</i> y placa <i>proto board</i> del laboratorio (autor)	35
Ilustración 3.3 Electroválvula de apertura (Linares Ureña, 2017).	36
Ilustración 3.4. Tobera de salida (izquierda). Boquillas de 10 mm y 15.55 mm (derecha). (autor)	37
Ilustración 4.1 Banco de ensayos (autor)	40
Ilustración 4.2 Estructura de perfiles <i>fasten</i> (autor).	41
Ilustración 4.3 Mesa con el puesto de trabajo (autor)	42
Ilustración 4.4 Urna (Linares Ureña, 2017).	43
Ilustración 4.5 Deposito presurizado (autor)	44
Ilustración 4.6 <i>Legrís</i> de 4 x 6, 8 x 5.5 y 8 x 1 respectivamente (autor).	44
Ilustración 4.7 Conjunto de electroválvula, codo 90°, conducto de salida y purgador. (Linares Ureña, 2017)	45
Ilustración 4.8 Purgador, codo 90° y conducto de salida, de izquierda a derecha. (Linares Ureña, 2017)	45
Ilustración 4.9 Soporte de calibración y sistema de aplomado. (Autor).	46
Ilustración 4.10 Válvula manual (autor)	47
Ilustración 4.11 Instalación hidráulica. (autor).	47
Ilustración 4.12 Salida de aire para la generación de burbujas (autor)	50
Ilustración 4.13 Regulador de caudal utilizado para la generación de burbujas (izquierda).	51
Ilustración 4.14 Esquema de entradas/salidas Arduino UNO R3 (Aprendiendo arduino, s.f.)	52

Ilustración 4.15 Relé compatible con Arduino (Sitio oficial de Arduino, s.f.)	53
Ilustración 4.16 Detector fotoeléctrica <i>XUBLANCNL2</i> (fabricante).....	54
Ilustración 4.17 Emisor (izquierda) y receptor (derecha) del detector ya instalado (autor)	54
Ilustración 4.18 Fuente de alimentación para la sonda de burcuja (autor)	55
Ilustración 4.19 Pulsador utilizado para puentear la sonda.....	55
Ilustración 4.20 Esquema de la instalación (TSI, 2012)	56
Ilustración 4.21 Cámara TSI con objetivo NIKON AF NIKKOR 35/F2D utilizados para las capturas (autor)	57
Ilustración 4.22 Imagen de calibración y detalle ampliado de parte de la zona utilizada para el enfoque.	58
Ilustración 4.23 Imagen corporativa del láser del laboratorio y tabla de características (Litron Lasers, s.f.)	59
Ilustración 4.24 Brazo articulado (autor)	59
Ilustración 4.25 Unidad de control de temperatura y conexionado configurados para controlar desde el software (autor).....	60
Ilustración 4.26 Unidad de control del láser (autor).....	61
Ilustración 4.27 Unidad de sincronización 610035 de TSI (autor)	61
Ilustración 4.28 Imagen corporativa del software <i>INSIGHT 3G</i>	62
Ilustración 4.29 <i>Insight 3G. Hardware setup</i> (autor).....	62
Ilustración 4.30 <i>Insight 3G. Component setup – General</i> (autor)	63
Ilustración 4.31 <i>Insight 3G. Component setup – Laser</i> (autor).....	63
Ilustración 4.32 <i>Insight 3G. Component setup - Cámara CCD</i> (autor)	64
Ilustración 4.33 <i>Insight 3G. Component setup – Sincronizador</i> (autor)	64
Ilustración 4.34 <i>Insight 3G. Timing setup</i> (autor)	65
Ilustración 4.35 <i>Insight 3G. Ampliación del diagrama temporal para ver los dos pulsos del láser</i> (autor).....	66
Ilustración 4.36 <i>Insight 3G. Ampliación del diagrama temporal en el que se aprecia el primer pulso y el cierre y apertura del obturador de la cámara</i> (autor).....	66
Ilustración 4.37 Pantalla principal de <i>Insight 3G</i> (autor).....	67
Ilustración 5.1 Diagrama de Mie. Esquema de dispersión de la luz en escala logarítmica. (Linares Ureña, 2017)	70
Ilustración 5.2 Partículas mezcladas antes de añadir a la urna (izq.). Imagen de las partículas tomadas con el sistema PIV (drcha.) (autor)	71
Ilustración 5.3 Combinaciones convergentes y divergentes para obtener el haz de luz deseado (Pérez Vidal, 2016)	72
Ilustración 5.4 Configuración de las lentes para formar el plano y obtener la mayor potencia a la distancia deseada. (Linares Ureña, 2017)	72
Ilustración 5.5 Configuración de lentes en la salida del láser (autor)	72
Ilustración 5.6 Imagen sin procesar (izquierda) dos procesados diferentes (centro y derecha) (autor)	73
Ilustración 5.7 <i>PIVlab</i> . Ventanas de cálculo (autor)	74
Ilustración 5.8 <i>PIVlab</i> . Calibración (autor).....	75
Ilustración 5.9 Vectores de velocidad obtenidos (autor).....	76
Ilustración 5.10 Grafica estadística de la velocidad absoluta (autor).....	76
Ilustración 5.11 Vectores velocidad con rangos cromáticos para la velocidad absoluta y detalle de la zona más significativa (autor).....	77
Ilustración 5.12 Vectores velocidad con rangos cromáticos para la vorticidad con detalle de la zona más significativa (autor)	78

Ilustración 6.1 Cabezal del láser orientado hacia la zona de análisis (autor)	80
Ilustración 6.2 Par de imágenes donde se puede observar la diferencia de iluminación. (autor)	81
Ilustración 7.1 Imagen obtenida con la con la orden <i>quiver</i> para establecer la posición (autor)	83
Ilustración 7.2 Diámetro del vórtice, circulación y posición; todos con respecto al tiempo (autor)	83
Ilustración 8.1 Tobera de 20 mm. Presión 3 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	86
Ilustración 8.2 Tobera 20 mm. Tiempo de apertura 80 ms. Circulación variando la presión del depósito	87
Ilustración 8.3 Circulación un tiempo de apertura de 40 ms y una presión de 3 bar, variando el diámetro salida.	88
Ilustración 8.4 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura.	89
Ilustración 8.5 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura.	89
Ilustración 8.6 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Avance del vórtice para diferentes tiempos de apertura.....	90
Ilustración 9.1 Sensor de presión <i>OPEN-SMART</i> (Lualtec.es, s.f.).....	92
Ilustración 9.2 Caudalímetro YF-S201 (Flux Work Shop, s.f.).....	93
Ilustración 0.1 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	102
Ilustración 0.2 Tobera de 20 mm. Presión 5 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	102
Ilustración 0.3 Tobera de 20 mm. Presión 4 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	103
Ilustración 0.4 Tobera de 20 mm. Presión 3 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	103
Ilustración 0.5 Tobera de 20 mm. Presión 2 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	104
Ilustración 0.6 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Evolucion del diametro del vortice para diferentes tiempos de apertura.	104
Ilustración 0.7 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Avance del vórtice para diferentes tiempos de apertura.....	105
Ilustración 0.8 Tobera 20 mm. Tiempo de apertura 80 ms. Circulación variando la presión del depósito	105
Ilustración 0.9 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura.	106
Ilustración 0.10 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura.....	106
Ilustración 0.11 Tobera de 20 mm. Presión 3 bar. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura.....	107
Ilustración 0.12 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura.....	107
Ilustración 0.13 Tobera de 20 mm. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura y presión.	108

Ilustración 0.14 Tobera de 20 mm. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura y presión	108
Ilustración 0.15 Tobera de 15.55 mm. Presión 5.8 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	109
Ilustración 0.16 Tobera de 15.55 mm. Presión 5 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	109
Ilustración 0.17 Tobera de 15.55 mm. Presión 4 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	110
Ilustración 0.18 Tobera de 15.55 mm. Presión 3 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	110
Ilustración 0.19 Tobera de 15.55 mm. Presión 2 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	111
Ilustración 0.20 Tobera de 15.55 mm. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura.....	111
Ilustración 0.21 Tobera de 15.55 mm. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura.....	112
Ilustración 0.22 Tobera de 10 mm. Presión 5 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	112
Ilustración 0.23 Tobera de 10 mm. Presión 4 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	113
Ilustración 0.24 Tobera de 10 mm. Presión 3 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	113
Ilustración 0.25 Tobera de 10 mm. Presión 2 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.....	114
Ilustración 0.26 Circulación un tiempo de apertura de 40 ms y una presión de 3 bar, variando el diámetro salida.	114
Ilustración 0.27 Parámetro adimensional 1 un tiempo de apertura de 40 ms y una presión de 3 bar,	115
Ilustración 0.28 Parámetro adimensional 1 un tiempo de apertura de 40 ms y una presión de 3 bar,	115

Prólogo

En el siguiente texto se documentan de forma detallada los estudios realizados referentes a la interacción de anillos de vorticidad con burbujas de aire, tratando en todo momento que pueda servir como manual de laboratorio. Se ha intentado describir todo el proceso de la forma más escueta y precisa posible. Del mismo modo, ruego a los lectores del presente me disculpen si alguna parte no resulta fácilmente comprensible o no es lo precisa que ellos esperaban.

Este es, por ahora, el último capítulo de mi paso por la Escuela Politécnica Superior de Jaén. Durante el proceso de aprendizaje han sido innumerables las satisfacciones obtenidas y he mejorado ampliamente tanto a nivel técnico como humano. Por tanto, después de todo este tiempo, me veo en la obligación de agradecer a todos los profesionales que han hecho posible lo que soy hoy en día. Los cuales, en muchos casos, podría calificar más de amigos que de profesores. Sobre este aspecto debo hacer hincapié en el Área de Mecánica de Fluidos, que descubrí hace unos años y rápidamente me despejo, por si tenía alguna duda, a lo que quería dedicarme en mi vida laboral. Trabajar haciendo lo que te gusta es algo muy importante y con ellos comprendí claramente lo que es pasión por el trabajo.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Atendiendo a la simplicidad si buscamos la palabra *vórtice* en Wikipedia, esta nos lo define como, “*un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas. Como vórtice puede considerarse cualquier tipo de flujo circular o rotatorio que posee vorticidad*”. (Wikipedia, s.f.) Podemos ver algunos ejemplos en la siguiente imagen:

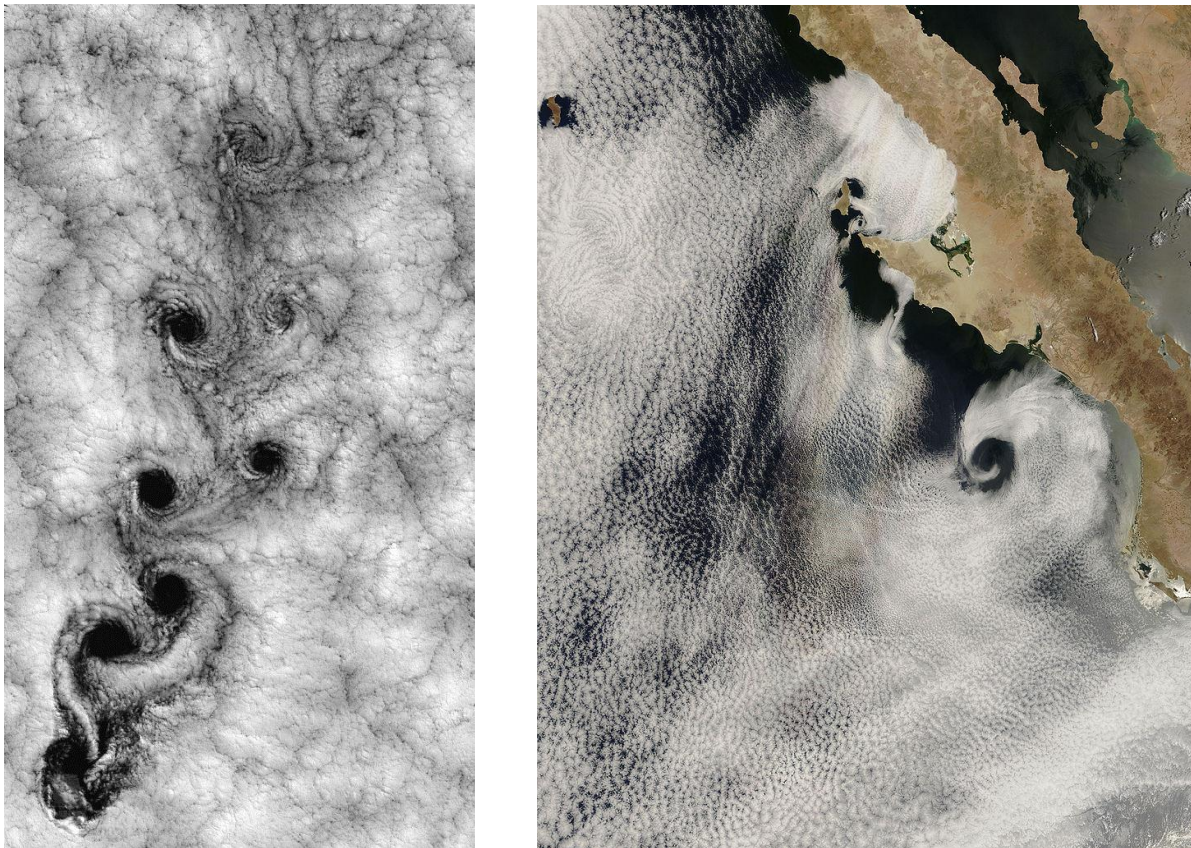


Ilustración 1.1 Calle de vórtices de Von Kármán (izquierda). Una gloria y una calle de vórtices en la zona meridional de la Península de Baja California (derecha), (Wikipedia, s.f.).

Una burbuja se define como un “*glóbulo de una sustancia en el interior de otra. Generalmente gas (o vapor) dentro de un medio en estado líquido*”. (Wikipedia, s.f.). En la imagen 1.2 podemos observar el momento de formación de una burbuja durante nuestros ensayos en el laboratorio.



Ilustración 1.2 Momento de creación de una burbuja de aire en la urna durante un experimento (autor).

En el medio natural tanto los vórtices como las burbujas están presentes en innumerables situaciones, como olas marinas, corrientes submarinas, corrientes de los ríos y una larga lista de etcéteras.

Así mismo, el desarrollo industrial nos lleva a crear vórtices y burbujas artificialmente, con el fin de optimizar los procesos o de forma residual. Un ejemplo de los mismos es el conocido '*vortex ring state*' (imagen 1.3) en el vuelo de helicópteros y drones. Este fenómeno desestabiliza la aeronave y le hace perder gran parte de sustentación, dando lugar en muchos casos, a consecuencias fatales.



Ilustración 1.3 Helicóptero con aspersores de agua para visualizar las líneas de corriente durante *vortex ring state*, (AERIALSTAGE, s.f.).

En ocasiones los vórtices no son un problema sino un beneficio. Veamos un gran ejemplo en automoción. La Fórmula 1 lleva varios años beneficiándose de ellos, creando una capa límite turbulenta que aproxima flujo de aire a gran velocidad a las zonas próximas al monoplaza, aumentando considerablemente el efecto *dowforce*. Para crearla los ingenieros se sirven de pequeñas aletas situadas en diferentes partes del coche como podemos ver en las imágenes siguientes.

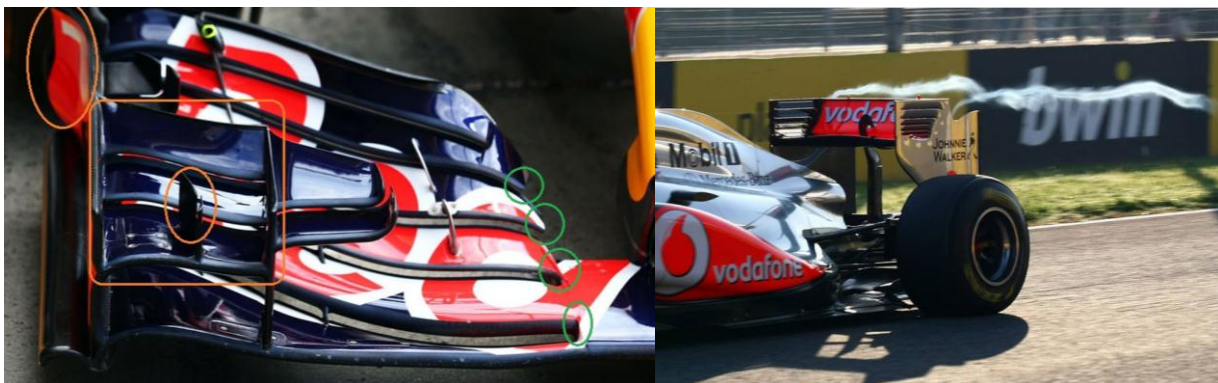


Ilustración 1.4 Generadores de vórtices del ala delantera de un F1 (izquierda). Vórtices saliendo del ala trasera (derecha).

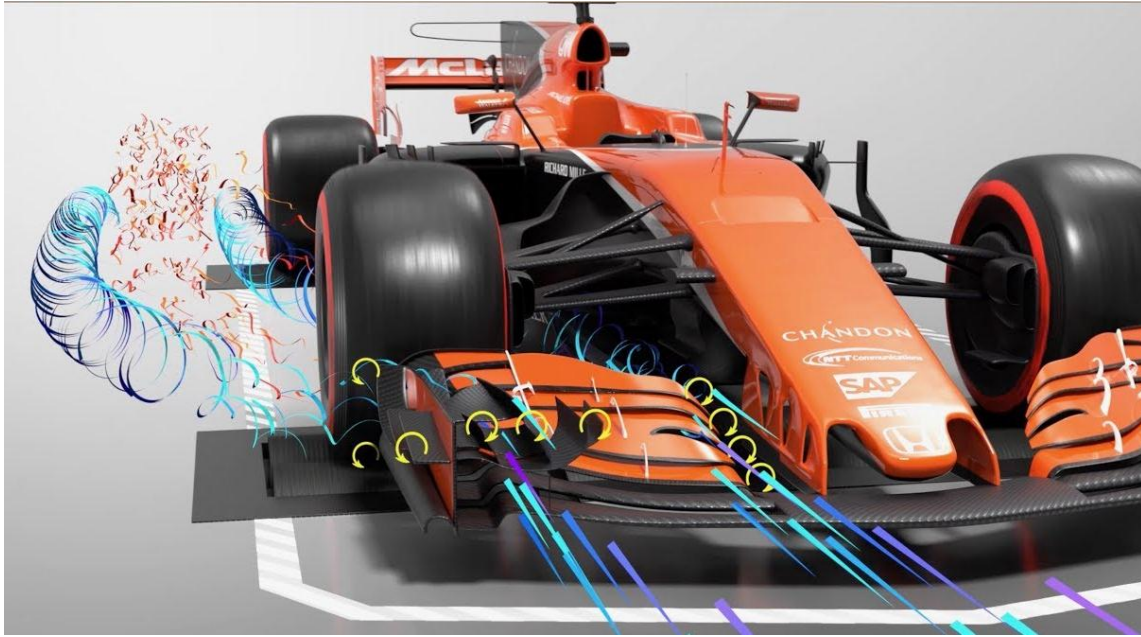


Ilustración 1.5 Aerodinámica de un Formula 1.

Por otro lado, las burbujas resultan vitales para la fauna marina, oxigenando el agua, lo cual mejora brutalmente la condición de vida en la misma. Además de estar presente en diversidad de casos de la vida cotidiana sin que apenas prestemos atención a ellas.

Por tanto, teniendo en cuenta tanto la innumerabilidad de situaciones en que aparecen estos fenómenos, como su gran potencial, su estudio, ya sea por separado como en su interacción, queda más que justificado.

En nuestro caso particular los vórtices serán generados mediante la inyección de un chorro de agua transitorio en un recipiente de agua en reposo, de la forma mostrada en la ilustración 1.6. Si inducimos un chorro de líquido durante un breve periodo de tiempo en un tanque lleno de líquido también, la interacción entre el fluido entrante (en movimiento) y el líquido del tanque (en reposo) hace que la velocidad del contorno del chorro disminuya, creando así un movimiento rotacional que tendrá la forma aproximada de la tobera de salida del chorro. Como en nuestro caso la salida es cilíndrica el resultado será un toroide que avanzará por el tanque en la dirección del chorro inducido. Para el caso de la generación de burbujas utilizaremos aire (ilustración 1.2).

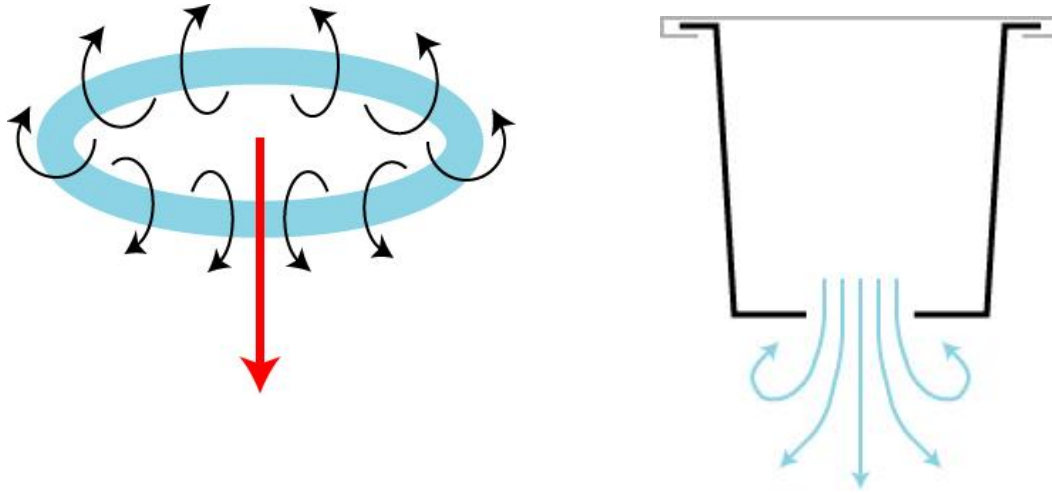


Ilustración 1.6 Esquema de la generación de vórtices realizada en el laboratorio

2. ANÁLISIS TEÓRICO

2.1. Vórtices

2.1.1 Esquema

Para analizar nuestro experimento consideraremos el anillo de vorticidad un toroide de revolución formado por líneas de corriente circulares, que además de poseer ese movimiento rotacional posee otro de avance en el eje que consideraremos z , como se muestra en la figura 2.1.

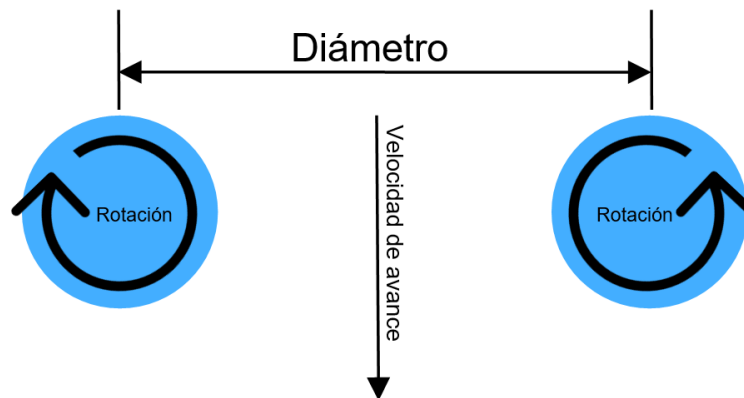


Ilustración 2.1 Esquema de anillo de vorticidad

2.1.2 Descripción Euleriana

a. Variables

Nombre	Símbolo	Unidades	Carácter
Densidad	ρ	Kg/m^3	Escalar
Tiempo	t	s	Escalar
Velocidad	u	m/s	Vectorial
Vorticidad	ω	1/s	Vectorial
Radio	R	m	Vectorial

Tabla 2.1

b. Análisis

Haciendo un análisis del fenómeno desde las ecuaciones Eulerianas de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento para un flujo ideal, tenemos:

$$\begin{aligned}\frac{D\rho}{Dt} &= \frac{\partial\rho}{\partial t} + u \cdot \nabla\rho + \rho \nabla \cdot u = 0 \\ \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g\end{aligned}\quad (2.1)$$

Particularizando estas ecuaciones para el caso de densidad constante ($\rho=\text{cte.}$):

$$\begin{aligned}\nabla \cdot u &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \omega \times u &= -\nabla H\end{aligned}\quad (2.2)$$

*H representa a la integral de Bernoulli.

Si ahora seguimos una línea de corriente ($H=\text{cte.}$), y una línea de vorticidad:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{u_x} &= \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z} \\ \frac{dx}{\omega_x} &= \frac{dy}{\omega_y} = \frac{dz}{\omega_z}\end{aligned}\quad (2.3)$$

Una vez establecidas las bases del problema podemos aplicar el rotacional de la ecuación 2.2, obteniendo de tal forma la evolución de la vorticidad, establecida en las teorías de campo de *HelmHoltz*.

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial\omega}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \omega = (\omega \cdot \nabla) u \quad (2.4)$$

Teniendo ahora en cuenta el esquema establecido en el apartado 2.1.1 observamos una perfecta simetría respecto a cualquiera de los planos que pasen por el eje de avance. Como la sección del vórtice es circular el problema se simplifica sustanciosamente si utilizamos coordenadas cilíndricas, con se observa en la siguiente ilustración:

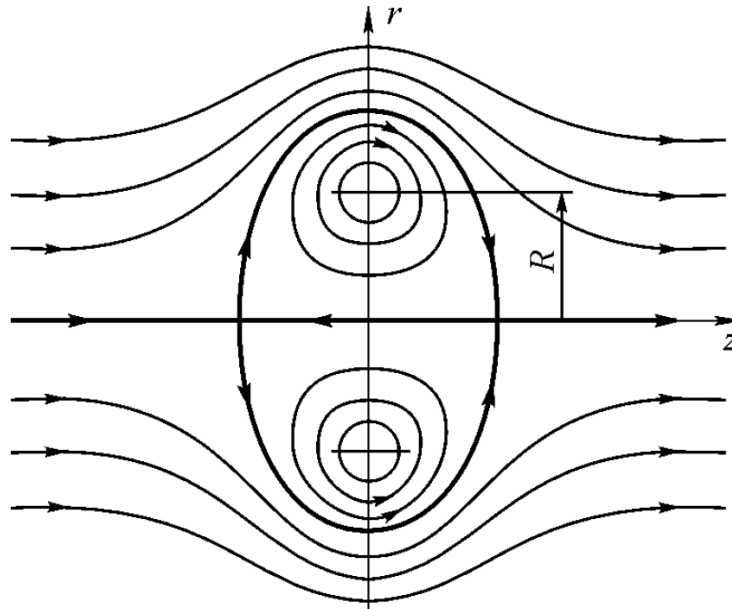


Ilustración 2.2 Anillo de vorticidad en coordenadas cilíndricas. (Akhmetov, 2009)

Analizando, ya en coordenadas cilíndricas el flujo, podremos determinar dos velocidades principales. Estas serán u y v para las componentes axial y radial respectivamente. Es decir, las componentes de la velocidad paralelas a los ejes z y r . Como el vector vorticidad es normal a dichas componentes, las ecuaciones 2.2 y 2.4 quedan así:

$$\nabla \cdot u = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{v\omega}{r}$$

(2.5)

Por tanto, ya estamos en condiciones de definir la vorticidad:

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \quad (2.6)$$

2.1.3. Análisis de flujo potencial. Función de corriente.

Como sabemos las ecuaciones de flujo potencial y función de corriente en coordenadas polares quedan definidas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \\ v &= -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Ahora teniendo en cuenta que el flujo es estacionario y axisimétrico en el que ω/r es una constante para cada línea de corriente que depende del valor de la función de corriente (ψ). Para anillos estables vemos que se cumple que:

$$\frac{\omega}{r} = f(\psi) \quad (2.8)$$

2.1.4 Análisis de anillos de vorticidad en forma integral

Uno de los parámetros más importantes de los anillos de vorticidad es la circulación (Γ), que hace referencia a la cantidad de giro producido en los mismos. De esta forma podemos definirla como la velocidad en una de sus líneas de corriente (línea cerrada, C) o la magnitud vorticidad a través de una superficie cerrada a la que llamaremos Σ . De este modo queda definida como:

$$\Gamma = \int_C u \, dl = \iint_{\Sigma} \omega \, d\Sigma$$

(2.9)

Considerando sólo el contorno de una sección transversal al anillo (figura 2.1)

$$\Gamma = \iint_{\Sigma} \omega(\zeta, \sigma) \, d\zeta \, d\sigma$$

(2.10)

Si bien antes nos centrábamos en el análisis de la circulación, ahora estudiaremos otro parámetro fundamental de nuestro anillo de vorticidad: el impulso (P), que queda definido como:

$$P = \frac{1}{2} \rho \int_V r \times \omega \, dV$$

(2.11)

Y en coordenadas cilíndricas (z, r, θ) , donde $r = r(\zeta, \sigma, \theta)$ y el vector vorticidad está alineado con la coordenada θ :

$$P = |P| = \pi \rho \iint_{\Sigma} \omega(\zeta, \sigma) \sigma^2 \, d\sigma \, d\zeta$$

(2.12)

2.1.5 Anillos de vorticidad Lamb-Oseen

Como ya habíamos introducido anteriormente en nuestro caso particular vamos a analizar anillos de vorticidad del tipo Lamb-Oseen. Para hacernos una idea de las variables del problema a resolver podemos basarnos en el siguiente esquema:

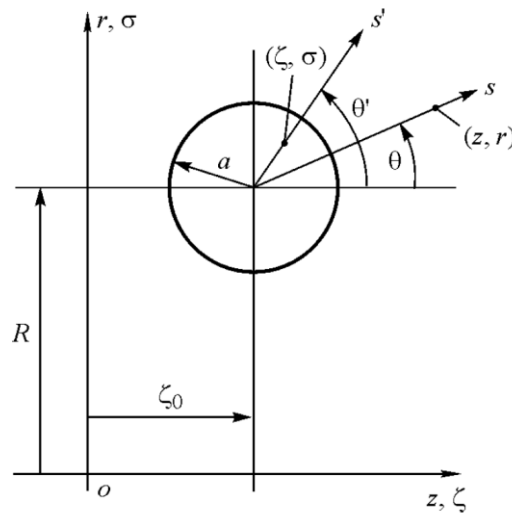


Ilustración 2.3 Sección trasversal de anillo Lamb-Oseen (Akhmetov, 2009)

Analizando los órdenes de magnitud podemos asumir que $a/R \ll 1$. Si ahora aplicamos el Teorema de Pitágoras podemos definir $r_1 = \sqrt{[(z - \zeta)^2 - (r - \sigma)^2]}$. Entonces la función de corriente puede quedar como:

$$\psi = \frac{R\omega}{2\pi} \iint \left(\ln \frac{8R}{r_1} - 2 \right) d\zeta d\sigma \quad (2.13)$$

Y en coordenadas polares (s, θ) :

$$\psi = \frac{R\omega a^2}{2} \left(\ln \frac{8R}{a} - \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \frac{s^2}{a^2} \right) \quad (2.14)$$

Por tanto, para este caso particular podemos definir circulación, impulso y energía cinética como:

$$\Gamma = \pi \omega a^2$$

(2.15)

$$P = \pi \rho R^2 \Gamma$$

(2.16)

$$T = \frac{1}{2} \rho \Gamma^2 R \left(\ln \frac{8R}{a} - \frac{7}{4} \right)$$

(2.17)

Ahora definiremos la velocidad de avance, que es la velocidad con la que el vórtice se desplaza como si fuese un anillo sólido. Respetando el esquema de la figura 2.3 podremos definir la velocidad de avance como:

$$v = \frac{dz}{dt}$$

(2.18)

En el primer apartado especificamos una variable llamada *Díámetro*, el cual hace referencia a la distancia entre los dos ejes de vorticidad en la sección transversal. Esta variable está relacionada con R , siendo $D = 2R$.

Fuentes:

(Akhmetov, 2009)

(Linares Ureña, 2017)

(V. V. Meleshko, A. A. Gourjii, & T. S. Krasnopol'skaya, 2011)

2.2 Burbujas

Para abordar este fenómeno resulta útil comenzar hablando de los estudios de Young y Laplace, quienes ya en 1805, dedujeron de forma independiente que la presión interna en una superficie esférica varía de forma lineal con el radio de curvatura de dicha superficie. De tal forma, teniendo en cuenta la presión exterior:

$$P_g - P = \sigma \cdot k \quad (2.22)$$

Ecuación en la que P representa la presión exterior P_g representa la presión interior (gas), σ hace referencia a la tensión superficial y k es el radio de curvatura de la interfase.

Reorganizando la ecuación y teniendo en cuenta que,

$$P = \frac{F}{S} \quad (2.23)$$

Podemos afirmar que la fuerza que se produce en la interfase por ambos fluidos podrá expresarse:

$$F_p = (P_g - P) \cdot dA \quad (2.24)$$

Atendiendo ahora a las fuerzas realizadas por la tensión superficial en la interfase resulta:

$$F_t = 4 \sigma \pi R \quad (2.25)$$

Para las condiciones de equilibrio ($\sum F = 0$) ambas fuerzas han de tener igual valor y sentido contrario. Por tanto, podemos afirmar que:

$$P_g - P = \frac{2 \sigma}{R} \quad (2.26)$$

2.2.1 Ascenso

Como ya es conocido la presión en el interior de un fluido varía linealmente con la profundidad. Teniendo en cuenta que el análisis de fuerzas anterior puede extenderse a todo el volumen fluido, el radio de la burbuja irá aumentando a medida que asciende dentro del mismo.

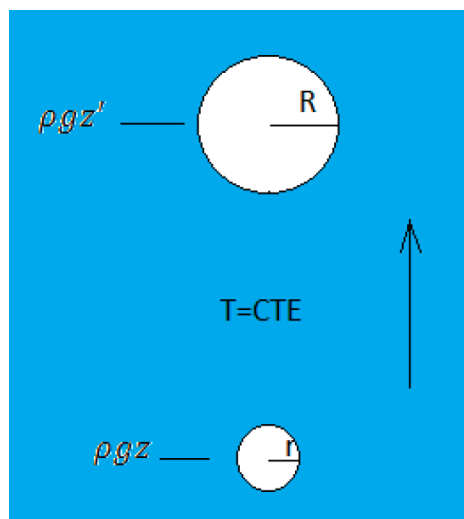


Ilustración 2.4 Esquema de la variación del radio en ascenso de una burbuja (Linares Ureña, 2017)

De tal modo podemos establecer la relación existente entre los radios en diferentes puntos como:

$$\left(\frac{2\sigma}{R} - \rho g z\right) \frac{4}{3} \pi R^3 = \left(\frac{2\sigma}{r} - \rho g z'\right) \frac{4}{3} \pi r^3$$

(2.27)

Si analizamos las fuerzas que producen el ascenso de la burbuja empezaremos hablando por el principio de *Arquímedes*, el cual establece que la fuerza de empuje neta que experimenta el gas sumergido depende directamente del volumen del mismo y de la diferencia de densidades:

$$F_E = (\rho_{\text{liquido}} - \rho_{\text{gas}}) \cdot g \cdot V_{\text{desalojado}}$$

(2.28)

Sobre esta parte, incidir en que, en nuestro caso, como el volumen de la burbuja aumentará con la altura, la fuerza de empuje también se irá incrementando. Además, la densidad del aire es extremadamente pequeña en comparación con el agua. Por tanto, este será otro dato a despreciar.

Por otro lado, el movimiento ascendente de la burbuja produce rozamiento, suponiendo flujo laminar por el hecho de que las ascensiones de burbujas son lo suficientemente lentas podemos establecer la fuerza de rozamiento como:

$$F_R = 6\pi r \mu v$$

(2.29)

2.2.2 Formación

La formación de burbujas se produce, entre otros casos, cuando inyectamos un gas dentro de otro fluido en estado líquido. Para la caracterización de la misma, consideraremos como premisas iniciales una escasa viscosidad del líquido, simetría en la interfase y flujo del gas bajo. Dicha formación se produce de la siguiente manera:

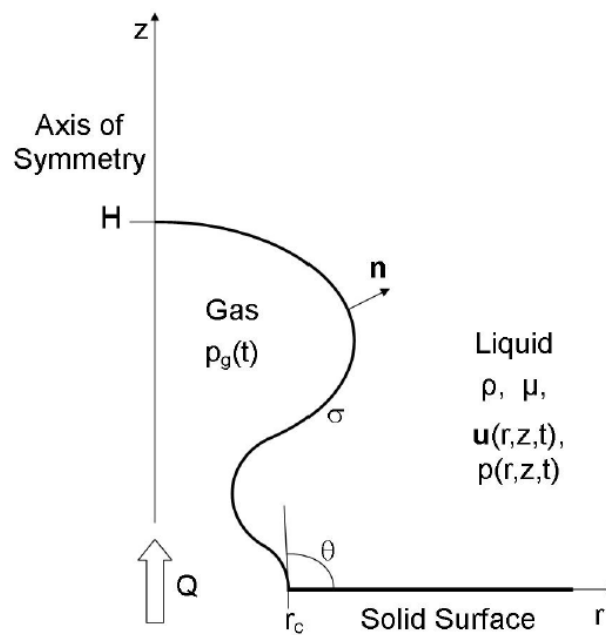


Ilustración 2.5 Esquema de formación de burbuja (Simmons, Sprittles, & Shikhmurzaev, 2015)

A la hora de analizar los esfuerzos sobre la burbuja observamos que los mismos provienen de las fuerzas de tensión superficial, el empuje de *Arquímedes*, y las fuerzas convectivas del flujo externo, siendo estas últimas despreciables por su orden de magnitud.

De tal forma, podemos expresar tanto el empuje como las fuerzas de tensión superficial de la siguiente manera:

$$\frac{1}{6}\pi d D_b^3 g(\rho_f - \rho_g) = \pi D_0 \sigma \quad (2.30)$$

Ecuación en la que D_b es el diámetro de la burbuja en el instante de liberación, y D_0 es el diámetro del orificio de salida. Siendo el diámetro de la burbuja de este modo:

$$D_b = \left[\frac{6D_0\sigma}{(\rho_f - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad (2.31)$$

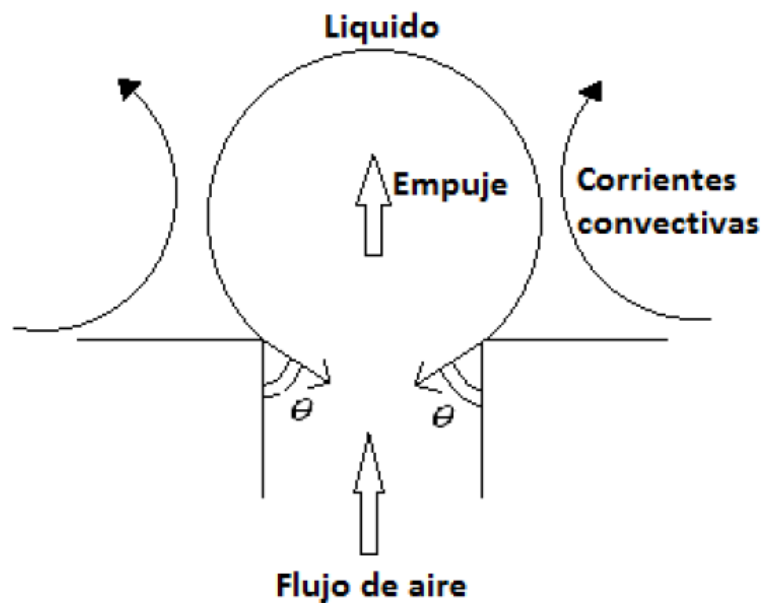


Ilustración 2.6 Esquema de esfuerzos en la formación de burbujas (Inaipil Leal, 2015)

2.2.3 Parámetros característicos

Como en casi todos los fenómenos que intervienen en la fluidomecánica las burbujas se caracterizan de forma más sencilla en relación a unos parámetros adimensionales.

a. Numero de Weber:

Con este parámetro definimos la relación existente entre las fuerzas de tensión superficial y las inerciales:

$$We = \frac{\rho U^2 D}{\sigma}$$

(2.32)

b. Numero de Reynolds

En el que comparamos las fuerzas inerciales con los esfuerzos viscosos producidos en el fenómeno:

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

(2.33)

c. Numero de Galilei

Se estudia con el objetivo de relacionar las fuerzas producidas por la gravedad y los esfuerzos viscosos:

$$Ga = \sqrt{\frac{gD^3}{\nu^2}}$$

(2.34)

d. Numero de Froude

Que establece la relación existente entre las fuerzas gravitatorias e inerciales:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}}$$

(2.35)

e. Numero de Morton

Relaciona las fuerzas viscosas con las tensiones superficiales:

$$Mo = \frac{g\mu^4}{\rho\sigma^3} \quad (2.36)$$

f. Numero de Strouhal

Establece las pseudotransitoriedades oscilatorias.

$$St = \frac{fD}{U} \quad (2.37)$$

g. Numero de Bond / Numero de Eotvos

Con el que podemos relacionar fuerzas gravitatorias con la tensión superficial referentes a burbujas.

$$Bo = Eo = \frac{\rho g D^2}{\sigma} \quad (2.38)$$

De tal forma podemos ahora caracterizar las burbujas en lo referente a su formación y a su desplazamiento en función de los parámetros anteriores.

Para la trayectoria de ascensión de burbujas podremos distinguir entre rectilínea, zig-zag sobre plano, espiral o caótica:

Case	Liquid	Mo	Bo	Ga	St	Path	Wake	Regime
1	water	1.11×10^{-11}	0.2	163.88		rectilinear	axisymmetric	rectilinear
2	water	1.11×10^{-11}	0.3	222.13		chaotic	2CRV aperiodic	chaotic
3	water	1.11×10^{-11}	0.36	255.28		chaotic	2CRV aperiodic	chaotic
4	water	1.11×10^{-11}	0.475	313.54	0.042	chaotic or elliptical spiral	2CRV aperiodic+SHV	transitional
5	water	1.11×10^{-11}	0.55	350.20	0.045	elliptical spiral → planar zigzag	2CRV 2R+SHV	FS → zigzagging
6	T00	1.8×10^{-10}	0.4	137.31		rectilinear	axisymmetric	rectilinear
7	T00	1.8×10^{-10}	0.5	162.34		chaotic	2CRV aperiodic	chaotic
8	T00	1.8×10^{-10}	0.6	186.12		chaotic	2CRV aperiodic	chaotic
9	T00	1.8×10^{-10}	0.7	208.93		chaotic	2CRV aperiodic	chaotic
10	T00	1.8×10^{-10}	0.8	230.94	0.054	planar zigzag	2CRV+SHV	zigzagging
11	T00	1.8×10^{-10}	1.0	273.01	0.060	elliptical spiral → planar zigzag	2CRV+SHV	FS → zigzagging
12	T02	1.6×10^{-8}	1.0	88.92		rectilinear	axisymmetric	rectilinear
13	T02	1.6×10^{-8}	1.25	105.11		rectilinear	axisymmetric	rectilinear
14	T02	1.6×10^{-8}	1.50	120.51	0.069	planar zigzag	2CRV 2R	zigzagging
15	T02	1.6×10^{-8}	1.75	135.3	0.073	planar zigzag	2CRV 2R	zigzagging
16	T02	1.6×10^{-8}	2.25	163.35	0.090	elliptical spiral → planar zigzag	2CRV 4R	FS → zigzagging
17	T02	1.6×10^{-8}	2.5	176.77	0.095	elliptical spiral → planar zigzag	2CRV 4R	FS → zigzagging
18	T05	6.2×10^{-7}	3.0	81.23		rectilinear	axisymmetric	rectilinear
19	T05	6.2×10^{-7}	4.0	100.8	0.108	planar zigzag	2CRV 2R	zigzagging
20	T05	6.2×10^{-7}	5.0	119.2	0.123	planar zigzag	2CRV 4R	zigzagging
21	T05	6.2×10^{-7}	6.0	136.6	0.138	elliptical spiral → planar zigzag	2CRV 4R	FS → zigzagging
22	T11	9.9×10^{-6}	5.0	59.61		rectilinear	axisymmetric	rectilinear
23	T11	9.9×10^{-6}	6.0	68.34		rectilinear	axisymmetric	rectilinear
24	T11	9.9×10^{-6}	7.0	76.72	0.120	planar zigzag	2CRV 2R	zigzagging
25	T11	9.9×10^{-6}	8.5	88.74	0.132	planar zigzag	2CRV 2R	zigzagging
26	T11	9.9×10^{-6}	10.0	100.25	0.136 → 0.174	planar zigzag → helix (spiral)	spiral	spiraling

Ilustración 2.7 Características de la trayectoria seguida por una burbuja en función de *Mo*, *Bo*, *Ga*, *St* (Martínez Bazán & Cano-Lozano, 2016)

Si nos centramos ahora en la geometría de las mismas podemos clasificarlas de la siguiente manera:

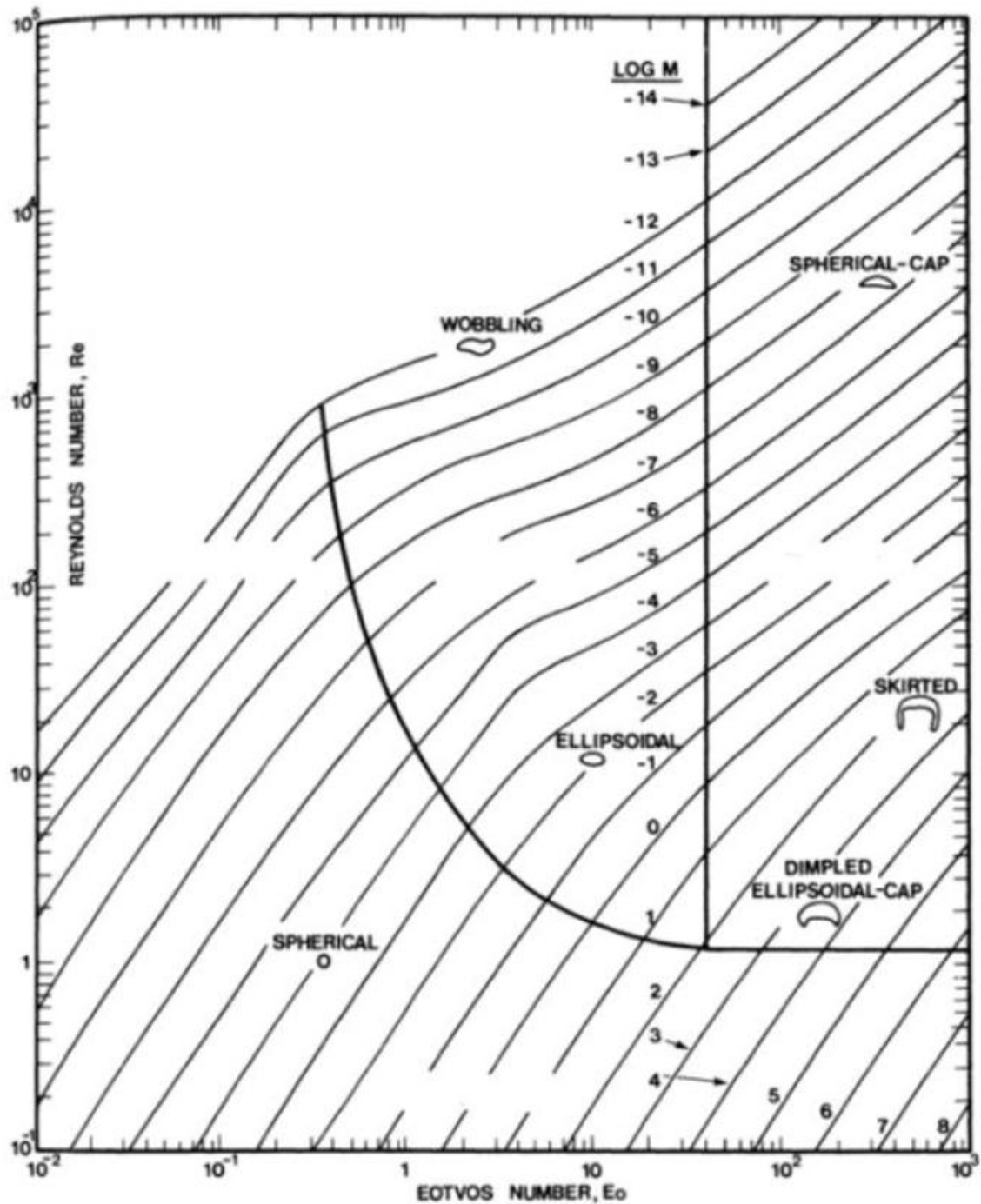


Ilustración 2.8 Geometría de la burbuja en función del *Reynolds* y *Eotvos* (Inaipil Leal, 2015)

Fuentes:

(Inaipil Leal, 2015)

(Martínez Bazán & Cano-Lozano, 2016)

(Simmons, Sprittles, & Shikhmurzaev, 2015)

(Linares Ureña, 2017)

2.3 Interacción

Descritos los parámetros anteriores que caracterizan ambos fenómenos de forma independiente estamos ahora en condición de definir la interacción producida entre un flujo turbulento y burbujas de aire. Para ello nos serviremos del número de *Weber* utilizándolo de forma particularizada para el caso.

$$We = \frac{\tau_t}{\tau_s} \quad (2.39)$$

Donde:

$$\tau_t \approx \rho(\varepsilon R_b)^{2/3} \quad y \quad \tau_s \approx \frac{\sigma}{R_b} \quad (2.40)$$

Donde τ_t indica los esfuerzos turbulentos que tienen a romper la burbuja, siendo ε la disipación de energía cinética turbulenta y τ_s los esfuerzos de confinamiento debidos a la tensión superficial. De tal forma, podemos reescribir el número de *Weber* de la siguiente forma:

$$We \approx \frac{\rho \varepsilon^{2/3} R_b^{5/3}}{\sigma} \quad (2.41)$$

Del estudio de estos parámetros se deberá de extraer el resultado de la interacción para diferentes números de *Weber*, diferenciando entre arrastre, cuando la burbuja no se rompe, sino que es capturada por el vórtice y se desplaza en el seno del mismo; ruptura directa, cuando la burbuja se rompe al poco tiempo de contactar y ruptura por resonancia, en la que la burbuja se rompe pasado un tiempo por acumulación de energía.

Para el caso particular de un vórtice simple:

$$We \approx \rho \frac{\left(\frac{\Gamma}{2} \cdot \pi \cdot R\right)^2}{\sigma/R_b}$$

Fuentes:

(Carlos Martínez Bazán, 2015)

3. MÉTODO

Aunque el objeto final de estudio es la interacción anillo de vorticidad-burbuja, en nuestro caso nos centraremos solo en la primera parte (caracterización de anillos de vorticidad) debido a lo tedioso que resulta el estudio. De este modo haremos una buena caracterización de todo el rango de anillos de vorticidad que nos permita nuestra instalación, limitándonos a trabajar con agua.

Como ya dijimos en apartados anteriores, nuestro experimento consistirá en crear un chorro de agua durante un breve periodo de tiempo. Para crearlo utilizaremos un depósito presurizado del que saldrá el agua a insertar en la urna mediante un circuito hidráulico con una electroválvula que abrirá y cerrará el caudal y una tobera que dirigirá el vórtice en la dirección deseada (vertical descendente en nuestro caso).

3.1 Variables

Con el objetivo de hacer una buena caracterización tanto de los anillos de vorticidad como de las instalaciones con las que los producimos definiremos tres variables con las que haremos las combinaciones pertinentes para obtener el mejor rango posible de trabajo.

3.1.1 Presión de entrada

Será la presión relativa que tengamos en el depósito de salida del agua y la conseguiremos con la línea neumática del laboratorio. En nuestro caso hemos hecho un barrido de 2 a 6 bares variando cada 1 bar. El método de regulación es un manómetro/purgador a la entrada, con una sensibilidad de 0.2 bar. Estableciendo la variación de la presión atmosférica prácticamente despreciable, consideraremos presión relativa y mantendremos el rango entre 2 y 6 bares.

Sobre este parámetro cabe añadir que la presión de descarga de la electroválvula será siempre menor a la indicada por el manómetro debido a la pérdida

de carga de la línea, no obstante, ante el desconocimiento de la presión de descarga utilizaremos la de manómetro (ilustración 3.1) que nos puede dar una buena aproximación de la misma.



Ilustración 3.1 Manómetro/purgador de la instalación (autor)

3.1.2 Tiempo de apertura de la electroválvula

Este parámetro representa el tiempo que está abierta la electroválvula que permite el paso de caudal para generar el vórtice. Estará controlada mediante una placa base *Arduino Uno R3* (ilustración 3.2). Este dispositivo nos permite estipular el tiempo de apertura con una sensibilidad de 1 ms.

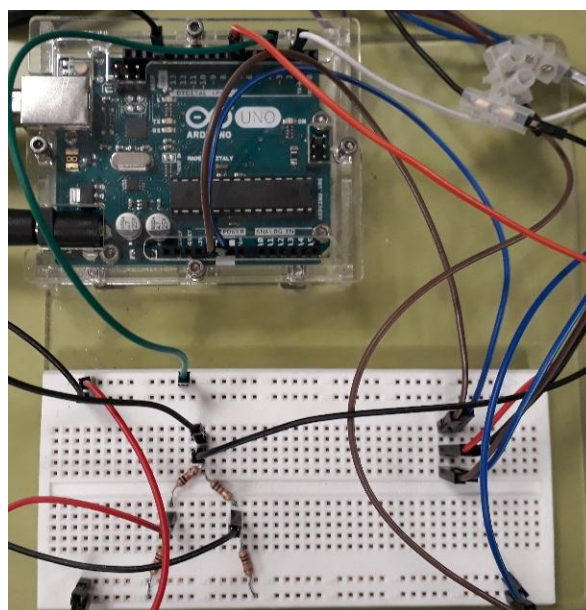


Ilustración 3.2 Placa *Arduino UNO* y placa *protoboard* del laboratorio (autor)

Por su parte la electroválvula utilizada (ilustración 3.3) es inestable para tiempos de apertura inferiores a 10 ms, por ello, éste será nuestro límite inferior en bastantes casos (para las presiones más altas). En el caso de las presiones más bajas el tiempo de apertura mínimo deberá ser mayor, ya que con valores bajos el anillo no queda bien definido.



Ilustración 3.3 Electroválvula de apertura (Linares Ureña, 2017)

3.1.3 Diámetro de salida de la tobera.

El tercer parámetro que variaremos será el diámetro de salida de la tobera que generará el anillo. En primer lugar, utilizaremos el conducto de salida únicamente, que nos ofrece un diámetro de salida de 20 mm. Posteriormente incluiremos dos boquillas que encajan en el conducto de salida (ver ilustración 3.4), reduciendo así el diámetro a 15.55 mm y 10 mm. El detalle en las mismas se encuentra en el anexo I de este documento.

Salida	Diámetro [mm]	Área [mm ²]
Conducto	20	314.159
Boquilla 1	15.55	189.911
Boquilla 2	10	78.540

Tabla 3.2

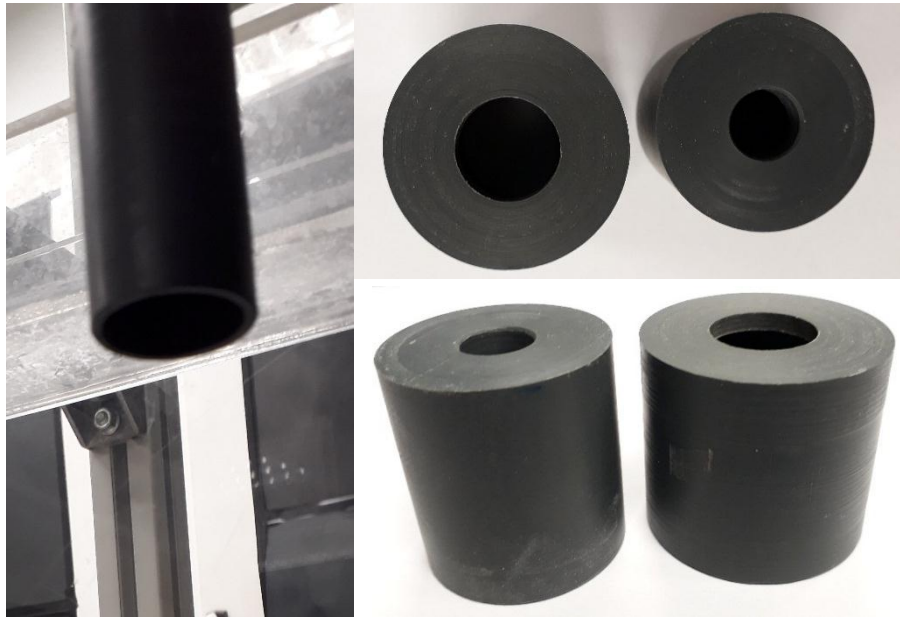


Ilustración 3.4. Tobera de salida (izquierda). Boquillas de 10 mm y 15.55 mm (derecha). (autor)

3.2 Análisis dimensional

El análisis dimensional es una de las técnicas de estudio más utilizadas en mecánica de fluidos. Cuando el número de variables a barajar en el problema es elevado el uso de otras variables que incluyan una combinación de estas puede simplificar los cálculos de manera muy eficaz.

Por el hecho de que en nuestro problema existan tantas variables, creemos conveniente utilizar los conocidos parámetros adimensionales, que son una combinación de otras variables en las que las unidades se anulan, por tanto, no dependen de los parámetros de escala utilizada. Con este método localizaremos los patrones y las relaciones existentes. Además, podemos estudiar la convergencia de los resultados con el fin de corroborar la veracidad física de los datos.

3.2.1 Parámetro adimensional 1. Circulación, Velocidad de avance y Diámetro de salida.

Como ya dijimos anteriormente uno de los parámetros más importantes del anillo de vorticidad es la circulación que este produce. De tal modo, si combinamos esta circulación con la velocidad de avance del vórtice y el diámetro de salida con el que lo hemos generado, podemos obtener nuestro primer parámetro adimensional.

$$Parametro\ Adimensional_1 = \frac{\Gamma}{U_v \cdot D_t} \left[\frac{\frac{m^2}{s}}{\frac{m}{s} \cdot m} \right] \quad (3.1)$$

3.2.2 Parámetro adimensional 2. Circulación, presión de descarga y tiempo de apertura.

Para el segundo parámetro nos centraremos en dos de los parámetros de la instalación, que son la presión de descarga y el tiempo de apertura de la electroválvula. Partiendo de:

$$Parámetro\ Adimensional_2 = \frac{\Gamma}{U_D^2 \cdot t_A} \left[\frac{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^2}{s}}{\left(\frac{m}{s}\right)^2 \cdot s} \right]$$

$$U_D = \sqrt{\frac{P_D}{\rho}}$$

Podemos definir el segundo parámetro como:

$$Parámetro\ Adimensional_2 = \frac{\rho \cdot \Gamma}{P_D \cdot t_A} \left[\frac{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^2}{s}}{\frac{N}{m^2} \cdot s} \right] \quad (3.2)$$

3.2.3 Parámetro adimensional 3. Numero de Reynolds

Inmensamente conocido por ser uno de los parámetros más importantes en la mecánica de fluidos el número de Reynolds nos servirá para comprobar la estabilidad del vórtice.

$$Re = \frac{\Gamma}{\nu} \left[\frac{\frac{m^2}{s}}{\frac{m^2}{s}} \right]$$

(3.3)

4. INSTALACIONES

En este apartado nos vamos a centrar en la descripción de los equipos utilizados para la adquisición de datos, dividiéndolo en 5 partes:

4.1 Recinto

En primer lugar, hablaremos del área de trabajo del laboratorio, cuyos componentes son los siguientes:

4.1.1 Banco de ensayos metálico nivelable.

Con el objetivo de servir como soporte tanto para la urna donde realizaremos los ensayos como para la cámara CCD utilizaremos un banco suficientemente rígido para soportarlo todo. Las dimensiones ancho, largo y alto son respectivamente 76 cm, 120 cm y 77 cm. He aquí una imagen del mismo.

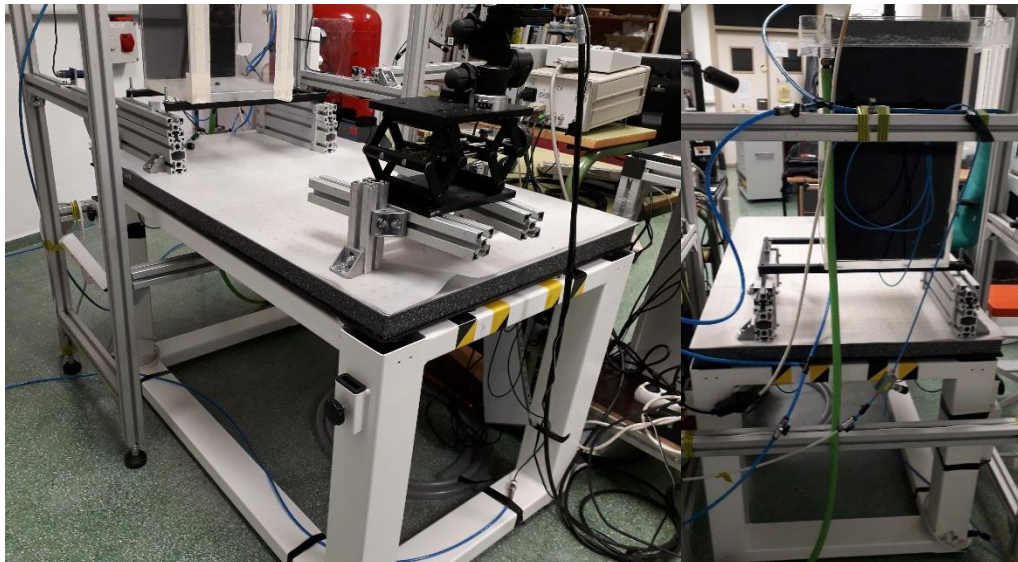


Ilustración 4.1 Banco de ensayos (autor)

4.1.2 Estructura de perfiles *fasten*.

Todo el sistema hidráulico/neumático está anclado a la estructura rectangular de perfiles tipo *fasten* de 45 x 45 mm mostrada en la siguiente ilustración. Ésta también sirve de soporte para parte del cableado de electroválvula/controlador de la instalación.

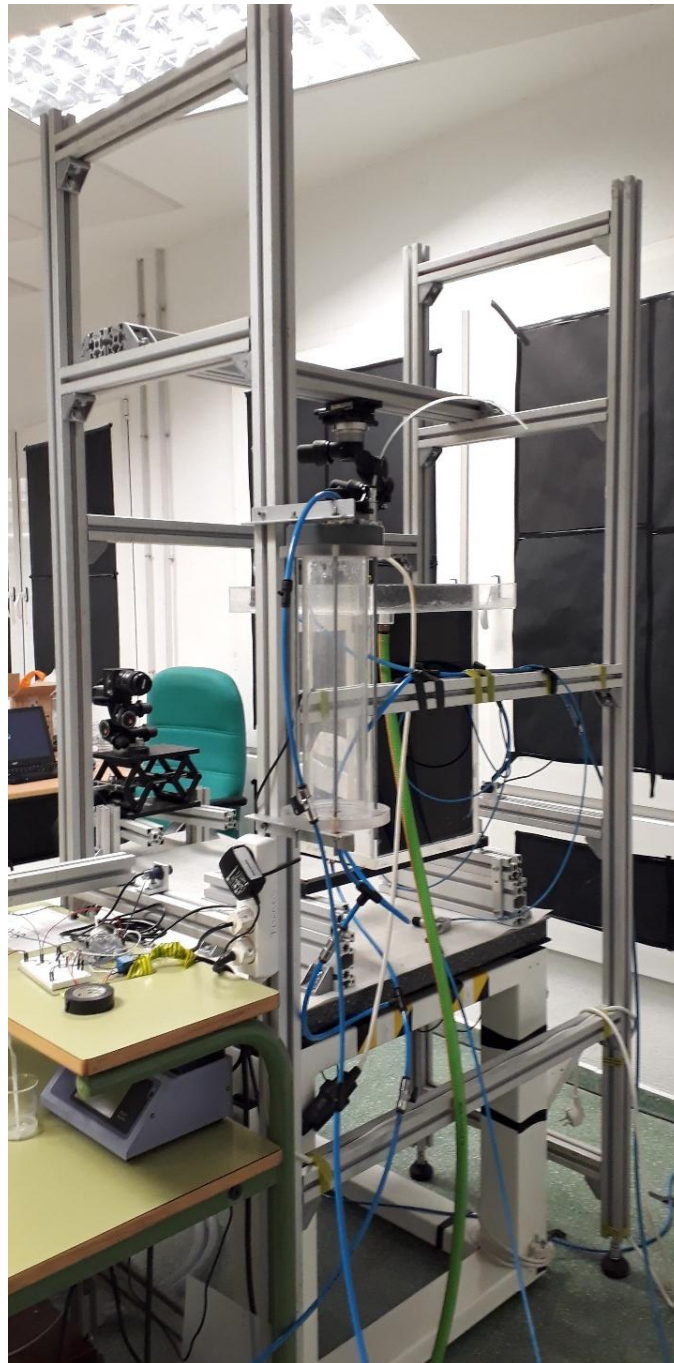


Ilustración 4.2 Estructura de perfiles *fasten* (autor)

4.1.3 Mesa de trabajo.

Es el puesto de trabajo para realizar los ensayos. Está equipada con:

- Ordenador con Windows XP.
- Sistema de control del laser
- Sincronizador laser/cámara CCD.
- Placa Arduino UNO R3 y protoboard con todo el cableado.
- Fuente de alimentación DC para el detector de burbujas.

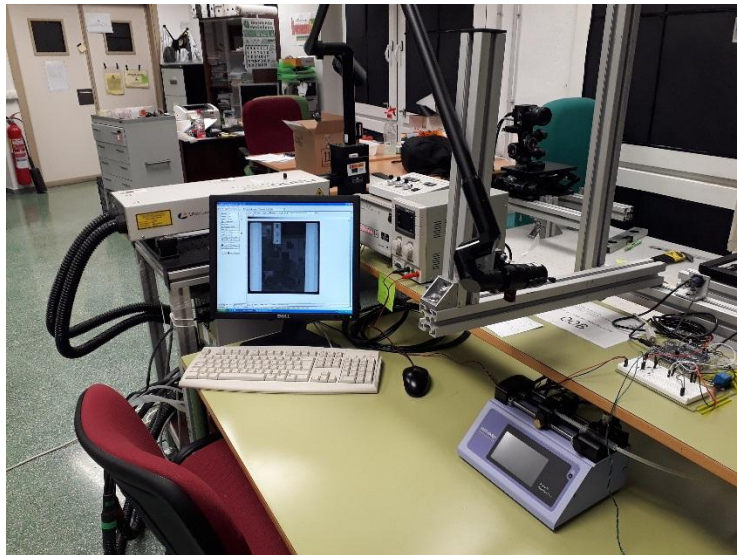


Ilustración 4.3 Mesa con el puesto de trabajo (autor)

4.1.4 Urna

Para albergar el volumen de control que posteriormente analizaremos utilizamos una urna (ilustración 4.4) de metacrilato de 10 mm de espesor, cuyos planos se incluyen en el anexo I de este documento. Para su funcionalidad está equipada con:

- Tobera de desagüe/llenado.
- Sistema de rebosadero y desagüe de seguridad
- Boquilla roscada para la salida de aire (generación de burbujas).



Ilustración 4.4 Urna (Linares Ureña, 2017)

Con el objeto de que el contorno no afecte a las condiciones del experimento se dimensiona en forma de paralelepípedo de base cuadrada de 28 cm de lado. Teniendo en cuenta un diámetro de vórtice de 20 mm obtenemos un ratio entre ambos de $\frac{1}{14}$.

4.2 Agua

4.2.1 Componentes

Los elementos que componen esta parte de la instalación son:

- a. Depósito presurizado.

Como ya se explicó anteriormente, una de las variables con las que vamos a jugar para generar los anillos de vorticidad es la presión. Para obtener la misma se dispone de un depósito de metacrilato con forma cilíndrica que estará parcialmente lleno del agua del experimento y presurizado con una conexión a la línea que viene del manómetro. Ver esquema en anexo I.



Ilustración 4.5 Depósito presurizado (autor)

b. Líneas de tubo *legris*.

Tanto para la parte hidráulica como para la neumática el sistema de transporte de fluidos será tubo *legris* de 8 x 5.5, 8 x 1 y 4 x 6 mm como el que se muestra a continuación.



Ilustración 4.6 Legris de 4 x 6, 8 x 5.5 y 8 x 1 respectivamente (autor)

c. Sistema hidráulico de generación de vórtices.

Para generar los vórtices utilizaremos la línea de tubo *legris* de la salida inferior del depósito presurizado. Dicha línea desemboca en la electroválvula (ver [imagen 3.3](#))

y posteriormente en una pieza de metacrilato fabricada al efecto con el objetivo de dirigir el chorro de forma vertical descendente. En las ilustraciones 4.7 y 4.8 podemos ver el ensamblaje de los mismos.



Ilustración 4.7 Conjunto de electroválvula, codo 90°, conducto de salida y purgador. (Linares Ureña, 2017)

El aire disuelto en el agua será un problema a la hora de realizar experimentos. Por tanto, necesitaremos usar un purgador que utilizaremos para extraer el aire que queda en la parte más alta del codo de metacrilato. El sistema consta de una válvula que abriremos para eliminar el aire. Durante la realización de los ensayos esta válvula ha de estar cerrada.

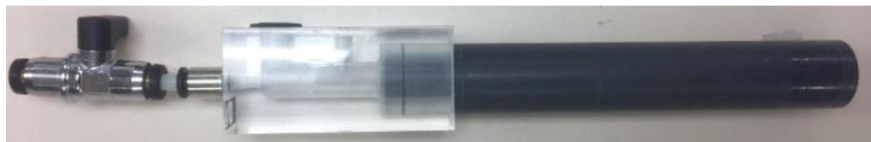


Ilustración 4.8 Purgador, codo 90° y conducto de salida, de izquierda a derecha. (Linares Ureña, 2017)

Todo el sistema está anclado a la estructura fasten mediante un soporte regulable en posición e inclinación. De tal forma podemos calibrar la orientación del chorro como podemos observar en las siguientes imágenes.



Ilustración 4.9 Soporte de calibración y sistema de aplomado. (Autor)

d. Válvulas

Son válvulas específicas para *legris* que utilizaremos para configurar las distintas funcionalidades del circuito definidas en el apartado siguiente.



Ilustración 4.10 Válvula manual (autor)

4.2.2 Funciones

En la siguiente imagen se muestra el circuito hidráulico del sistema, el cual cumple 3 funciones claramente diferenciadas. Cuya funcionalidad y configuración se indican a continuación (ver plano hidráulico/neumático en [anexo 1](#)):

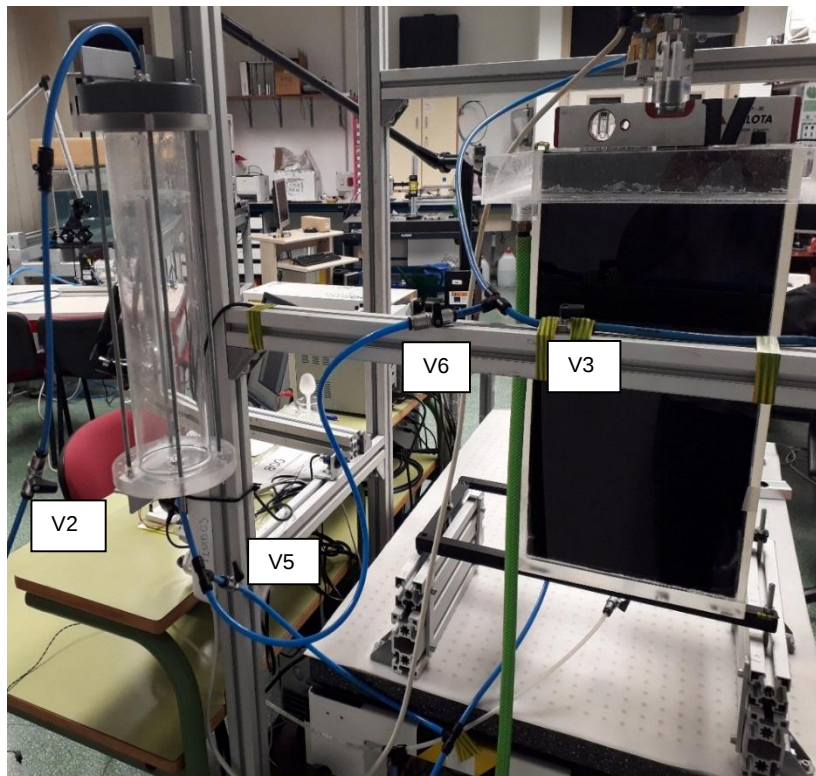


Ilustración 4.11 Instalación hidráulica. (autor)

a. Desagüe.

Esta función sirve para hacer un vaciado tanto de la urna como del depósito presurizado. Para conseguirlo procedemos de la siguiente manera:

- Durante todo el proceso la válvula 6 ha de estar cerrada.
- Hacer que la presión del depósito sea la atmosférica. Para ello cerraremos la válvula 1 y con la válvula 2 abierta pulsaremos el descargador que posee el manómetro.
- Desconectamos el *legris* de la parte superior del depósito para que no haga vacío.
- Abrimos las válvulas 5 y 4 hasta el vaciado deseado.

b. Llenado.

Para la realización de los experimentos tanto la urna como el depósito presurizado han de estar llenos de agua sembrada con partículas (como ya veremos en el apartado 5). Para conseguirlo procedemos de la siguiente manera:

- La válvula 2 ha de estar cerrada para que no entre agua al circuito neumático, además el depósito presurizado debe estar a presión atmosférica puesto que estará comunicado con la entrada de agua.
- La válvula 4 ha de estar cerrada para que el agua no se vaya al desagüe.
- Abrimos la llave de paso la red.
- Abrimos las válvulas 3, 5 y 6 (abrir despacio para obtener un pequeño chorro que no salga de la urna).
- Esperar a que el nivel suba unos 5 cm por encima del deseado (10 cm encima de la salida de la tobera en nuestro caso) y cerrar la válvula 3 y la llave de paso de la red.

Para obtener la misma concentración de partículas en la urna y en depósito presurizado, lo cual es fundamental en nuestro caso, realizaremos lo siguiente:

- Durante el tercer paso del llenado añadiremos la cantidad de partículas necesarias. Esto hará que durante el llenado se produzca una mezcla bastante homogénea.
- Una vez la urna este totalmente llena y no vayamos a añadir más agua, hemos de vaciar el depósito presurizado insertando el contenido del mismo en la urna. Para ello abriremos la válvula 5 cuidadosamente hasta que empiece a salir aire por la parte inferior de la urna.
- Quitamos la presión del depósito (si tuviera alguna). Para ello cerraremos la válvula 1 y con la válvula 2 abierta pulsaremos el descargador que posee el manómetro.
- Extraemos el tubo *legris* de la parte superior del depósito presurizado.
- Abrimos la válvula 5. Ahora tenemos vasos comunicados (depósito/urna). Por tanto, el nivel de agua ha de equilibrarse en ambos después de un tiempo. De ahí que insertáramos aproximadamente 5 cm más de altura en la urna, ya que estos son los necesarios para llenar el depósito. Ahora hemos de tener un nivel en la urna de unos 5 cm por encima de la salida de la tobera.
- Cerramos la válvula 5 y conectamos el *legris*.

c. Generación de anillos de vorticidad.

Es la función principal del circuito, ya que, sin ésta, el llenado y vaciado no tendrían sentido alguno. Una vez ambos contenedores (depósito/urna) están en el nivel deseado y estemos seguros de que la concentración de partículas en el agua es homogénea procederemos de la siguiente manera:

- Nos aseguramos de que las válvulas 3, 4 y 5 están cerradas.
- Presurizamos el depósito. Para ello hemos de abrir las válvulas 1, 2 y red neumática del laboratorio. Ahora con la rueda del manómetro regulamos la presión deseada.
- Nuestro circuito está listo. Cuando se active la electroválvula el agua del depósito accederá a la urna por la parte superior bruscamente.

4.3 Aire

El circuito de aire a presión resulta bastante más sencillo que el circuito de agua. Consta de una línea que sale del manómetro y se bifurca en dos ramas. Una de ellas para presurizar el depósito como ya quedo explicado en el apartado anterior y otra que entra en el centro de la base de la urna (ilustración 4.12) con el objeto de formar las burbujas.

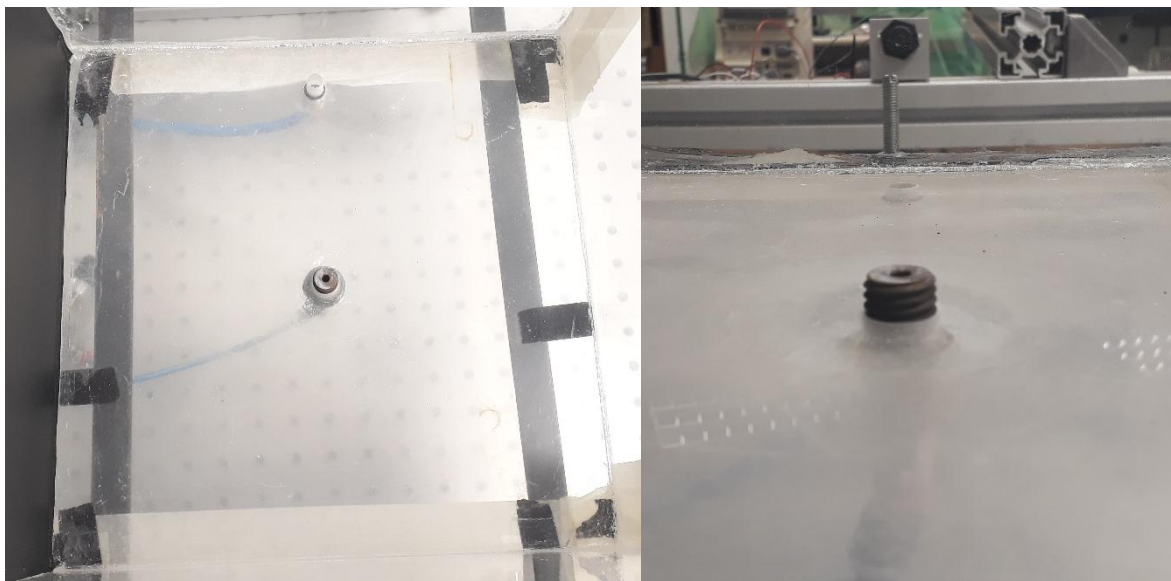


Ilustración 4.12 Salida de aire para la generación de burbujas (autor)

Para generar las burbujas nos serviremos de la línea que hablamos anteriormente. En la última parte incorporamos un tramo de tubo *legris* de 4 x 2.5 mm de una longitud aproximada de 2 m con el fin de introducir pérdida de carga y eliminar todas las posibles cámaras de aire. De este modo obtenemos un caudal de aire uniforme que regularemos con un regulador de caudal (ilustración 4.13). Con la finalidad de obtener burbujas con las características deseada, sobre la boquilla de la urna roscaremos una pieza cilíndrica de metacrilato (ilustración 4.13). Posteriormente rociaremos una zona circular con *never wet* (nunca mojado) haciendo que la burbuja se adhiera a dicha zona. En función del diámetro rociado con dicho material obtendremos burbujas de diferentes tamaños. El fenómeno se puede observar en la imagen 1.2.

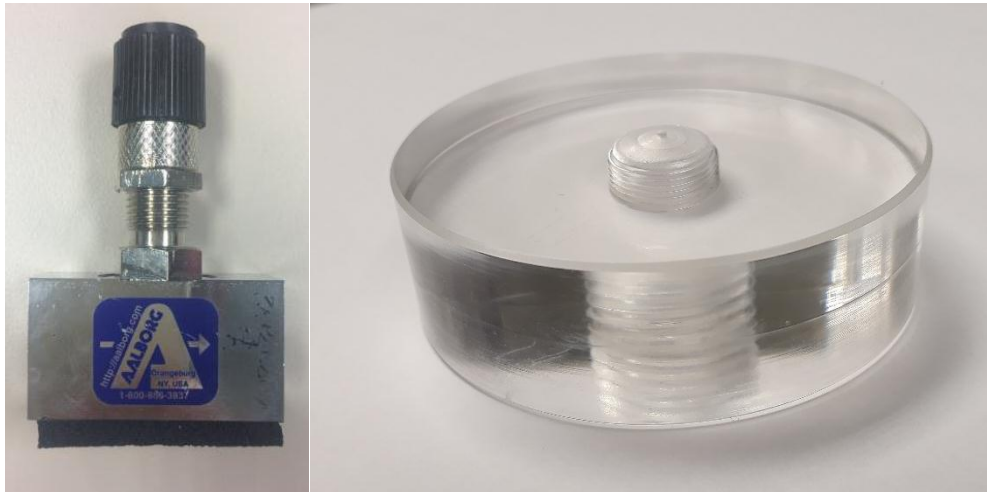


Ilustración 4.13 Regulador de caudal utilizado para la generación de burbujas (izquierda).

Pieza de metacrilato (derecha), (autor)

4.4 Control

Los sistemas de control del equipo nos permiten realizar unos ensayos precisos. De tal forma podemos generar el vórtice en un instante concreto a partir de la detección de la burbuja y además que este esté creado con un tiempo de apertura controlado. La sensibilidad del equipo es de 1 ms.

4.4.1 Componentes

La parte principal de nuestro sistema es una placa *Arduino UNO R3*, que nos ofrece una infinidad de posibilidades. No obstante, en nuestro trabajo solo la utilizaremos para que haga una lectura y posteriormente abra la electroválvula un tiempo determinado. Para ello nos servimos de dispositivos auxiliares:

a. Placa Arduino UNO R3

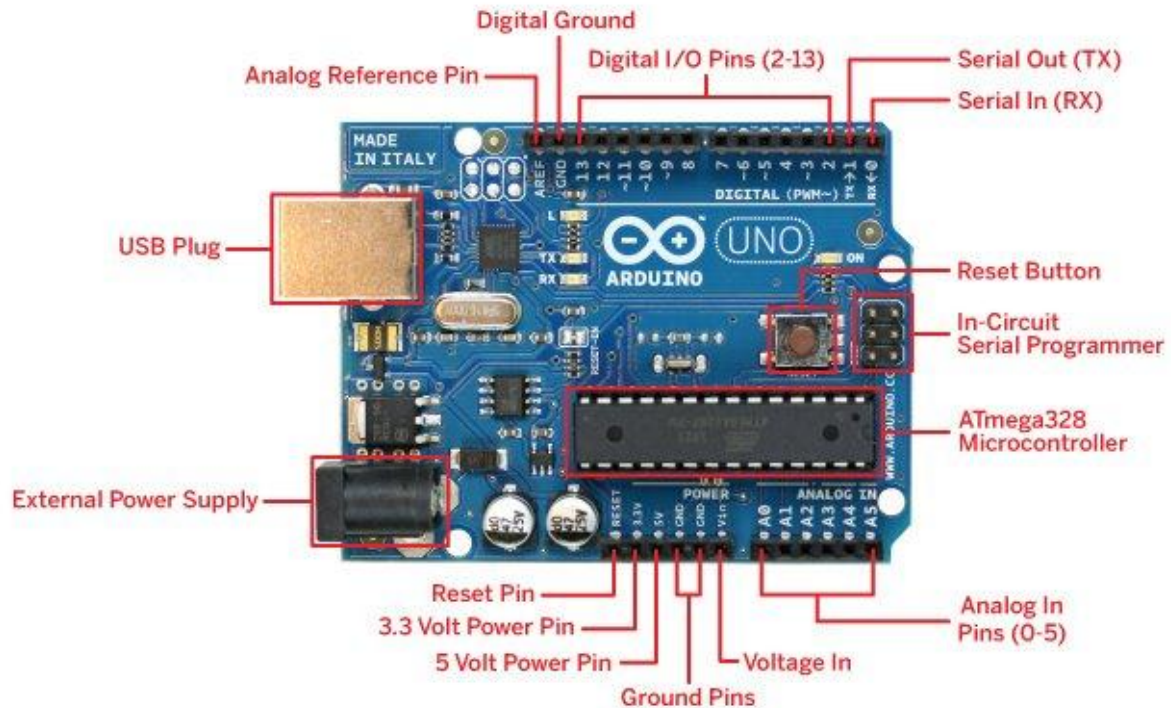


Ilustración 4.14 Esquema de entradas/salidas Arduino UNO R3 (Aprendiendo arduino, s.f.)

Especificaciones técnicas	
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada	7 – 12 V
Pines digitales	14
Pines analógicos (PWM)	6
Corriente continua para I/O pins	20 mA
Corriente continua para 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	32 kB
Refresco	16 MHz
Longitud	68.6 mm
Ancho	53.4
Masa	25 g

Tabla 4.3

b. Solenoide (relé)

La placa de control trabaja con voltajes bajos (5 V DC) y no permite un suministro de potencia elevado. Por tanto, el hecho de que la electroválvula trabaje con corriente alterna y necesite 220 V nos obliga a utilizar un solenoide JQC-3FF-S-Z (ilustración 4.15) que hará la función de interruptor automatizado de la línea de 220 V AC.

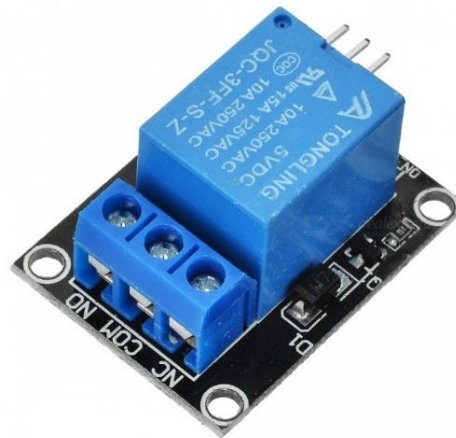


Ilustración 4.15 Relé compatible con Arduino (Sitio oficial de Arduino, s.f.)

Sobre esta parte, cabe lugar añadir que el hecho de que en este dispositivo converjan tanto la línea de 220 V AC como la de 5 V DC (de *Arduino*), crea ciertos picos de tensión en el sistema de control que hacen que el software del ordenador falle. Por tanto, para la seguridad de los equipos y calidad del trabajo será necesario desconectar la placa *Arduino* del PC mientras se está operando.

c. Sonda de detección de burbuja

Para la detección de la burbuja, equipamos el sistema con el detector fotoeléctrico *XUBLANCNL2* (ilustraciones 4.16 y 4.17), que detecta cuando esta es interceptada por un láser que atraviesa la urna y está situado a una altura cercana a la base. De este modo podemos controlar el tiempo transcurrido desde que la burbuja pasa por el sensor hasta que se lanza el vórtice, consiguiendo así establecer el punto de encuentro de ambos. La frecuencia de refresco de la misma es de 1500 Hz. Para mostrar claramente el funcionamiento podemos clicar en el [enlace](#) y ver el video.



Ilustración 4.16 Detector fotoeléctrica XUBLANCNL2 (fabricante)

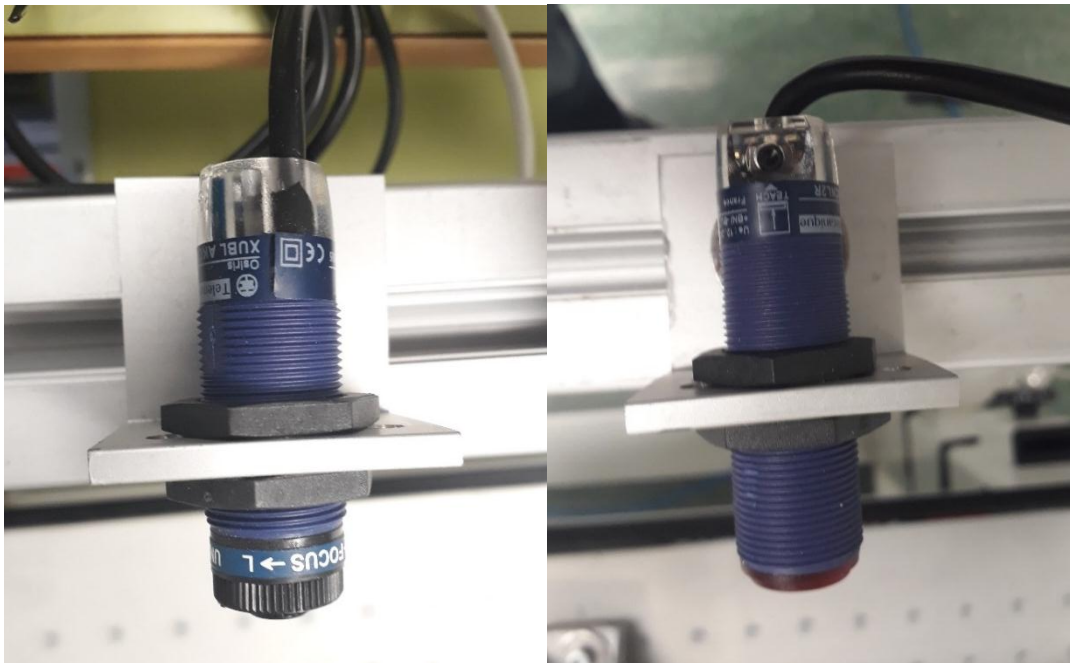


Ilustración 4.17 Emisor (izquierda) y receptor (derecha) del detector ya instalado (autor)

Uno de los problemas a solventar con este dispositivo es que el voltaje de trabajo es de 12 V DC (distinto al de *Arduino*), por lo que se nos hará necesario utilizar una fuente de alimentación externa. Además, como la señal enviada por la sonda tampoco concuerda con la que lee *Arduino*, será necesario insertar un divisor de tensión compuesto por cuatro resistencias para conseguir la señal de entrada de detección de la burbuja ([ver plano](#)).



Ilustración 4.18 Fuente de alimentación para la sonda de burbuja (autor)

d. pulsador

Como se han analizado los vórtices de forma independiente a la interacción con burbujas, no tenía sentido utilizar para este caso la sonda de burbuja. Por tanto, la activación del relé, que a su vez activa la electroválvula, se realizara mediante un pulsador. De esta forma el trabajo se hace bastante más cómodo y rápido. El dispositivo ha sido recuperado de un ordenador antiguo y dispone de aproximadamente un metro de cable por lo que podremos lanzar los vórtices desde el puesto de toma de imágenes.

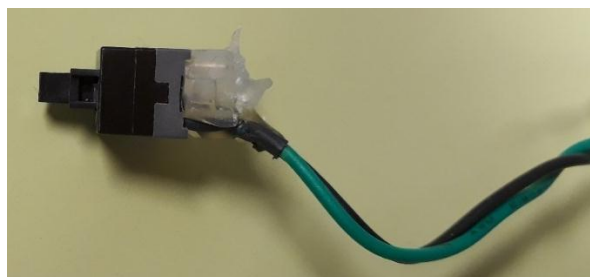


Ilustración 4.19 Pulsador utilizado para puentear la sonda

4.1.2 Funciones

Como ya se puede deducir del apartado anterior las funciones a cumplir por el sistema de control serán dos principalmente:

- a. Abrir la electroválvula para generar anillos de vorticidad utilizando el pulsador.
- b. Detectar la burbuja creada por el circuito neumático y generar un anillo de vorticidad en el momento deseado automáticamente.

4.5 Sistema de velocimetría

Por las características del experimento en sí, hemos decidido capturarlo con un sistema *PIV*, del inglés *particle image velocimetry*, cuyos principios analizaremos más a fondo en el apartado 5 de la memoria.

Centrándonos en los equipos, hemos de distinguir entre tres partes fundamentales. Por un lado, estará el sistema de adquisición de imágenes, por otro lado, un sistema de iluminación (láser) y por último el ordenador y todo el hardware utilizado para acoplar el conjunto. En la siguiente imagen podemos observar un esquema bastante simplificado del sistema.

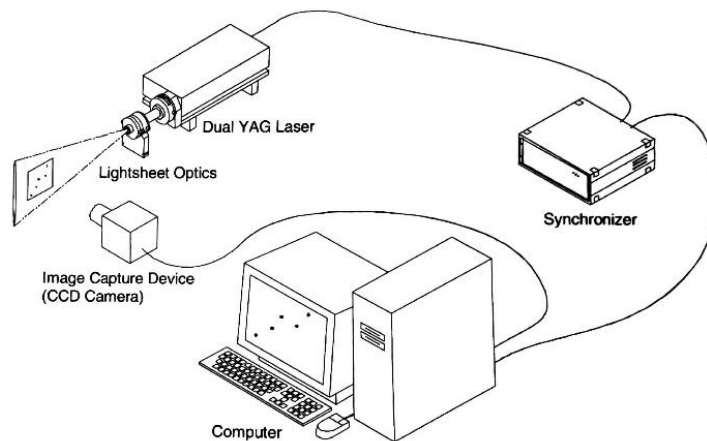


Ilustración 4.20 Esquema de la instalación (TSI, 2012)

4.5.1 Sistema de adquisición de imágenes

El sistema de captura está compuesto por una cámara CCD de *TSI* modelo *630159 POWERVIEW PLUS 4MP*, y un objetivo con anclaje tipo F de 35 mm f/2D para

el que configuramos una apertura de diafragma de 5.2 y una distancia focal de 99 cm al eje del vórtice.

Ficha técnica:	
Resolución	2048x2048 [Pixel]
Tamaño del pixel	7.4x7.4 [μm]
Rango del espectro	340 a 740 [nm]
Tiempo de exposición	42 [μs] a 105 [ms]
Modos de disparo	Continuo, ráfaga, disparo único
Alimentación	12 [V] DC, 6 [W]
Dimensiones	45x68x66 [mm]
Masa	0.8 [kg]

Tabla 4.1

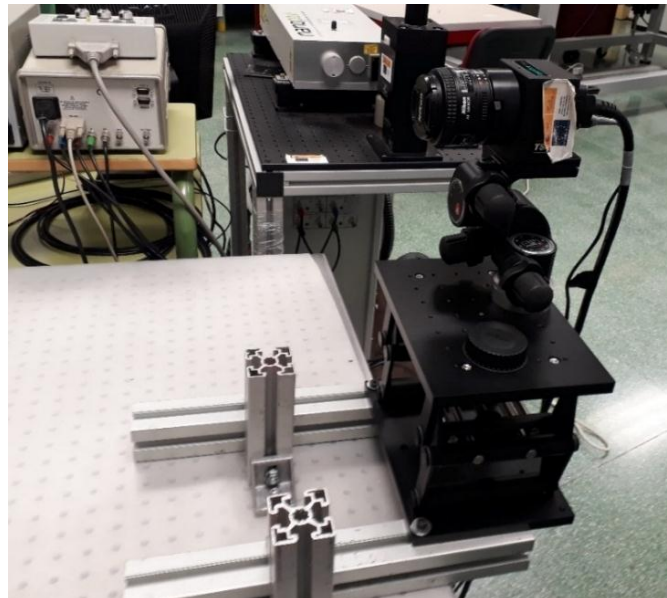


Ilustración 4.21 Cámara TSI con objetivo NIKON AF NIKKOR 35/F2D utilizados para las capturas (autor)

Respecto a esta parte, a mi juicio, es necesario mencionar las limitaciones tanto de la cámara como del láser. La primera y principal concierne a la frecuencia de captura, ya que teniendo en cuenta los 16 fps (fotogramas por segundo) de la cámara y los 15 pulsos por segundo para el láser, nos limita a 7.5 pares de fotos por segundo. Dato que es bastante escaso teniendo en cuenta la velocidad de avance del anillo de vorticidad, sobre todo para las toberas más estrechas. En segundo lugar, la resolución, que es de 4 megapíxeles (muy inferior a las cámaras actuales), también

limita bastante la adquisición de datos, lo que obliga a buscar un equilibrio entre superficie analizada y calidad de la imagen, lo que conseguimos ajustando la distancia de la cámara al eje del vórtice (99 cm).

Con objeto de enfocar bien la lente colocaremos una escuadra graduada coincidente en distancia focal con el eje de avance del vórtice. Posteriormente ampliamos al máximo la imagen y ajustamos el enfoque hasta conseguir ver los números de la escuadra lo más definidos posible. La imagen siguiente es una muestra de las utilizadas para realizar este paso.

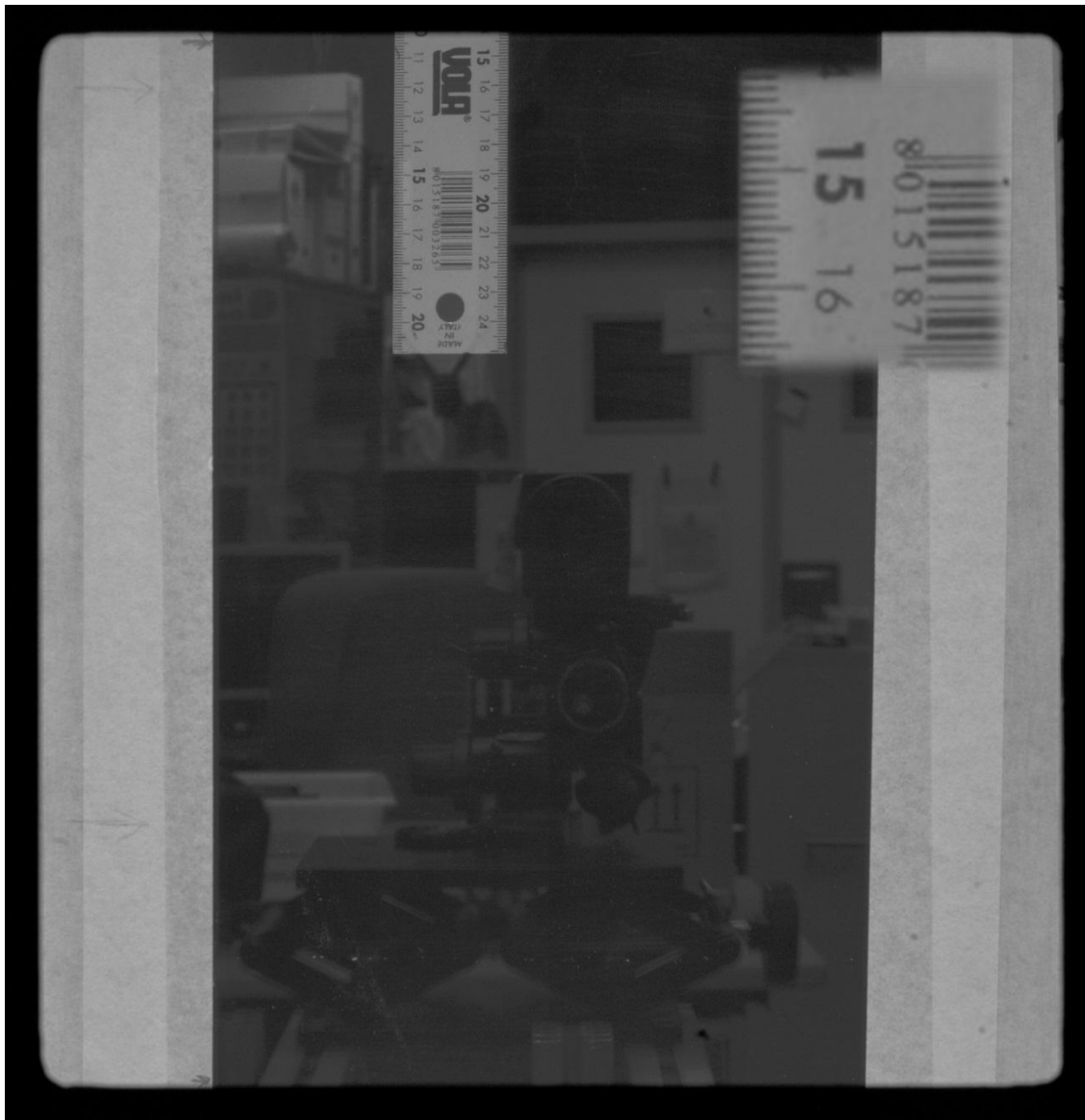


Ilustración 4.22 Imagen de calibración y detalle ampliado de parte de la zona utilizada para el enfoque.

4.5.2 Laser

La iluminación necesaria para la captura de imágenes se realizará mediante un láser de pulsos *Litron Lasers* modelo *NANO L200-15PIV*. El cual concuerda con la frecuencia de la cámara de 15 Hz y ofrece una potencia de 200 mJ para una longitud de onda de 532 nm.



Model	Nano L 200-15 PIV
Repetition Rate per Laser Head (Hz)	0-15
Output Energy at 532nm per Laser Head ⁽¹⁾ (mJ)	200
Parameter	
Pulse - Pulse Stability (±%)	2
Beam Diameter (mm)	6.5
Beam Divergence (mrad)	~3
Pulse Length @ 1064nm (ns)	6-9
Pointing Stability (μrad)	<100
Resonator Type	Stable
Lamp Life (pulses)	>5x10 ⁷
Timing Jitter (ns)	<0.5
Services	
Voltage (VAC)	110-250
Frequency (Hz)	47-63
Power	Single Phase
Ambient ⁽²⁾ (°C)	5-35
Consumption (W)	<800
Cooling	Air
Power supply	LPU550

Ilustración 4.23 Imagen corporativa del láser del laboratorio y tabla de características (Litron Lasers, s.f.)

Posteriormente a la salida del generador de pulsos se encuentra un brazo articulado por dos tramos de longitud 65 y 83 cm y tres codos dobles (ilustración 4.24) que permiten modificar la dirección en 360° para culminar con las lentes de proyección del láser de las que hablaremos en el apartado siguiente. Con este sistema podemos orientar el haz de iluminación a la zona y en la dirección deseada.



Ilustración 4.24 Brazo articulado (autor)

Como la unidad de generación de pulsos tiene una temperatura de trabajo de 100 °C será necesario una unidad central en la que se encuentra el sistema de control de temperatura y que además concentra todo el conexionado de los diferentes dispositivos. En esta unidad también se puede configurar la sincronización, que en nuestro caso utilizaremos de modo que se realice con el software.

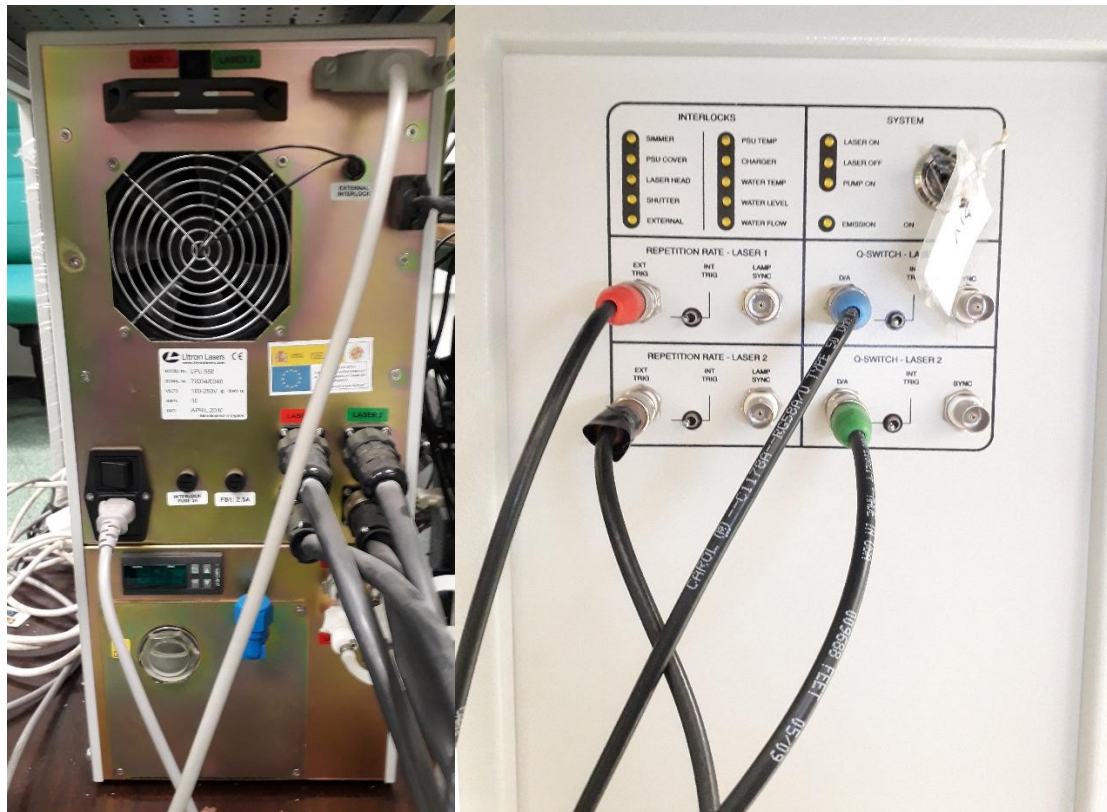


Ilustración 4.25 Unidad de control de temperatura y conexionado configurados para controlar desde el software (autor)

Para controlar los parámetros del sistema de generación de pulsos contamos con una unidad situada en la mesa de trabajo desde la que podremos conectar y desconectar los láseres, regular la potencia de ambos de forma independiente, ajustar la frecuencia de repetición, conectar y desconectar la bomba que mueve el agua del sistema de control de temperatura y abrir y cerrar el obturador (*shutter*, en inglés). Este último, es una compuerta situada en el interior de la unidad generadora de pulsos, permitiendo la salida o no de la luz independientemente de que el láser esté funcionando o no y sirve para poner el láser a calentar a poca potencia sin peligro de proyección al usuario o como método de trabajo en algunas situaciones concretas. En la siguiente ilustración podemos ver el dispositivo.



Ilustración 4.26 Unidad de control del láser (autor)

4.5.3 CPU y hardware de sincronización

Con el objetivo de que todos los dispositivos estén sincronizados nos valemos de la unidad de sincronización del láser, la unidad es la 610035.

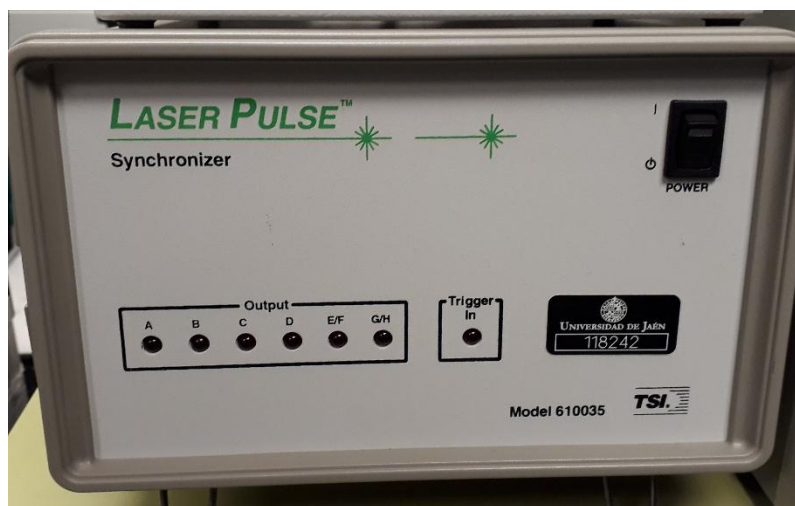
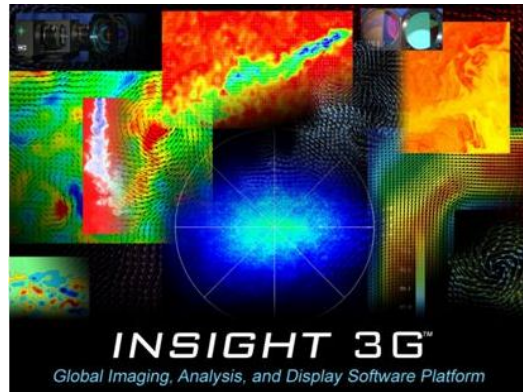
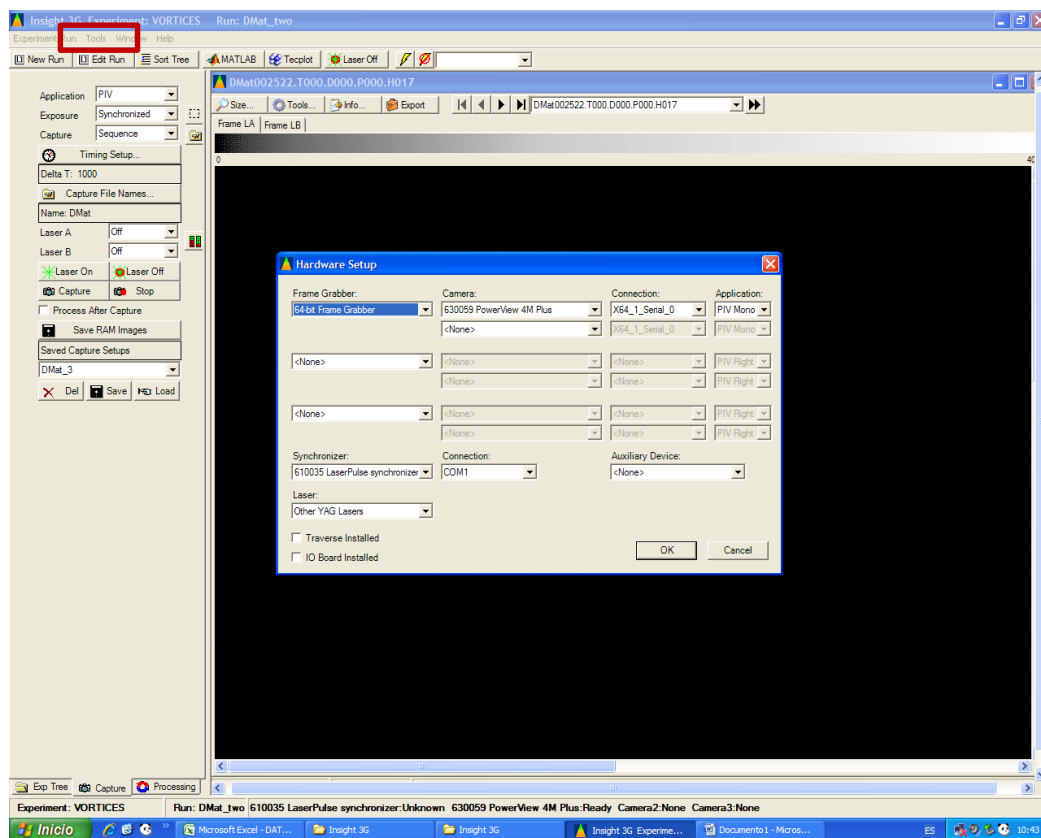


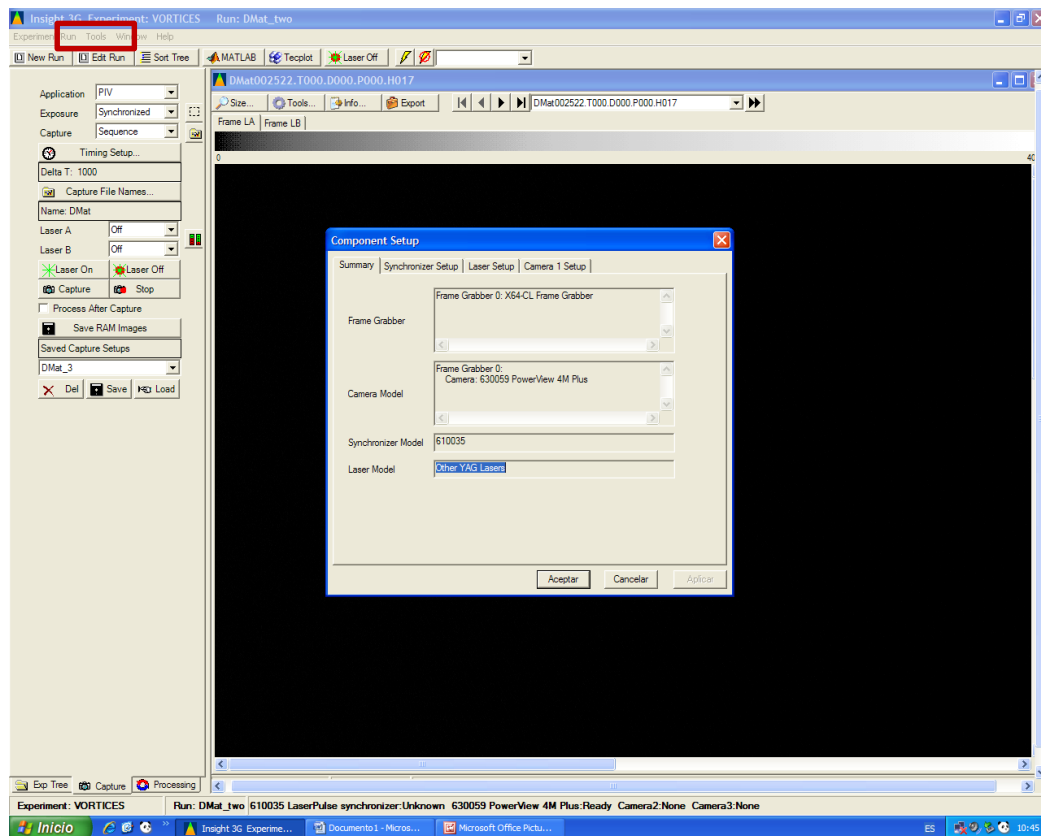
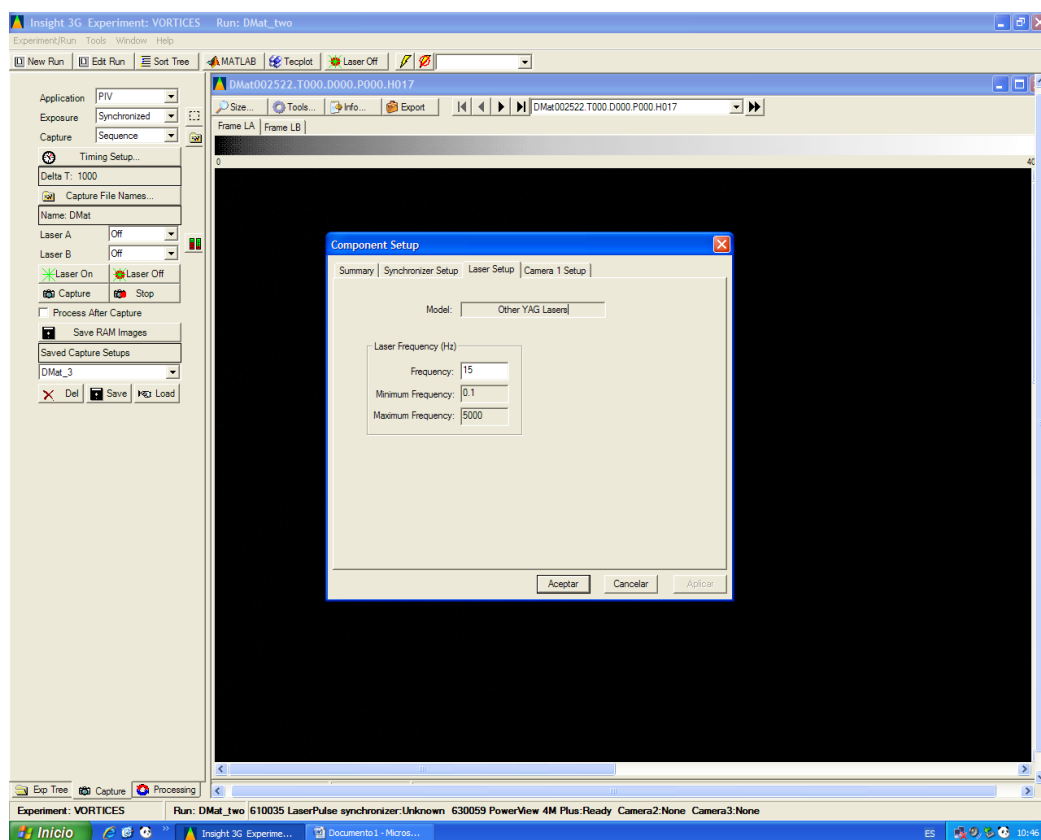
Ilustración 4.27 Unidad de sincronización 610035 de TSI (autor)

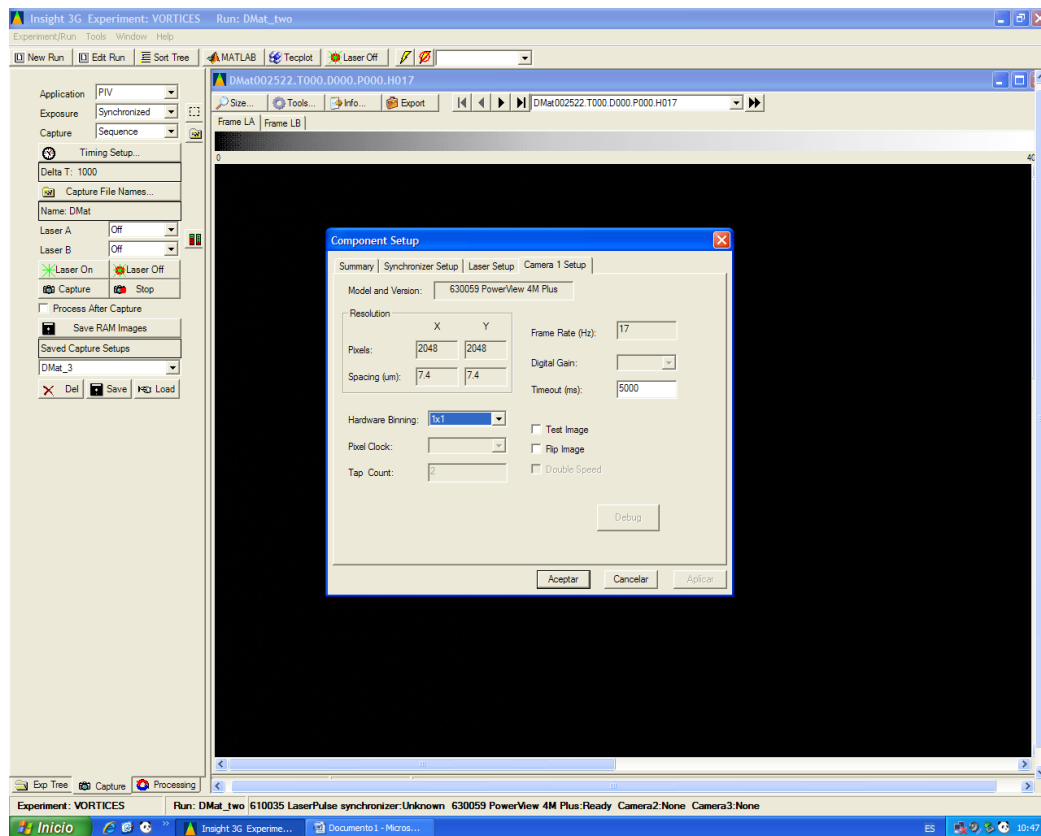
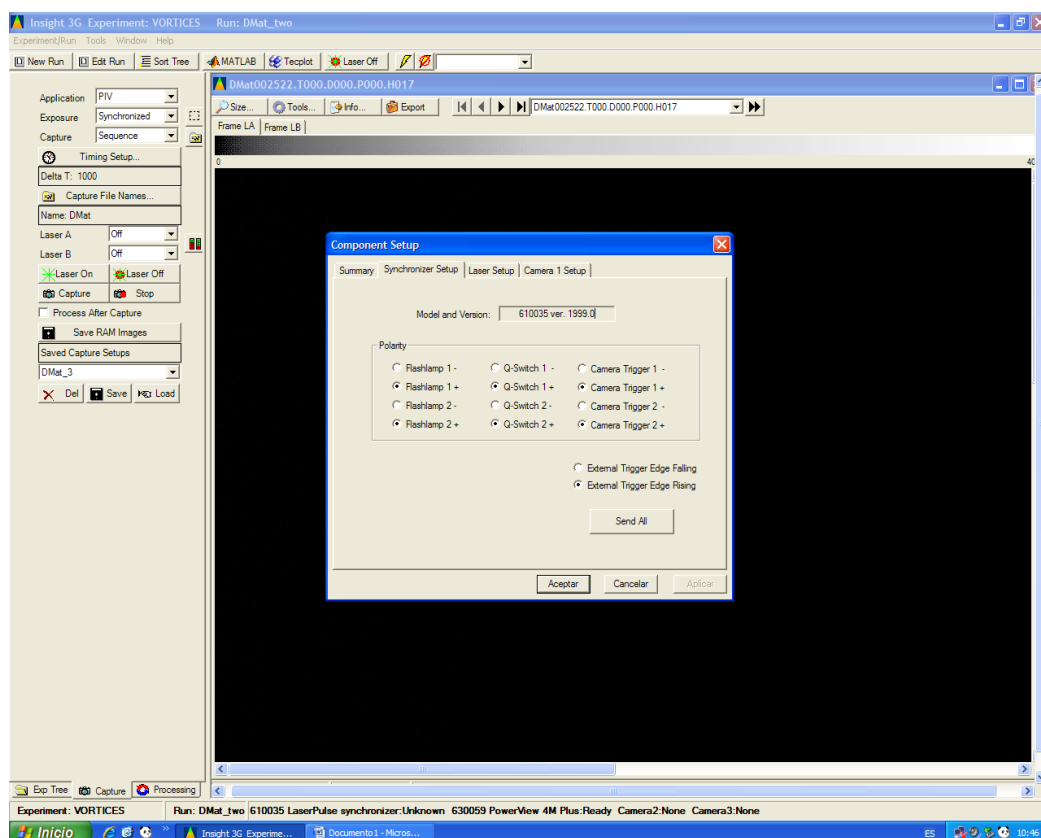
Si bien tanto la potencia del láser, el arranque del sistema de control de temperatura y la bomba y la sincronización las realizaremos con los dispositivos antes mencionados, todo el control del láser que no está englobado en los anteriores los realizaremos mediante una CPU con Windows XP y el software *INSIGHT 3G*.

Ilustración 4.28 Imagen corporativa del software *INSIGHT 3G*

Sobre esta parte no podemos dejar de incidir en la importancia de la configuración del mismo, ya que será el que se encargará de controlar todo lo necesario para la captura de imágenes. La primera función a realizar es la comprobación de que tanto el *hardware setup* como el *component setup* están bien configurados de la siguiente manera:

Ilustración 4.29 *Insight 3G. Hardware setup* (autor)

Ilustración 4.30 *Insight 3G. Component setup – General* (autor)Ilustración 4.31 *Insight 3G. Component setup – Laser* (autor)

Ilustración 4.32 *Insight 3G. Component setup* - Cámara CCD (autor)Ilustración 4.33 *Insight 3G. Component setup* – Sincronizador (autor)

Una vez realizado el paso anterior configuraremos el *timing setup*, que regulará la apertura y cierre del obturador de la cámara y el inicio y fin de los pulsos del láser. La configuración para nuestro caso será la siguiente:

- **PIV frame mode:** es el modo de captura de imágenes pudiendo optar por *Straddle* (pares) o *Single* (sencillo). En nuestro caso tomaremos pares de fotos.
- **Pulse repetition rate (Hz):** Es la frecuencia de repetición del láser. En nuestros ensayos utilizaremos el máximo posible, 15 capturas por segundo. Teniendo en cuenta que utilizaremos pares de fotos, la frecuencia de repetición será 7.5 Hz.
- **Laser pulse delay:** Hace referencia al tiempo de espera del primer laser, hemos utilizado 400 μ s.
- **Delta T:** Es el tiempo que transcurre entre una captura y otra. Teniendo en cuenta la velocidad de avance del vórtice usamos 1000 μ s.
- **PIV exposure:** Hace referencia al tiempo que permanece abierto el obturador de la cámara, el cual configuramos a 405 μ s.

Todas estas configuraciones se pueden observar en la siguiente captura de pantalla:

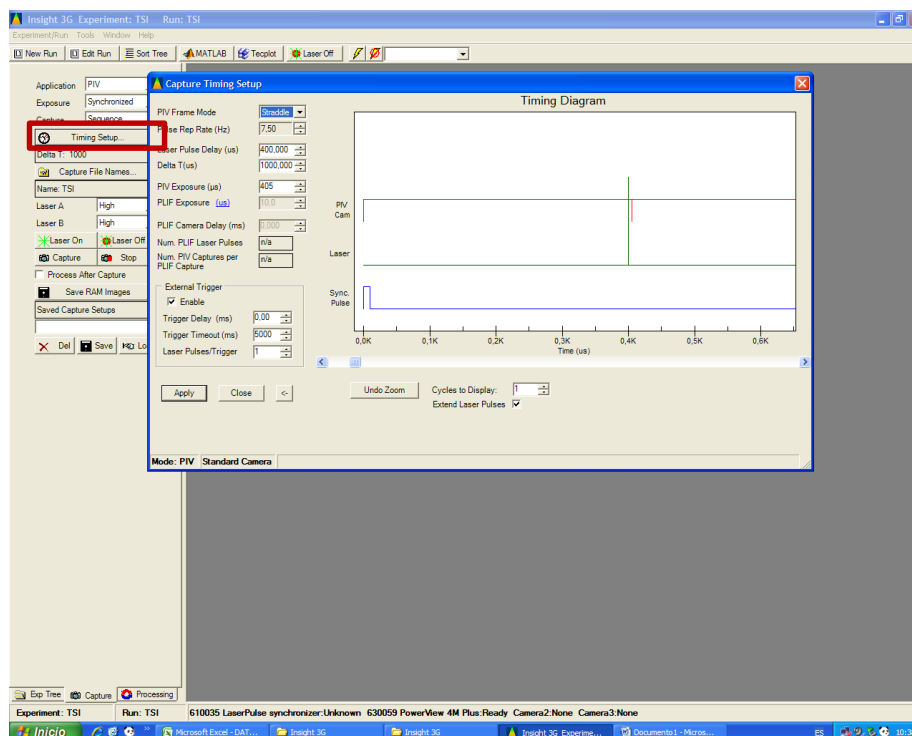


Ilustración 4.34 Insight 3G. Timing setup (autor)

Si ampliamos la gráfica del *timing setup* podemos visualizar los tiempos de trabajo. En las imágenes superiores (4.35) se observan los dos pulsos del láser, más ampliada la de la derecha, donde se observa levemente el cierre de apertura de la cámara poco después del primer pulso, lo que nos proporciona buenas condiciones de luz. La imagen inferior (4.36) nos ofrece una imagen más ampliada de la zona de apertura y cierre del obturador justo después del primer pulso.

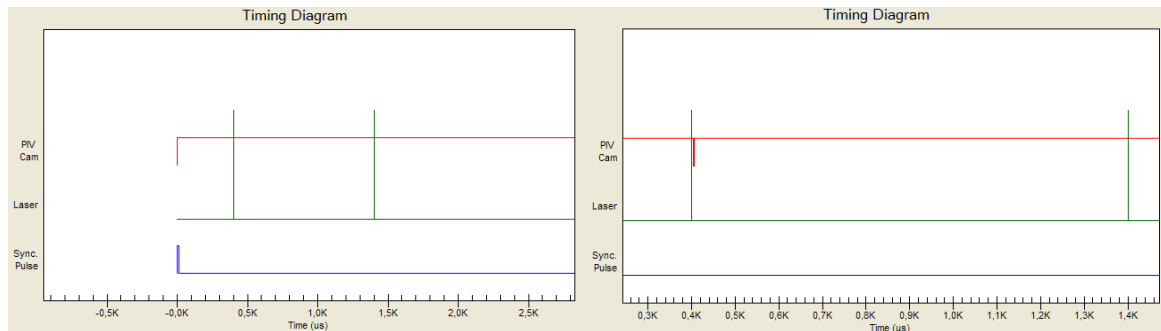


Ilustración 4.35 *Insight 3G*. Ampliación del diagrama temporal para ver los dos pulsos del láser (autor)

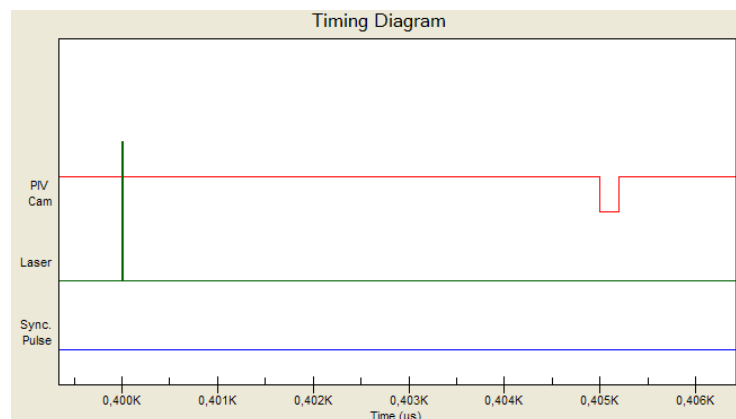


Ilustración 4.36 *Insight 3G*. Ampliación del diagrama temporal en el que se aprecia el primer pulso y el cierre y apertura del obturador de la cámara (autor)

Ahora ya estamos en condiciones de comenzar a realizar capturas. Para ello sólo tenemos que pulsar el botón *Capture* de la pantalla principal (segunda pestaña inferior izquierda) en el momento que queramos obtener imágenes del ensayo. Resulta recomendable almacenar las imágenes provisionalmente en la memoria *RAM*, ya que la velocidad de guardado se incrementa considerablemente. Posteriormente tendremos que guardar las imágenes en el disco duro del ordenador (también de

forma provisional, *Save RAM images*) y por último exportarlas a la carpeta deseada (*Export*). Ver imagen 4.37

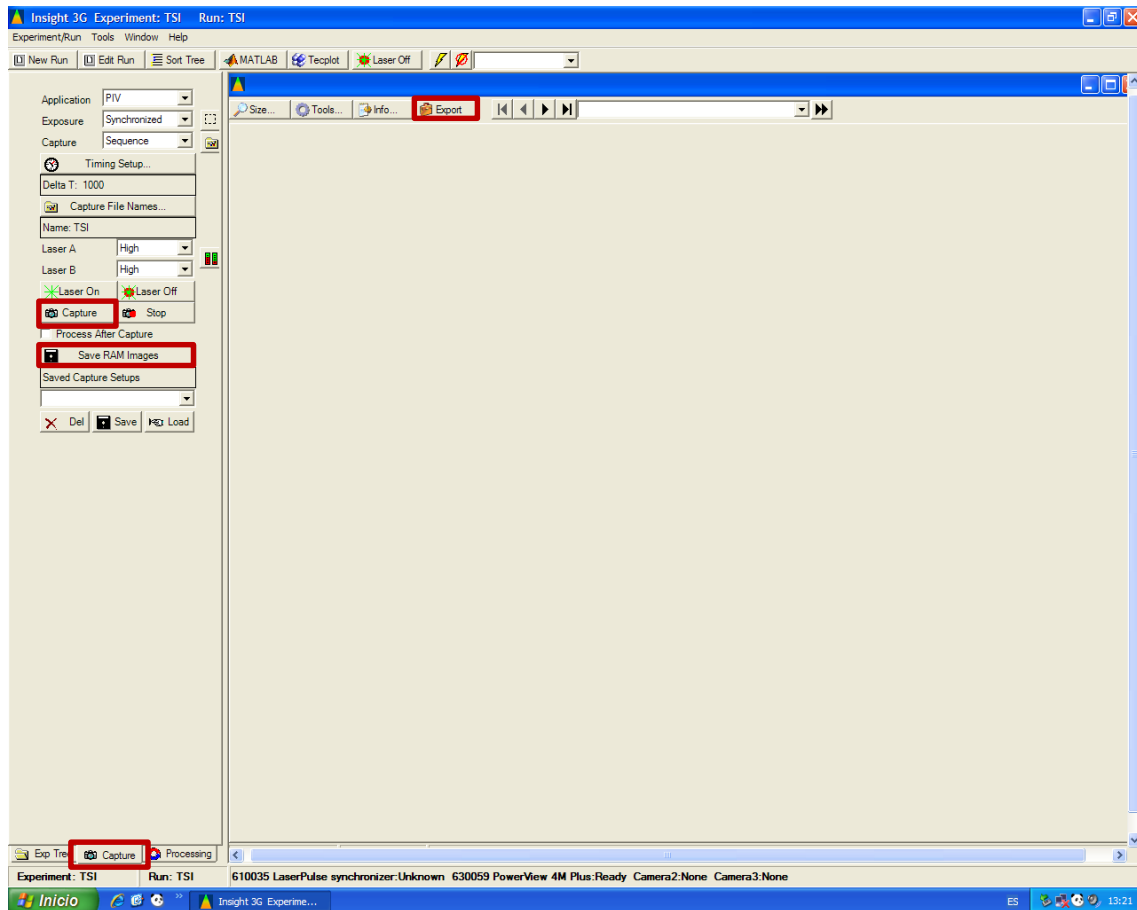


Ilustración 4.37 Pantalla principal de *Insight 3G* (autor)

5. TÉCNICA DE VELOCIMETRÍA

5.1 Principio

Uno de los principales problemas del estudio experimental en la dinámica de fluidos es el de conocer el movimiento del flujo de forma precisa, es decir para volúmenes de control muy pequeños. El desarrollo de la informática en las últimas décadas ha reducido este problema considerablemente, permitiéndonos hacer inmensidad de cálculos con cierta facilidad.

Como ya definimos en el apartado anterior la técnica elegida para el análisis del fenómeno en cuestión es PIV en dos dimensiones, por ofrecernos la precisión necesaria para el caso. Esta consiste en afrontar el problema de forma discreta. Si conocemos la posición de un volumen de control muy pequeño en un instante y la posición de ese mismo volumen de control en un instante posterior podemos definir la velocidad media a la que ha estado sometido.

$$v(s, t) = \frac{ds}{dt} \quad (5.1)$$

Y en forma discreta:

$$v(s, t) = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Por tanto, particularizando para el caso de coordenadas cartesianas 2D podemos reescribir la ecuación anterior como:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ v_z &= \frac{\Delta z}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Con la finalidad de conocer las variables de las ecuaciones anteriores el sistema *PIV* toma pares de imágenes con una separación temporal pequeña y conocida. En las mismas, captura unas partículas mezcladas homogéneamente con el fluido en cuestión (agua en nuestro caso). De tal forma, lo que realmente tenemos no es la velocidad del fluido, sino la velocidad de la partícula, solidaria al fluido en todo instante.

5.2 Partículas trazadoras

Existen varios tipos de partículas que podemos utilizar para los sistemas *PIV*, tanto en la fase sólida como en la fase líquida o gaseosa. He aquí una tabla de las más comunes:

Estado	Material	$\phi_{medio} [\mu m]$
Sólido	Poliestireno	10 - 100
	Polvos de aluminio	2 - 7
	Esferas de cristal hueco	10 - 100
	Gránulos para revestimientos sintéticos	10 - 500
Líquido	Aceites varios	50 - 500
Gaseoso	Burbujas de oxígeno	50 - 1000

Tabla 5.1

En nuestro caso nos hemos decantado por esferas de cristal blanco PRTCL – HLLW MD = 8 – 12, ofrecidas por el fabricante del equipo *PIV*, que poseen una densidad aparente de 0.39 g/m³

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta sobre las partículas insertadas en el fluido es el tiempo de relajación (τ_s), que hace referencia al tiempo necesario para que la partícula alcance el 63 % de la velocidad del flujo por arrastre. No olvidemos que la velocidad que nosotros obtendremos será la de la partícula y no la del flujo.

$$\tau_s = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18\mu_f} \quad (5.4)$$

Donde $\rho_p \cdot d_p^2$ depende directamente de la masa de la partícula. Por tanto, lo idóneo será buscar partículas con la menor masa posible.

Para analizar la óptica de la partícula, que es otra característica fundamental, utilizaremos el diagrama de Mie:

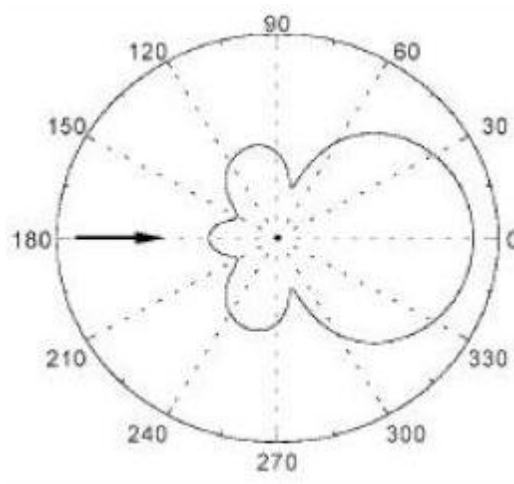


Ilustración 5.1 Diagrama de Mie. Esquema de dispersión de la luz en escala logarítmica. (Linares Ureña, 2017)

Teniendo en cuenta que la flecha representa la dirección y sentido de la luz incidente sobre la partícula, observamos en el diagrama que gran parte de la luz reflejada por la partícula mantiene tanto dimensión como sentido. El hecho de que nosotros utilicemos la luz que sale de forma normal (90°) a la luz incidente nos limita la cantidad de iluminación a menos del 50 % de la incidente. Lo cual podemos solucionar utilizando partículas de mayor diámetro y longitudes de onda (λ) menores. Ya que la dispersión de la luz (q):

$$q = \frac{\pi \cdot d_p}{\lambda} \quad (5.5)$$

A la hora de analizar la cantidad de partículas necesarias para nuestros ensayos, basándonos en la experiencia de los compañeros de laboratorio partimos de una concentración de $1.67 \cdot 10^{-3} \frac{g}{L}$ doblando la dosis posteriormente por observarse mejores resultados. Con el objetivo de hacer una mezcla homogénea y evitar los

grumos mezclamos primero la cantidad necesaria en un poco de agua que posteriormente añadiremos a la urna. En la siguiente imagen podemos ver la mezcla y los resultados obtenidos en las imágenes sin preprocesar.



Ilustración 5.2 Partículas mezcladas antes de añadir a la urna (izq.). Imagen de las partículas tomadas con el sistema PIV (drcha.) (autor)

5.3 Iluminación

Como ya introdujimos en el apartado 4 el sistema de iluminación que utilizaremos será un láser YAG (*neodymium : yttrium, aluminium garnet*) que nos ofrece pulsos con energías comprendidas entre 0.1 y 0.3 J dependiendo de la configuración. El sistema de pulsos tiene la particularidad de que la iluminación se produce en un breve periodo de tiempo, de dicho modo podemos hacer una captura casi estática.

Con el objetivo de crear una iluminación sobre un plano que seccione toda la urna por el eje del vórtice utilizamos lentes colocadas en la salida del brazo del láser. En particular serán dos: una que disperse la luz creando un plano y otra para concentrar la máxima potencia luminosa a la distancia que se encuentra el eje del vórtice.

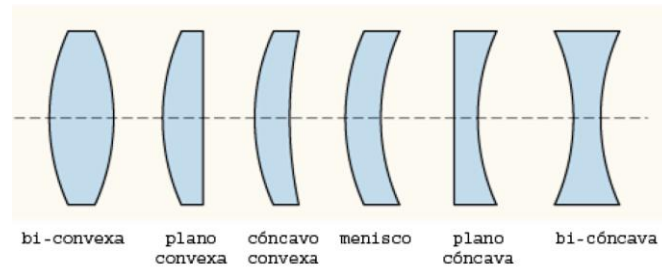


Ilustración 5.3 Combinaciones convergentes y divergentes para obtener el haz de luz deseado (Pérez Vidal, 2016)

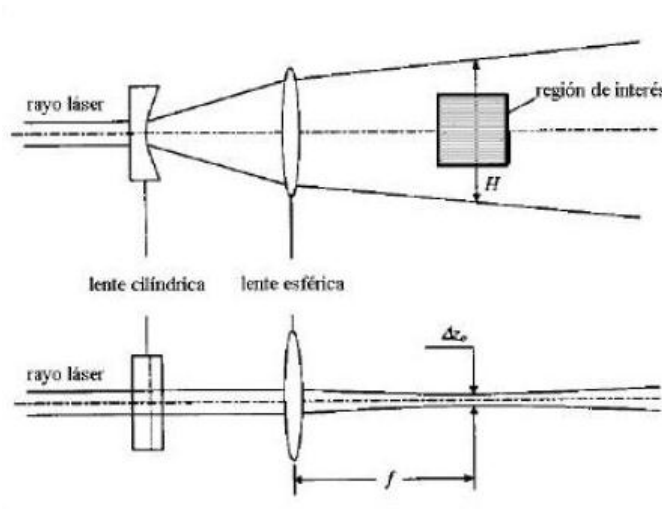


Ilustración 5.4 Configuración de las lentes para formar el plano y obtener la mayor potencia a la distancia deseada. (Linares Ureña, 2017)

De esta forma la configuración utilizada para nuestro caso será una lente cilíndrica de -15 mm y una esférica para obtener la máxima potencia a 1 m de la salida del brazo.



Ilustración 5.5 Configuración de lentes en la salida del láser (autor)

5.4 Procesado

Una vez adquiridas las imágenes, pasamos al procesado de las mismas. Para ellos nos serviremos de *Matlab*, en su versión *R2015a* y añadiremos la extensión *PIVlab* creada específicamente para estos tipos de análisis por los doctores *William Thielicke* y *Eize J. Stamhuis*. Mediante dicha aplicación importaremos las imágenes obtenidas en el paso anterior para su procesado y cálculo.

Sobre este apartado debemos incidir en la importancia de la calidad de las imágenes tomadas, ya que será uno de los parámetros más influyentes en el procesado de las mismas. No obstante, *PIVlab* nos ofrece la posibilidad de hacerle algunas correcciones con objeto de mejora.

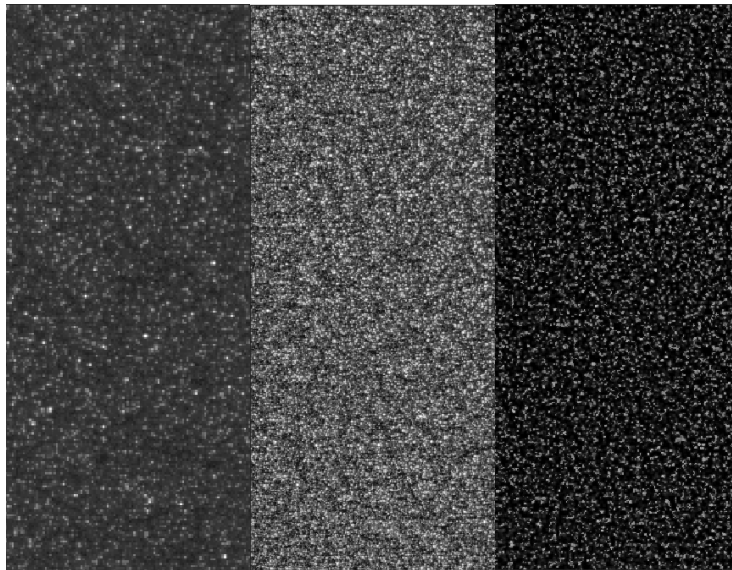


Ilustración 5.6 Imagen sin procesar (izquierda) dos procesados diferentes (centro y derecha) (autor)

Para nuestro objetivo utilizaremos un procesado de limitación de contraste con un tamaño de ventana de 20 píxeles, (imagen central) por ser las que mejores resultados nos ofrece a la hora del procesado.

En lo referente al número de píxeles con que cuentan las ventanas de cálculo nos hemos decantado por utilizar 64 x 64 con márgenes de 32 para la primera

iteración. En las posteriores reduciremos el tamaño a 32 x 32 con márgenes de 16, y 16 x 16 con márgenes de 8. Lo que resulta que obtengamos un buen *ratio* entre superficie analizada número de datos obtenidos de la misma. Ver el siguiente ejemplo.

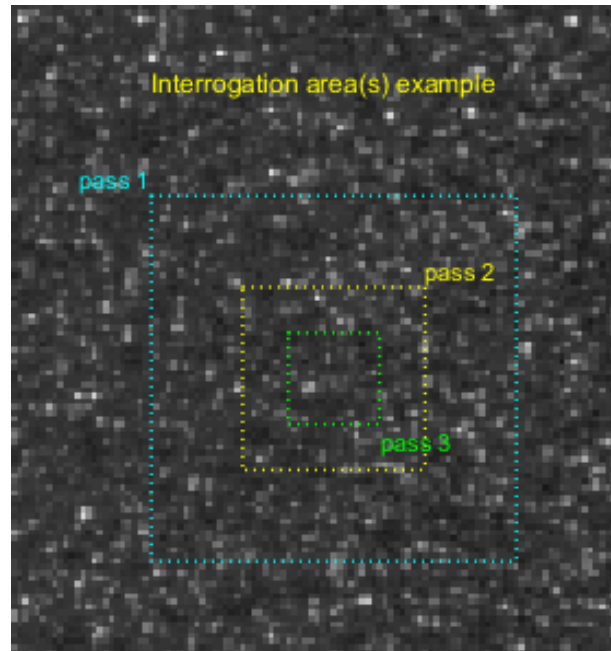


Ilustración 5.7 *PIVlab*. Ventanas de cálculo (autor)

Y ya que estamos hablando de superficie analizada no podemos pasar por alto el escalado/calibrado de la imagen, ya que de alguna forma le tenemos que indicar a *PIVlab* las dimensiones reales de nuestro experimento. Para ello, utilizaremos la imagen que contenía la regla utilizada para enfocar, e introduciremos dos puntos con el ratón. Posteriormente indicaremos la distancia entre ambos (mm) y el tiempo transcurrido entre el par de *frames* capturados (ms), como se puede observar en la imagen a continuación.

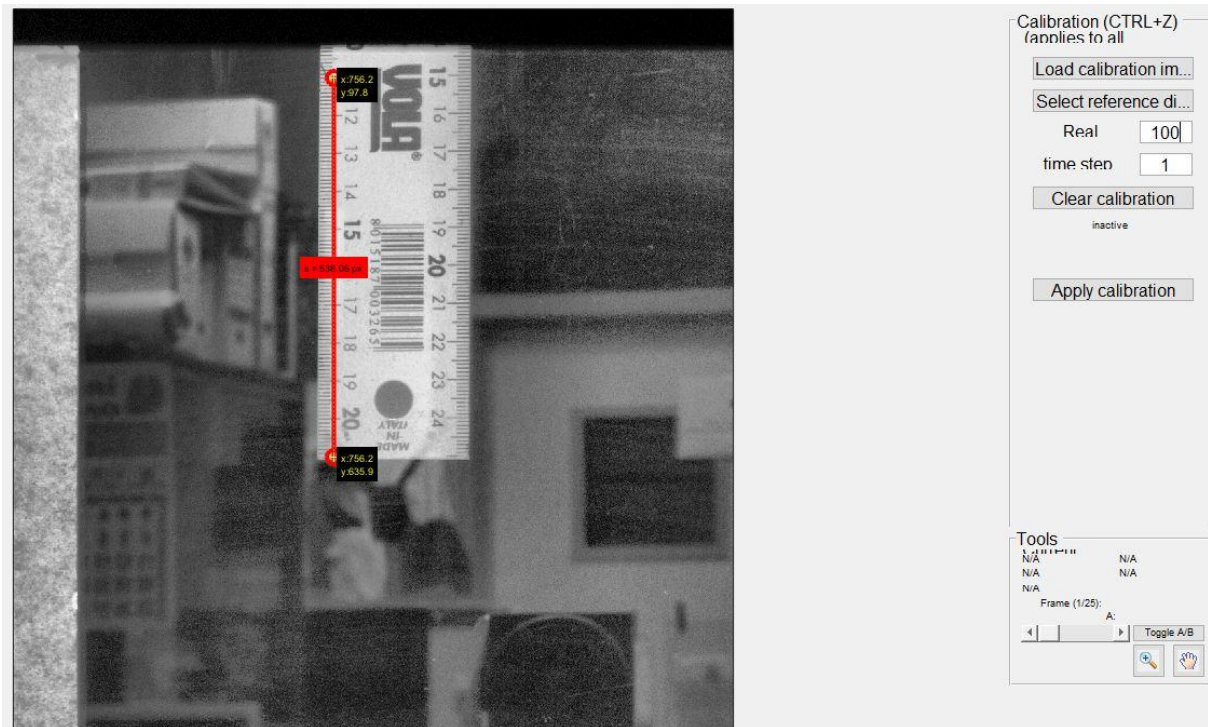


Ilustración 5.8 PIVlab. Calibración (autor)

De este modo obtenemos que una distancia de 100 mm contiene 538 pixeles. Por tanto, el ratio entre ambos es de $5.38 \frac{\text{pixel}}{\text{mm}}$. En lo referente al tiempo medido en milisegundos introducimos el valor 1, ya que en el *timing setup* de *Insight 3G* configuramos 1000 μs entre foto y foto (de cada par).

Posteriormente con la función *Exclusions* seleccionamos el área a analizar por el software y después, analizar, todos los frames. A los pocos segundos *Matlab* comenzara a trabajar, proceso que podemos observar en pantalla. Terminado el análisis podemos observar los resultados.

En primer lugar, *PIVlab* nos muestra todos los vectores velocidad obtenidos, escalados con el objeto de una buena visualización, de todos los pares de fotos analizados. Posteriormente tendremos la posibilidad de elegir el rango de velocidades que estimemos real, para eliminar gran parte del ruido. Utilidad que en nuestro caso no hemos necesitado.

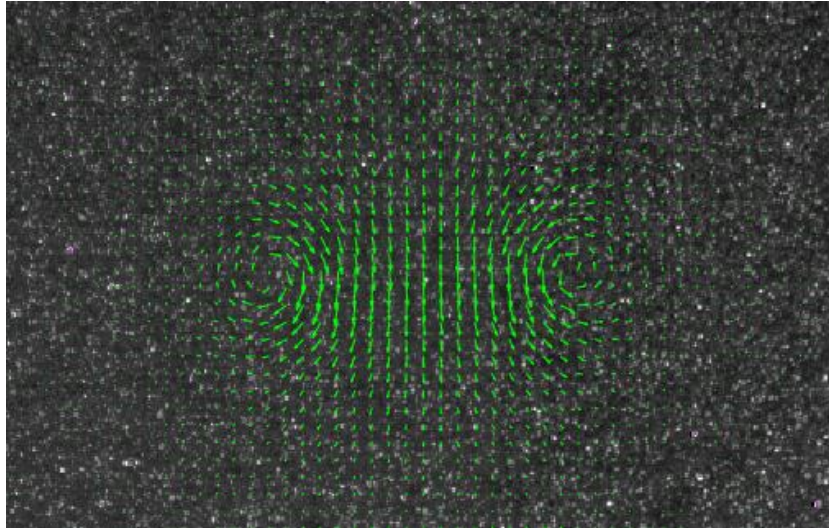


Ilustración 5.9 Vectores de velocidad obtenidos (autor)

Además de la función que nos permite seleccionar el rango de valores de la velocidad que estimemos oportuno existe la posibilidad de estudiar los histogramas de velocidad globales del ensayo con el fin de corroborar la veracidad física de los mismos. En la ilustración 5.10 podemos ver un ejemplo.

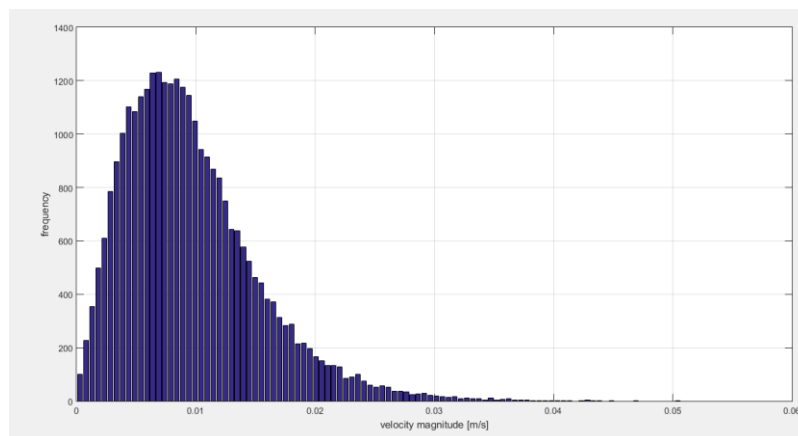


Ilustración 5.10 Grafica estadística de la velocidad absoluta (autor)

5.5 Análisis de los resultados

Validados los datos podemos pedirle a *PIVlab* que nos calcule los parámetros que consideremos oportunos. De este modo podemos hacer representaciones

graficas de algunas variables como son las velocidades y sus componentes, vorticidad, divergencia, localizadores de vórtices, etc. Aquí mostramos un par de ejemplos de las posibilidades que ofrece el software.

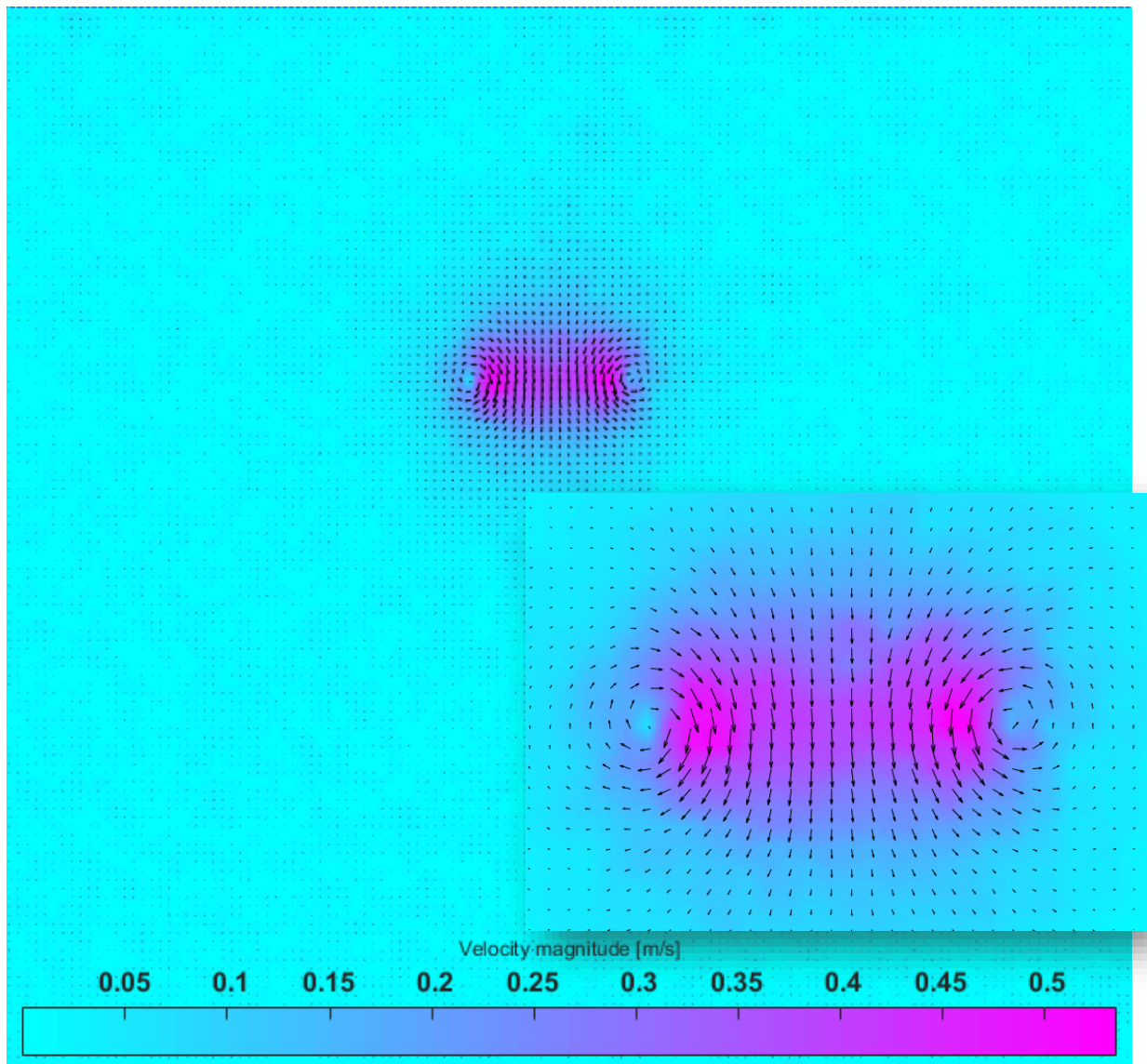


Ilustración 5.11 Vectores velocidad con rangos cromáticos para la velocidad absoluta y detalle de la zona más significativa (autor)

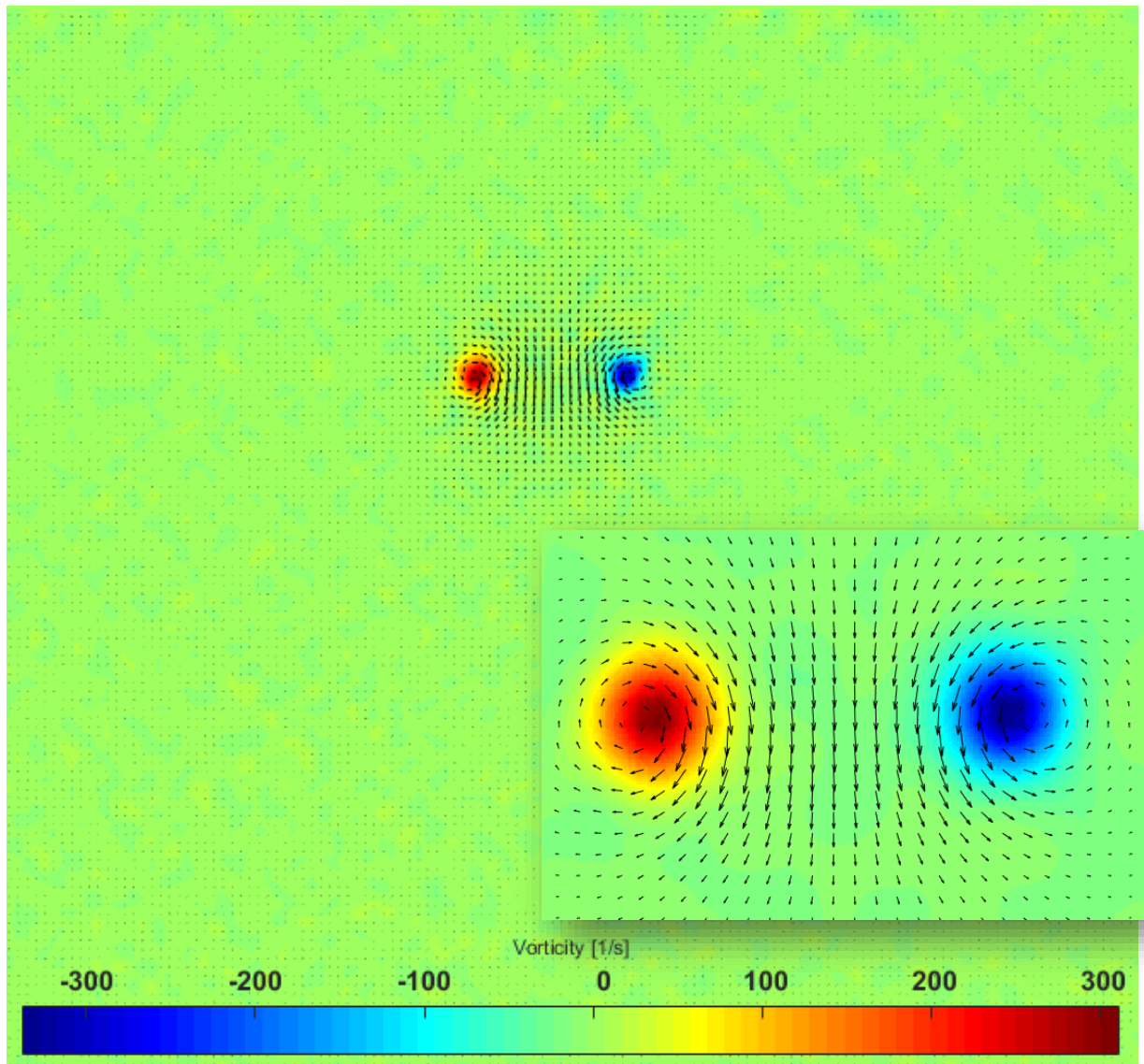


Ilustración 5.12 Vectores velocidad con rangos cromáticos para la vorticidad con detalle de la zona más significativa (autor)

Ahora exportaremos los valores obtenidos en forma de matriz, para posteriormente utilizarlos para los cálculos que falten. En nuestro caso hemos ido añadiendo archivos *.mat* a todas las carpetas donde estaban las capturas. Procedimiento que, aunque resulte tedioso, nos permitirá corroborar los datos si en el análisis posterior aparece alguna duda.

6. EXPERIMENTOS

6.1 Árbol de casos.

La cantidad de casos a manejar requiere guardar un orden, por tanto, para organizar todo nuestro análisis con las variables de entrada hemos optado por hacer un árbol ramificado con todos los casos:

- En primer lugar, dividiremos el ensayo en tres experimentos para cada una de las salidas de generación de anillos de vorticidad, que como ya dijimos antes tienen diámetros de salida de 20, 15.55 y 10 mm.
- Para cada uno de estos casos lo dividiremos a su vez en 5, en los que la diferencia será la presión en el rango indicado anteriormente.
- Por último, para cada uno de estos subcasos, realizamos ensayos con diferentes tiempos de apertura de la electroválvula.

Con todo esto hemos obtenido una combinatoria con la hemos analizado 154 casos diferentes. Con este alto número de sucesos analizados podremos estudiar la correlación entre los parámetros del anillo de vorticidad y los de entrada.

6.2 Calibrado

En primer lugar, se ha realizado un calibrado de toda la instalación:

6.2.1 Cámara

Resulta transcendental que el dispositivo de captura de imágenes este a una distancia focal concreta para lograr el equilibrio entre resolución y amplitud de campo. En nuestro caso optamos por una distancia focal de 99 cm medidos desde el objetivo hasta el eje de avance del vórtice.

Por otro lado, y no menos importante, deberemos garantizar que las capturas se toman de manera perpendicular a la pared de la urna, de no ser así la deformación que se produce en la imagen falseará los datos notablemente.

Ahora sólo queda regular la apertura del diafragma (5.6 en nuestro caso), que regularemos tomando varias imágenes con distintas aperturas para elegir la idónea y el enfoque que realizaremos como se explicó en el apartado 4.5.1.

6.2.2 Laser de pulsos

Para la calibración de dicho dispositivo comenzaremos por seleccionar las lentes con las que vamos a trabajar, buscando la configuración óptima para que el plano generado ilumine suficientemente toda la zona a analizar. En nuestro caso, ya que utilizamos la lente esférica de 1 m por ser la que más se ajusta a las necesidades, hemos localizado el cabezal del láser (ilustración 6.1) a 1 m del eje de avance del vórtice. Posteriormente hemos orientado el cabezal de forma que corte a la tobera de salida y a la salida de la burbuja por su eje.

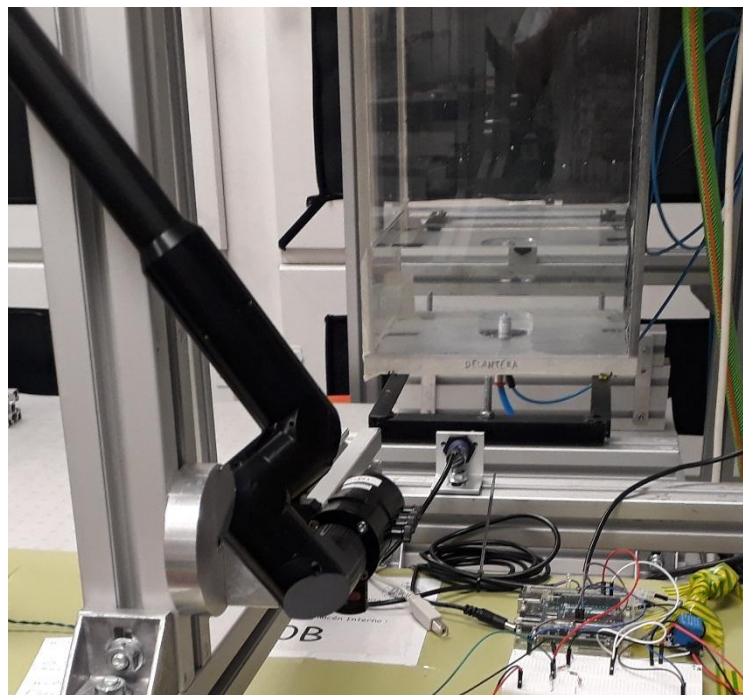


Ilustración 6.1 Cabezal del láser orientado hacia la zona de análisis (autor)

Posteriormente a este paso, realizaremos el calibrado de la potencia del láser. Como la distancia del terminal a la zona de análisis es grande, trabajaremos con el láser a pleno rendimiento, de este modo obtendremos la mayor iluminación posible. Sobre este aspecto nos ha surgido el problema de que ambos pulsos del láser no ofrecen la misma cantidad luminosa por defecto de calibración interna de la unidad de generación de pulsos. Dicho inconveniente se ha minimizado al máximo, pero no se ha conseguido corregir del todo. Por tanto, nos vemos obligados a configurar un láser al 100% y el otro en torno al 70%. De este modo, restamos potencia lumínica al laser que iluminaba más obteniendo que las fotos de un mismo par tengan una iluminación semejante. Como podemos observar en la siguiente imagen.

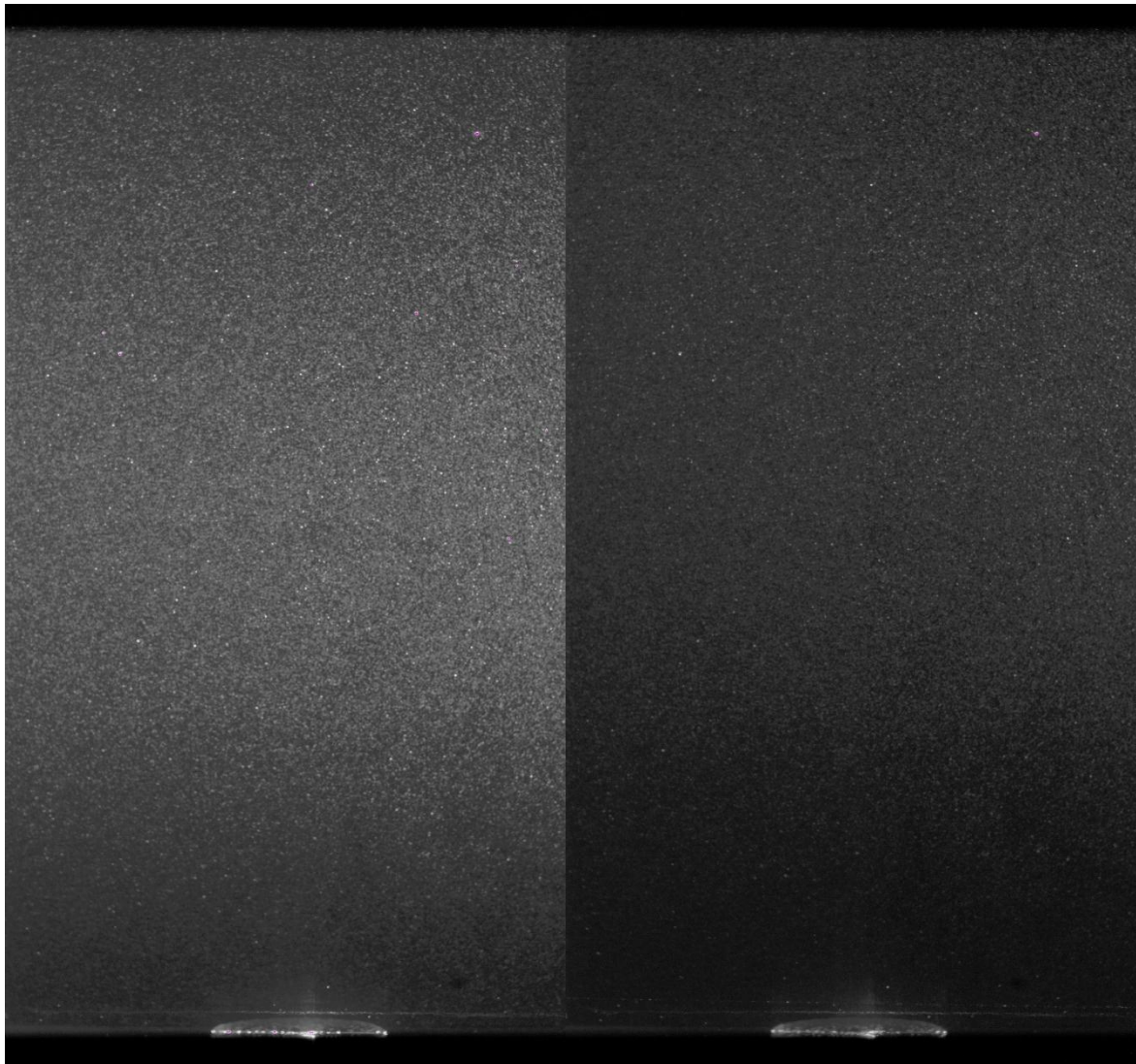


Ilustración 6.2 Par de imágenes donde se puede observar la diferencia de iluminación. (autor)

6.3 Homogeneidad

Con el objetivo de que los experimentos guarden la mayor homogeneidad posible se hicieron todos los ensayos en días consecutivos sin cambiar el fluido del banco de trabajo, eso sí, realizando un batido intenso al inicio de la jornada para garantizar la homogeneidad de la mezcla. Del mismo modo se han mantenido todos los dispositivos utilizados para el ensayo en la misma posición (laser, cámara CCD, tobera de salida, etc.). También resulta importante comentar que, al inicio de la toma de capturas es necesario comprobar que los flancos de la urna están bien limpios, de forma que no creen reflejos u opacidades que falseen nuestros datos.

7. POSTPROCESADO

Una vez realizados todos los ensayos y extraído las matrices de datos de los mismos con *PIVlab* procesaremos dichos datos mediante un script de Matlab creado al efecto, que lee la matriz de cada caso y calcula todos los parámetros que analizaremos posteriormente.

Para hacer funcionar el script basta con modificar la ruta y el nombre de los ficheros que vamos a leer. También será necesario modificar en las primeras líneas algunos de los datos de cada caso (tiempo de apertura, presión, y diámetro de la tobera), y ejecutar el código. Posteriormente se nos abrirá una ventana ofrecida por la orden *quiver* en la que tenemos que clicar con el ratón en los puntos de máxima vorticidad (eje de giro del vórtice). Este procedimiento nos permitirá conocer posteriormente el diámetro del vórtice y su posición en cada captura. En el caso de que los puntos no se observen bien definidos cancelar y modificar el parámetro 'escala' de las primeras líneas antes de volver a ejecutar. Este factor modifica la escala de visualización de los vectores, permitiendo su ajuste una mejor visualización. Aquí mostramos un ejemplo.

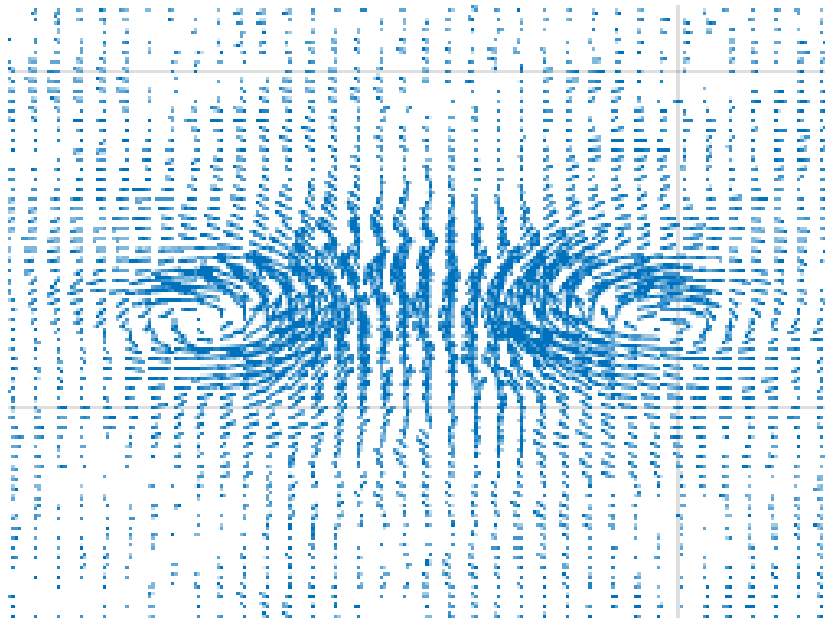


Ilustración 7.1 Imagen obtenida con la con la orden *quiver* para establecer la posición (autor)

Cuando el script termina genera 3 gráficas (ilustración 7.2) para comprobar la tendencia de los datos obtenidos. Además, escribe los escribe en un documento de Excel en la carpeta donde se encuentran tanto las imágenes como las matrices analizadas.

El paso siguiente será abrir el Excel creado y copiar los datos a otro archivo de la misma extensión en el que guardaremos los datos de todos los casos. Posteriormente haremos las representaciones graficas que estimemos oportunas. Las gráficas generadas se encuentran adjuntas en el anexo II de este documento.

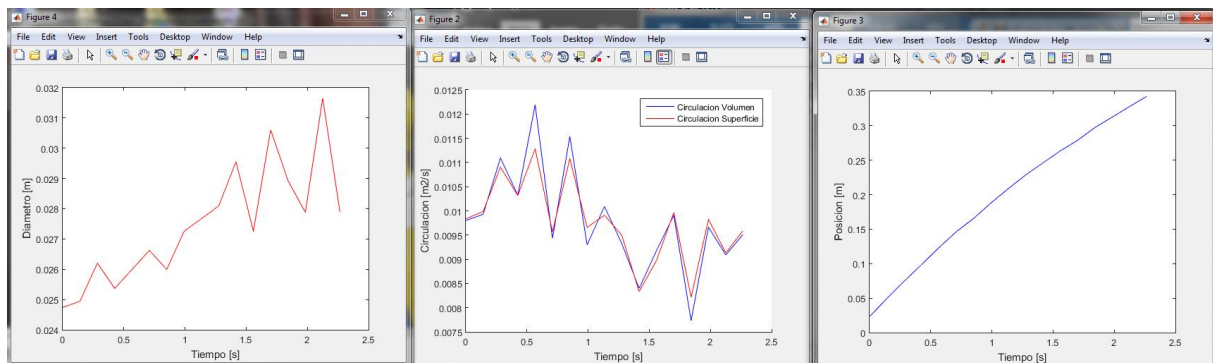


Ilustración 7.2 Diámetro del vórtice, circulación y posición; todos con respecto al tiempo (autor)

8. CONCLUSIONES

Haciendo un análisis del trabajo y los resultados hemos de recalcar la importancia que ha tenido el control electrónico del sistema, el cual nos ha ofrecido una precisión asombrosa y una capacidad de mejora más que considerable sobre los trabajos realizados previamente. Esto nos ha permitido realizar un árbol de casos bastante extenso y tener un control de los circuitos hidráulico y neumático sinceramente excelente.

En lo referente al equipo de obtención de datos, sí hemos observado algunas partes que resultan bastante críticas para hacer un estudio preciso de las magnitudes medidas en nuestros ensayos.

El primero y principal es la resolución de la cámara CCD, que solamente capta imágenes de 4 megapíxeles, lo cual nos ha llevado a buscar un equilibrio entre calidad de la imagen y superficie analizada. En primer lugar, se hicieron capturas a 1 m de distancia, obteniendo una longitud de avance analizada de unos 35 cm, pero dichas imágenes no eran lo suficientemente precisas en ciertos casos, por lo que posteriormente se tuvo que realizar capturas de esos casos precisos con la cámara a una distancia de 50 cm, obteniendo capturas del anillo de vorticidad en su avance a lo largo de unos 20 cm. Estos datos se pueden observar en las gráficas incluidas en el anexo II, en el que se observa claramente que unos datos tienen un rango de 0 a 35 cm y otras se solamente de 0 a 20 cm.

El segundo dato a tener en cuenta respecto a la cámara con la que se han tomado las imágenes es la frecuencia de captura, que es de 16 fps, que nos limita la adquisición de datos a un máximo de 7.5 pares de fotos por segundo. Dato que, teniendo en cuenta la velocidad de avance del vórtice se traduce en una media aproximada de unos 10 datos de cada ensayo y sólo 3 datos en algunos de los casos

más desfavorables respecto a este aspecto (las velocidades de avance mayores se han producido con la tobera de salida de 10 mm).

Por su parte, la combinación laser/software, ha estado presentando pequeños fallos durante todo el proceso de captura de imágenes. Principalmente compuestos por la sincronización del láser y configuración del '*timming setup*', a lo que el software no siempre respondía a la configuración introducida.

Deteniéndonos ahora en el sistema de postprocesado de imágenes, mencionar que, aunque tedioso, ha sido un proceso bastante satisfactorio ya que, tanto *PIVlab* como por el *script* de cálculo de magnitudes ([anexo III](#)) han ofrecido un amplio abanico de posibilidades a realizar con los datos obtenidos, demostrando una vez más, la importancia que hoy en día tiene la informática en el análisis fluido-dinámico.

Una vez analizados los pros y contras del procedimiento de trabajo utilizado vamos a centrarnos en los resultados obtenidos:

El sistema hidráulico/neumático nos ha permitido crear anillos de vorticidad bastante bien definidos con diferentes características, como pueden ser el diámetro del anillo, velocidad de avance, circulación producida, etc. Dichos parámetros han sido analizados posteriormente graficándolos para comprobar su fundamento físico. Podemos observar algunos de estos resultados en el [anexo II](#).

Centrándonos en la circulación y su dependencia de las variables de entrada introducidas (presión, tiempo de apertura y diámetro de la tobera de salida) podemos concluir que se observa una dependencia lineal de forma bastante férrea respecto al tiempo de apertura de la electroválvula para prácticamente todos los casos, lo cual se

puede comprobar simplemente de manera visual observando las gráficas, en las que los datos equiespaciados en tiempo de apertura también presentan la misma circunstancia para la circulación. Respecto a este dato, también parece necesario recalcar que conforme aumenta la circulación y la velocidad de avance, también aumentan las inestabilidades. De tal forma, para altos números de *Reynolds* los vórtices pierden más circulación que para bajos números de *Reynolds*. En la siguiente grafica podemos ver un ejemplo en el que se aprecia dicha dependencia y cómo a partir de tiempos de apertura de 200 ms ($Re \approx 23000$) el anillo de vorticidad se disipa levemente.

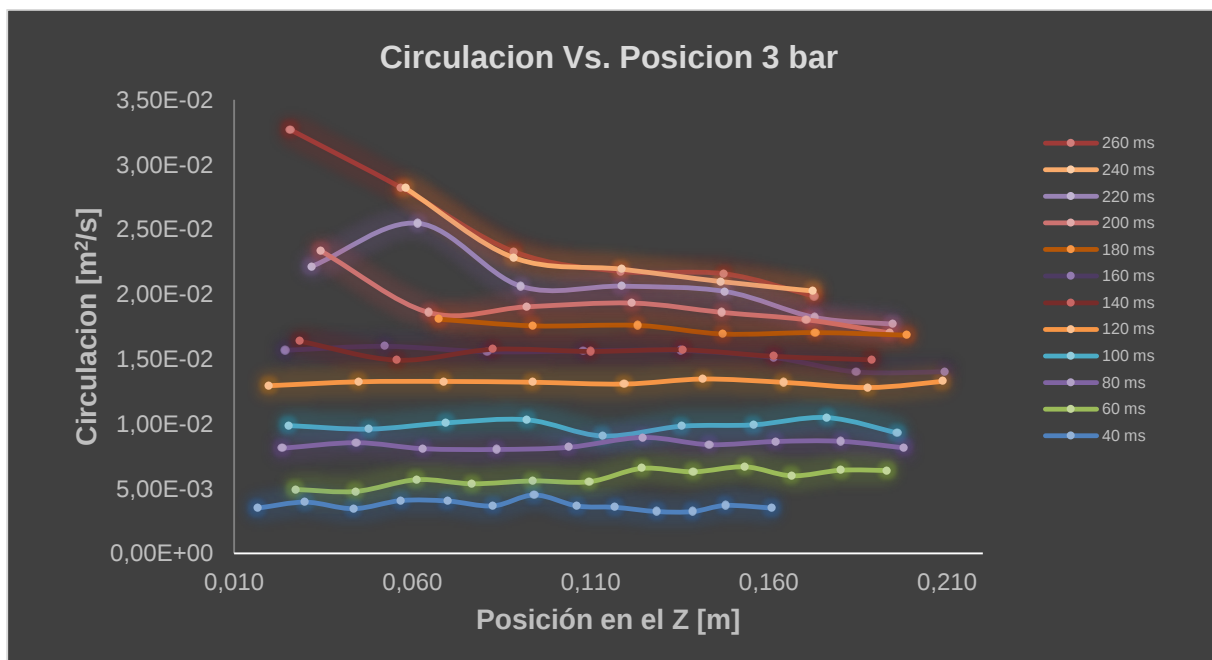


Ilustración 8.1 Tobera de 20 mm. Presión 3 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

Si ahora analizamos la circulación en función de la presión a la entrada, observamos que la dependencia también es lineal, pero en este caso aumenta aproximadamente con el doble de la presión. Respecto a este dato, no podemos hacer grandes aproximaciones, ya que no conocemos la presión de descarga de la tobera de salida, sino la del depósito presurizado al efecto. Como bien es sabido, la pérdida de carga de un circuito hidráulico, depende directamente del caudal que circula por el mismo, por tanto, la pérdida de presión no será la misma para diferentes presiones en el depósito y tiempos de apertura de la electroválvula y no podemos conocer de

manera cuantificable la presión de descarga. Esto nos lleva a utilizar simplemente la presión introducida en el circuito a sabiendas de que no es un dato lo suficientemente preciso. Para subsanar este problema se plantearán diferentes opciones en el siguiente capítulo. Los resultados obtenidos los podemos observar en la siguiente gráfica.

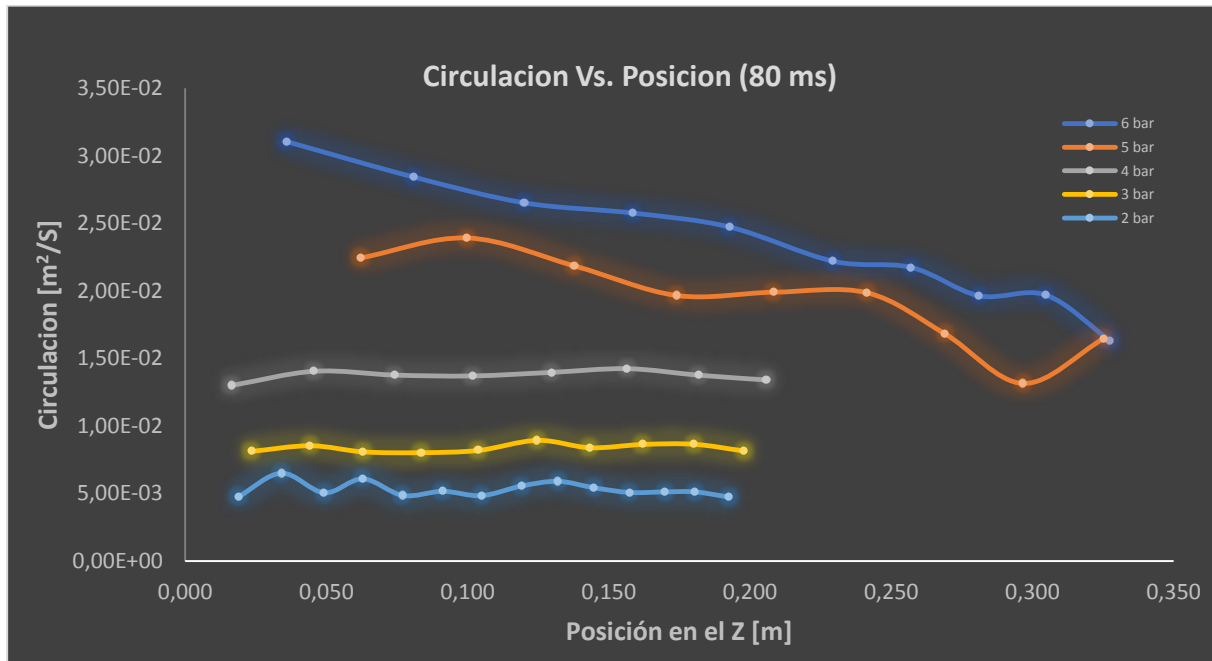


Ilustración 8.2 Tobera 20 mm. Tiempo de apertura 80 ms. Circulación variando la presión del depósito

Al analizar la influencia del diámetro de salida en la circulación producida por el anillo de vorticidad vemos que la dependencia observada también es lineal, pero teniendo en cuenta que sólo tenemos tres toberas de diferentes diámetros no creemos conveniente y preciso concretar esta relación. Además, los datos obtenidos con la tobera de salida más angosta (10 mm) son demasiado escasos y poco precisos en comparación con las otras dos. No obstante, aquí podemos ver un ejemplo de dicho análisis.

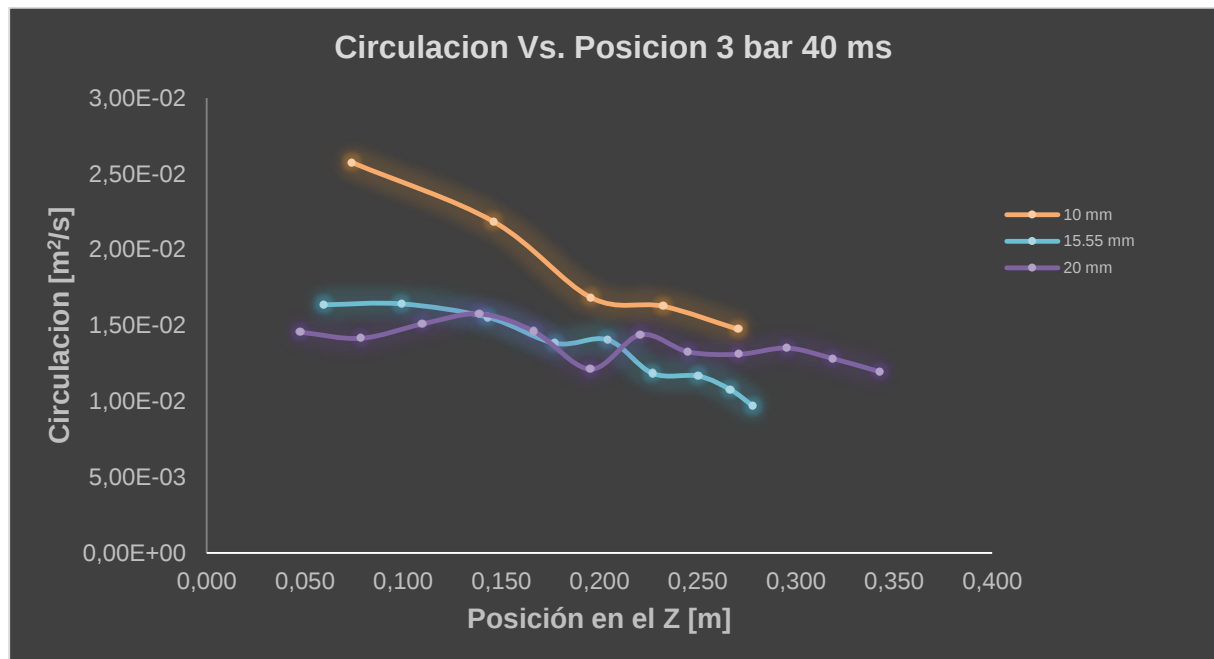


Ilustración 8.3 Circulación un tiempo de apertura de 40 ms y una presión de 3 bar, variando el diámetro salida.

Haciendo un análisis adimensionalizado de los ensayos realizados se observa una clara convergencia del parámetro adimensional 2, que relaciona la circulación con la velocidad de avance y el diámetro de salida, tal y como se describió en el [capítulo 3](#). En los datos graficados se observa que la variación entre ellos es mínima (eje y de las gráficas) obteniendo un error del orden de 10^{-4} . En el [anexo](#) de gráficas se muestra dicho parámetro para las presiones de 6 bar y 3 bar de forma independiente. Además, también están graficados los datos para todas las presiones ensayadas con la tobera de salida de 20mm. No obstante, a continuación, incluimos la gráfica de 6 bar que lo corrobora.

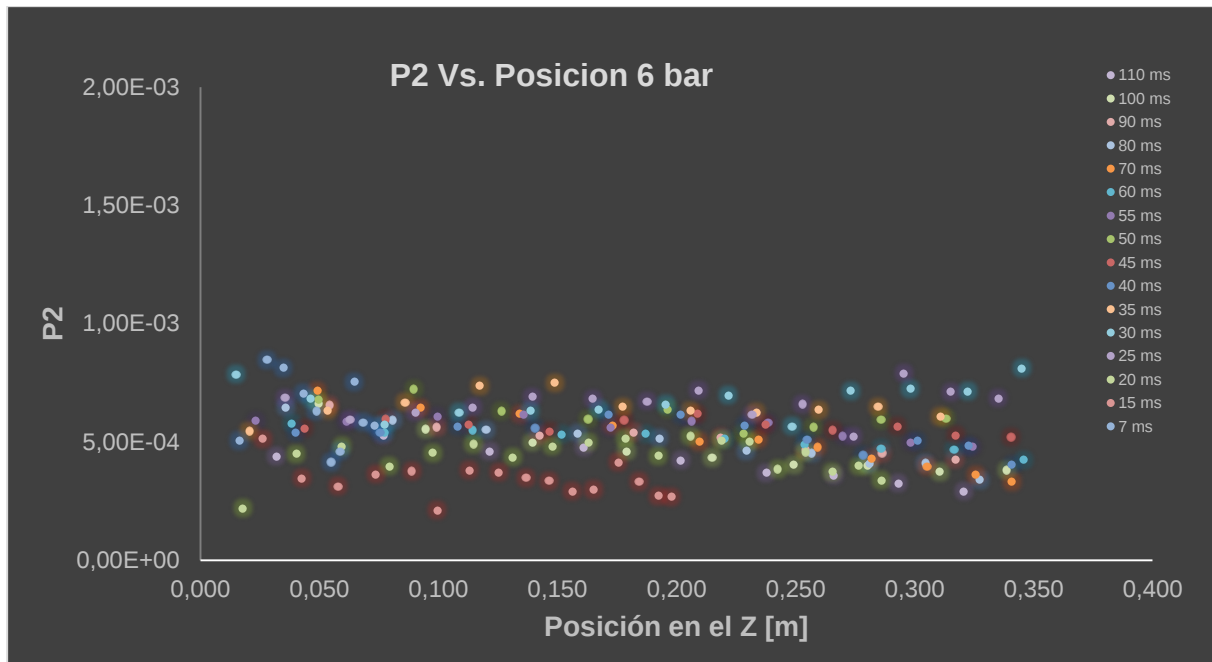


Ilustración 8.4 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura.

No ocurre lo mismo con el parámetro adimensional 1, y esto es claramente debido al desconocimiento exacto de la presión de descarga justo en la tobera de salida. No obstante, se observa como los datos varían dibujando un abanico parecido al obtenido al representar la circulación frente a la posición variando el tiempo de apertura de la electroválvula. Aquí mostramos una gráfica de dicho resultado:

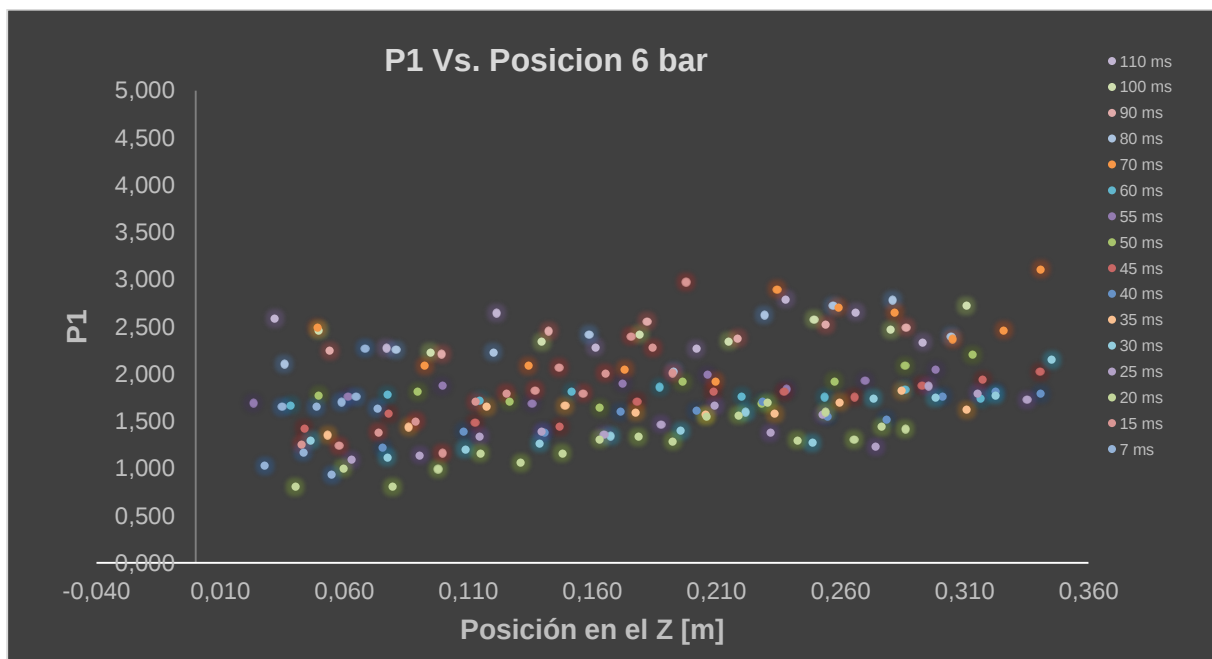


Ilustración 8.5 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura.

A la hora de estudiar la velocidad de avance del vórtice en función del tiempo de apertura de la electroválvula observamos una dependencia bastante consistente. Respecto a este parámetro, no hemos creído conveniente representar directamente la velocidad sino el avance del vórtice con respecto al tiempo para diferentes tiempos de apertura, obteniendo así un abanico de rectas (no son así por la disipación de energía) cuya pendiente corresponde a la velocidad expresada en m/s. En la siguiente gráfica se puede observar dicha dependencia. Además, también se demuestra como los anillos de vorticidad para tiempos de apertura inferiores a 20 ms son algo escasos.

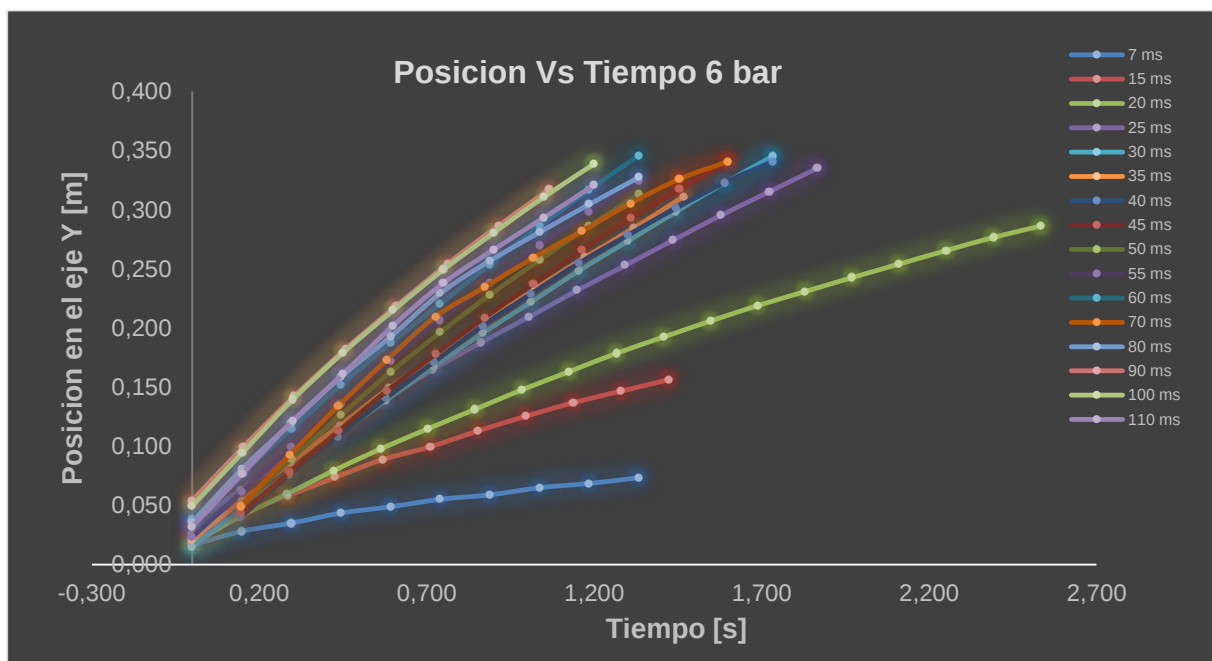


Ilustración 8.6 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Avance del vórtice para diferentes tiempos de apertura.

Por tanto, podemos concluir que nuestro estudio ha sido bastante satisfactorio para determinar los parámetros del vórtice en función del tiempo de apertura de la electroválvula ya que podemos realizar variaciones conocidas con precisión. Del mismo modo, el estudio de los parámetros del anillo de vorticidad en función de las otras dos variables de entrada no han sido lo precisos que deseamos, por desconocimiento del valor en el punto de descarga para el caso de la presión y por necesidad de un equipo que nos permita capturar más datos por segundo en el caso de la tobera de 10 mm.

En lo referente al análisis de pseudotransitoriedades en función del número de *Reynolds*, este último problema (la frecuencia de toma de imágenes del equipo) nos ha limitado lo suficiente como para no poder realizar un análisis del mismo.

9. TRABAJOS FUTUROS

Como nuestro estudio ha presentado diversas limitaciones, como las comentadas anteriormente, en este capítulo propondremos algunas soluciones que hemos ido recabando a lo largo del trabajo. Además de incluir algunas mejoras que pensamos pueden resultar bastante interesantes.

9.1 Mejoras en de automatización del sistema hidráulico/neumático.

En lo referente al problema de desconocimiento de la presión en la tobera de salida en el momento de la descarga existen sensores de presión compatibles con Arduino que ofrecen muy buen rango de funcionamiento y errores de medición inferiores al 1.5% del rango del mismo a un precio bastante económico. De esta forma, con un sensor de rango 0-8 bares podríamos obtener una lectura en una zona próxima a la electroválvula en el tiempo de descarga con un error inferior a 0.12 bar.

Aquí mostramos un ejemplo de una infinidad encontrados en internet.



Ilustración 9.1 Sensor de presión *OPEN-SMART* (Lualtec.es, s.f.)

Especificaciones:

- Alimentación: 5 V DC
- Corriente de trabajo: $\leq 10\text{mA}$
- Escala de presión: 0 - 0,5 MPa
- Soporta presiones menores de 1,5 MPa
- Presión máxima admitida: 3,0 MPa (se destruye si es mayor)
- Temperatura de trabajo: 0 - 85°C
- Error en la medida: 1,5%
- Tiempo de respuesta: $\leq 2\text{ms}$
- Rosca: $\frac{1}{4}$ in
- Cables: amarillo (datos), rojo (VCC), negro (GND)

Del mismo modo, para conocer la velocidad media del flujo durante la descarga en la tobera de salida existen caudalímetros compatibles con nuestra instalación que podríamos instalar en el sistema de descarga. Conocido el caudal durante el tiempo de apertura y la sección de salida podremos obtener velocidades medias de descarga suficientemente precisas. Como en el caso de los sensores de presión mostramos un ejemplo de los encontrados en diferentes proveedores:



Ilustración 9.2 Caudalímetro YF-S201 (Flux Work Shop, s.f.)

Especificaciones:

● Flujo SKU: BDAA100184 ● Marca: SIN MARCA / GENÉRICOS ● MPN: YF-S201 ● Largo: 62 mm ● Ancho: 35 mm ● Altura: 35 mm ● Tipo de embalaje: OEM	● Color principal: Negro ● Voltaje de la impulsión: 4.5 – 24 V DC ● Tensión recomendada: 5 - 18V DC ● CARACTERÍSTICAS: Salida de 5V TTL 1 - tasa de flujo de 30 L/min Rango de humedad de 35% - 80% ±10% de precisión presión de agua de 2.0 MPa máximo Ciclo de trabajo de salida de + - 10% 50% tiempo de subida de salida 0,04 µs tiempo de caída de 0,18 µs salida	● Sorteo actual: 15 mA (5V) ● Factor de forma: 1/2 pulgada rosca conectores Plomo 15cm ● Velocidad de patillas: 2.54 mm ● Temperatura de funcionamiento: -35° C a 80° C (sin confirmar) ● Cantidad de piezas: 1 ● Elementos incluidos: 1 sensor de flujo de YF-S201
--	---	--

Otro de los puntos mejorables del sistema es la aparición de pequeñas y medianas burbujas de aire en la parte vertical de la tobera de salida, tanto por disociaciones del aire disuelto en el flujo de entrada ante la caída brusca de presión como por acceso por la parte inferior. Teniendo en cuenta que la relación de densidades entre el agua y el aire es de aproximadamente 10^3 , estas burbujas aun siendo pequeñas, alteraran la densidad del flujo de salida, además de introducir cierto ruido en las imágenes.

Para intentar solventar o minimizar este problema se nos ocurre una solución a estudiar *in situ*. Dicha solución pasa por instalar un sistema de purgado automatizado mediante Arduino que succione fluido por la parte superior, que ya consta con una salida, y deposite dicha porción de líquido de nuevo en la urna justo después de cada creación de anillo de vorticidad. De tal forma, trascurridos unos 10 segundos posteriores al ensayo, se activaría una pequeña bomba, extrayendo el flujo con burbujas por la parte superior, de forma que la misma tobera succione flujo sin burbujas de la urna.

9.2 Estudio de pseudotransitoriedades

Como ya se comentó anteriormente, el estudio de pseudotransitoriedades para números de Reynolds altos no ha sido posible debido a la frecuencia de captura del equipo de adquisición de datos. Para solventar dicho problema será necesario un equipo con mayor frecuencia de captura. Por ejemplo, se podría utilizar alguna de las *fast cam* (capaces de capturar cientos de imágenes por segundo con una resolución aceptable para nuestro análisis) existentes en el laboratorio, teniendo en cuenta que

dicho sistema carece de sincronización con PIV y por tanto no podríamos calcular circulación y otros parámetros, pero si posicionamiento del vórtice en instantes bastante precisos, pudiendo así, estudiar las oscilaciones en el avance del mismo. Para dicho cometido (visualización del vórtice), podremos utilizar algún tipo de colorante en el flujo de entrada o simplemente utilizar las pequeñas burbujas que se crean en el momento de la descarga (si creamos varios vórtices consecutivos se irán formando burbujas pequeñas en la tobera de salida).

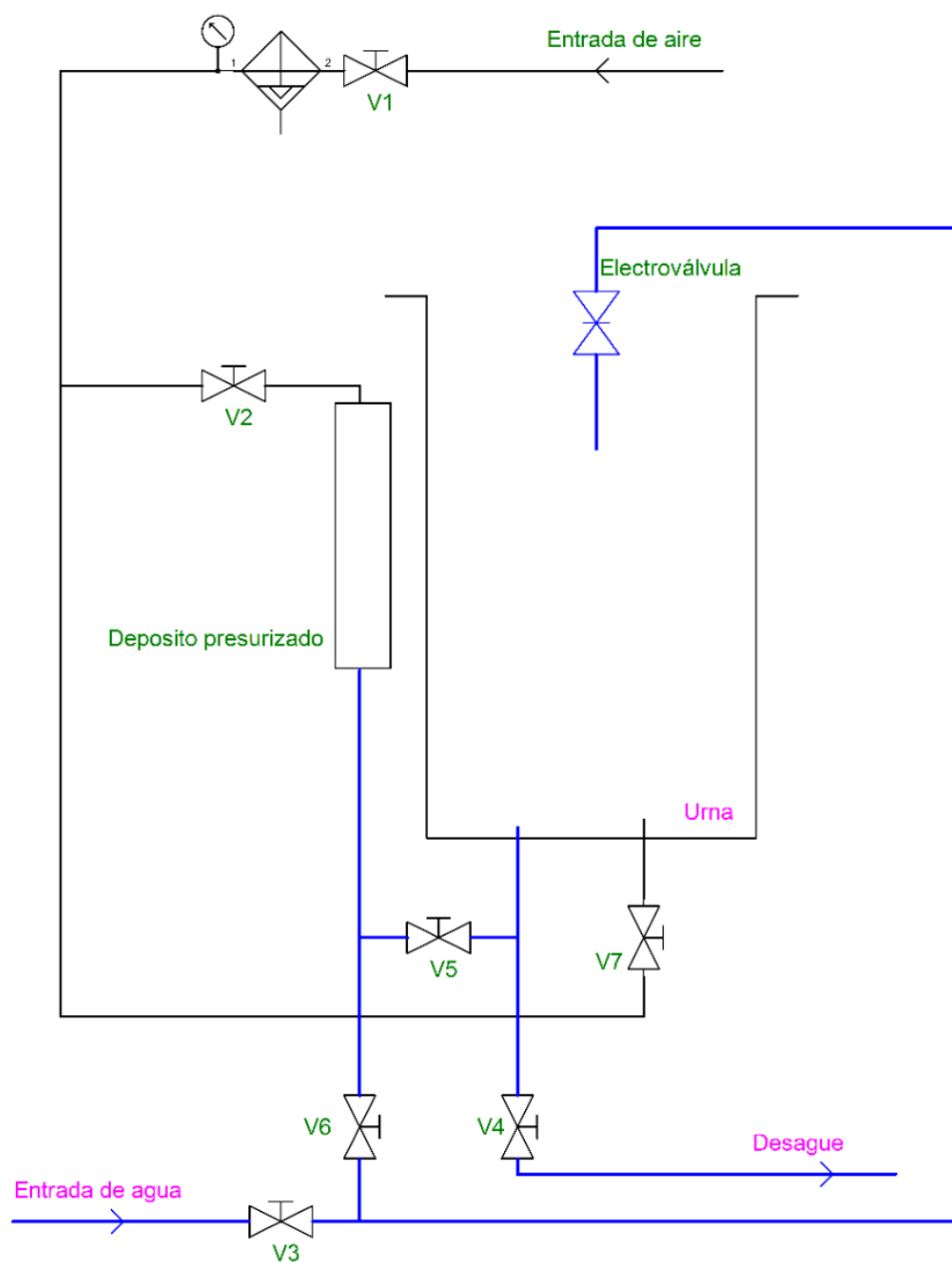
9.3 Análisis de interacción anillo de vorticidad-burbuja.

El objeto principal del análisis es la interacción entre un anillo de vorticidad y una burbuja que avanzan sobre el mismo eje y en sentido opuesto. Ya se comentó anteriormente que, debido a la tediosidad, el estudio en esta parte únicamente nos centraríamos en el estudio y caracterización de los anillos de vorticidad. Por tanto, la siguiente parte a realizar será el análisis de la interacción de los mismos.

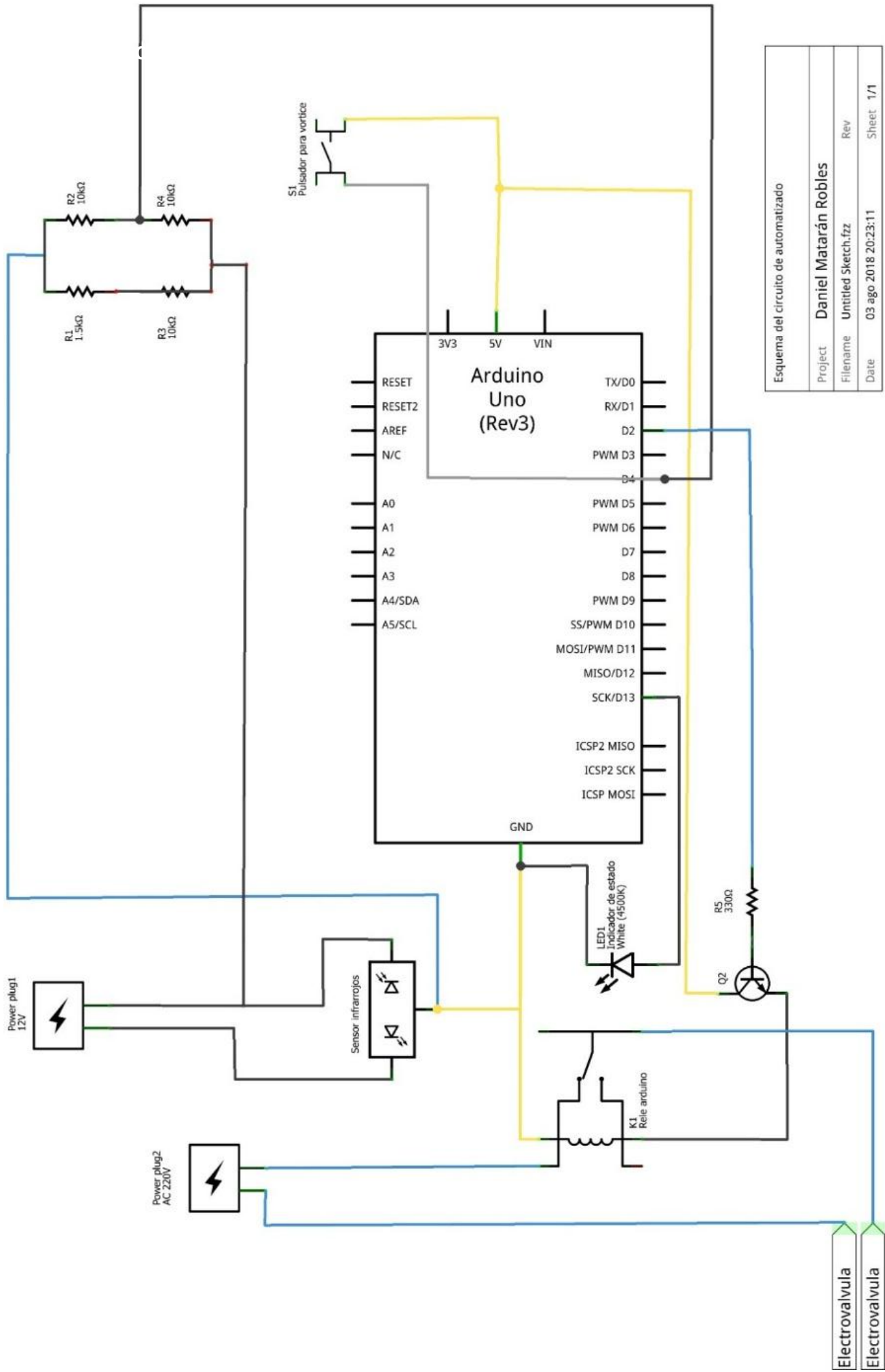
Una de las partes a tener en cuenta sobre este asunto es la imposibilidad de realizarlo con el equipo de captura de datos utilizado hasta el momento, teniendo que utilizar un sistema con una frecuencia de captura mucho mayor. Tengamos en cuenta que tanto la formación de la burbuja como la interacción entre ambas partes se produce en periodos de tiempo bastante cortos y para captarlos será necesario tomar un elevado número de imágenes y posteriormente seleccionar en las que aparece nuestro suceso a analizar. No será necesario utilizar el sistema PIV, ya que la caracterización del vórtice es conocida. Por tanto, al igual que en el apartado anterior, podremos utilizar una *fast cam*.

Una vez realizadas las tomas de imágenes se procederá a su análisis para corroborar que se cumplen los fundamentos teóricos descritos en el apartado 2.2.

ANEXO I: Planos



Dep. responsable	Referencia técnica	Creado por Daniel Matarán Robles	Aprobado por	Escala N/D
		Tipo de documento	Estado del documento	Rev.
		Título, título suplementario Esquema de instalación hidráulica/neumática		
		Fecha de edición 14/08/2018	Idioma	Hoja 1/1



Esquema del circuito de automatizado

Project Daniel Matarán Robles

Filename Untitled Sketch.fzz

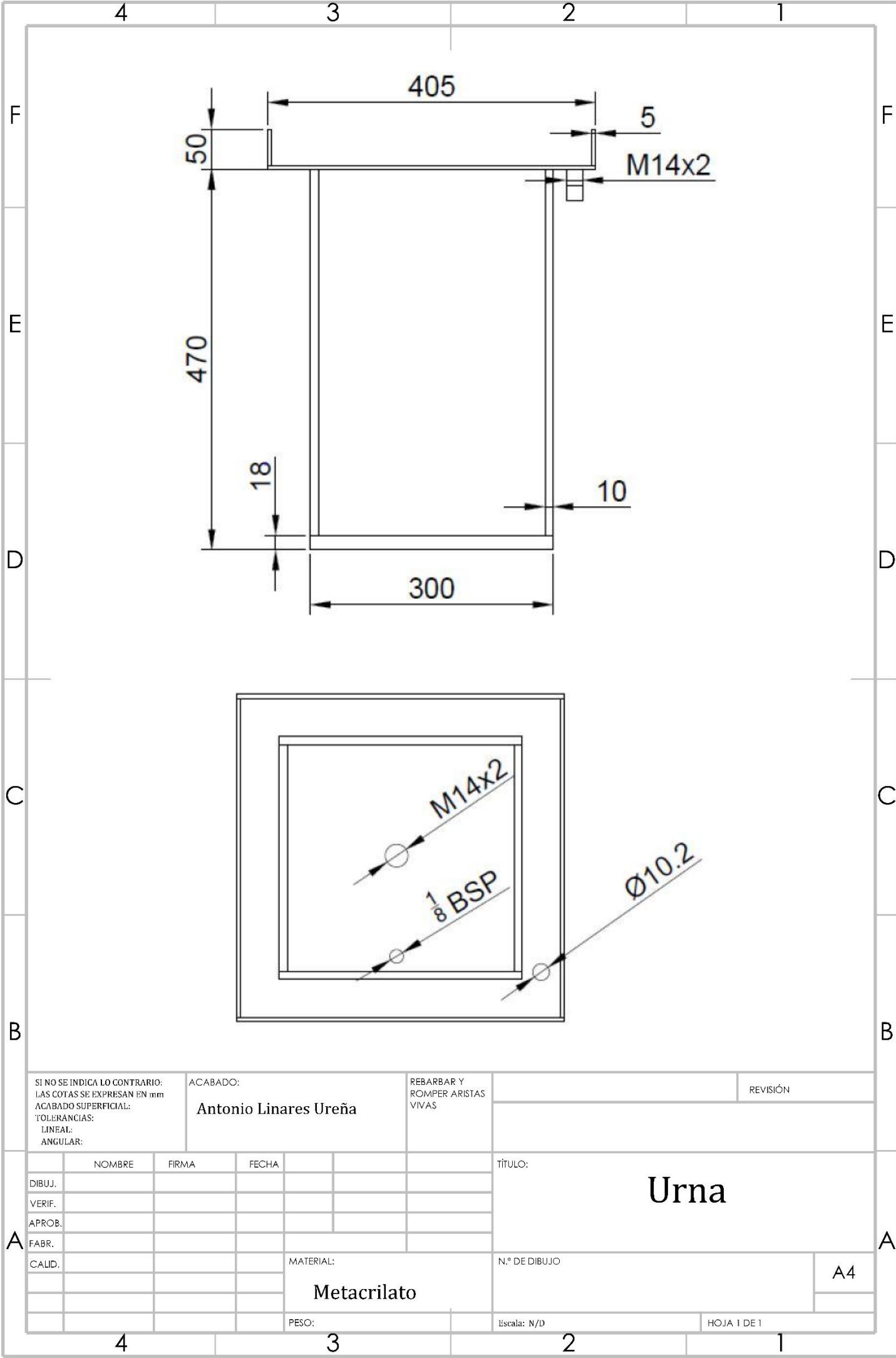
Rev

Date 03 ago 2018 20:23:11

Sheet 1/1

Electrovalvula

Electrovalvula



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:
Antonio Linares Ureña

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

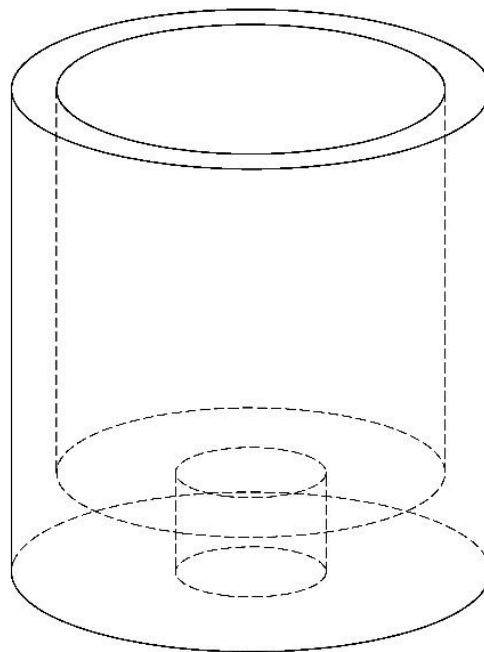
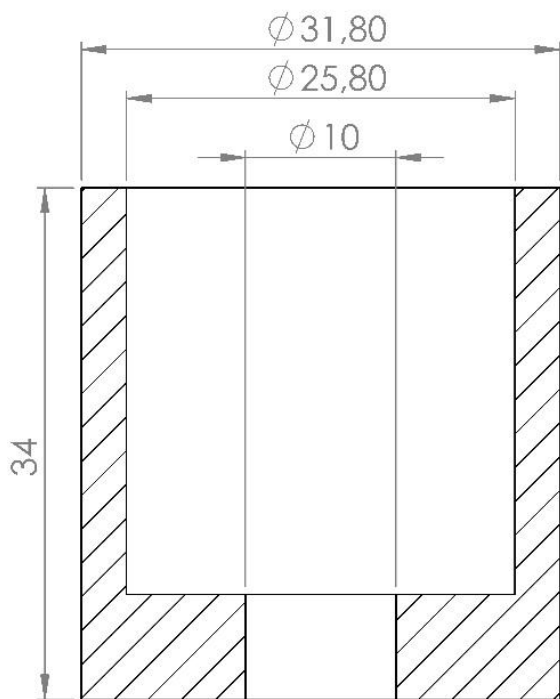
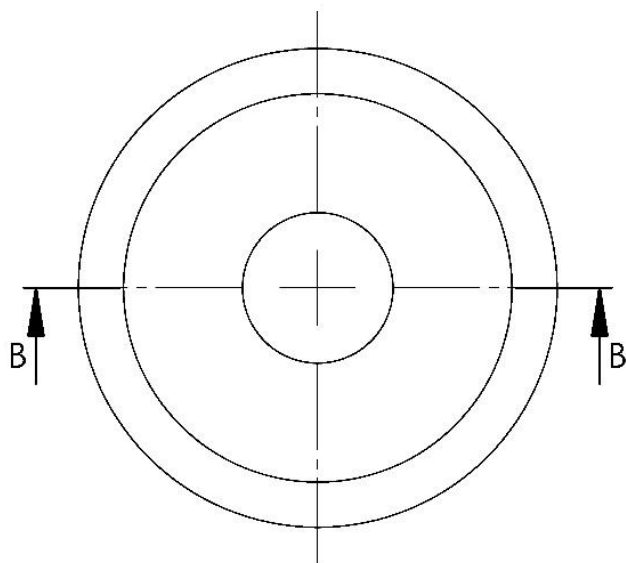
REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALD.					

MATERIAL:
Metacrilato

PESO:

TÍTULO: Urna	
N.º DE DIBUJO	A4
Escala: N/D	HOJA 1 DE 1



SECCIÓN B-B
ESCALA 2 : 1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

Daniel Matarán Robles

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
D.BUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CAJ.D.				

MATERIAL:

PVC

PESO:

TÍTULO:

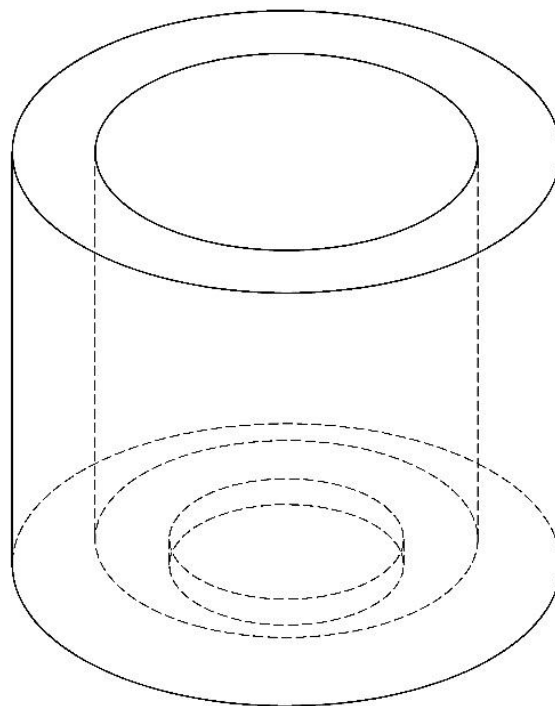
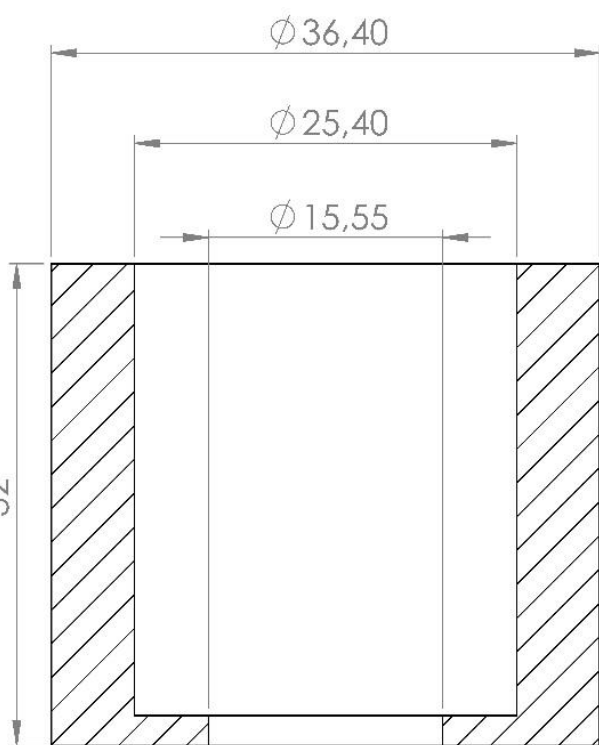
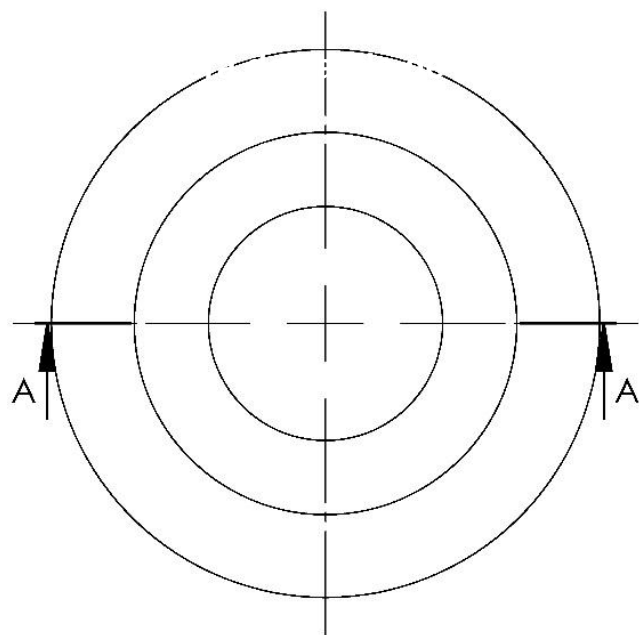
Tobera 10 mm

N.º DE DIBUJO

A4

Escala: 2:1

HOJA 1 DE 1



SECCIÓN A-A
ESCALA 2 : 1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

Daniel Matarán Robles

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
D.B.U.J.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CAJ.D.				

MATERIAL:

PVC

PESO:

TÍTULO:

Tobera 15.55 mm

N.º DE DIBUJO

A4

Escala: 2:1

HOJA 1 DE 1

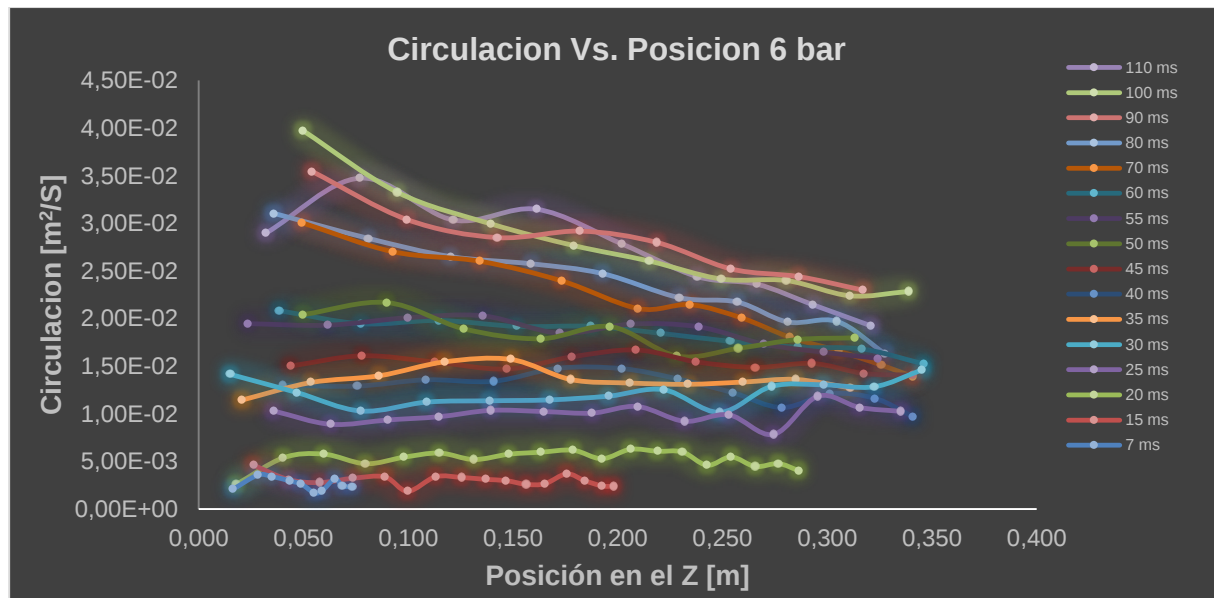
ANEXO II: Graficas**a. Tobera 20 mm**

Ilustración 0.1 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

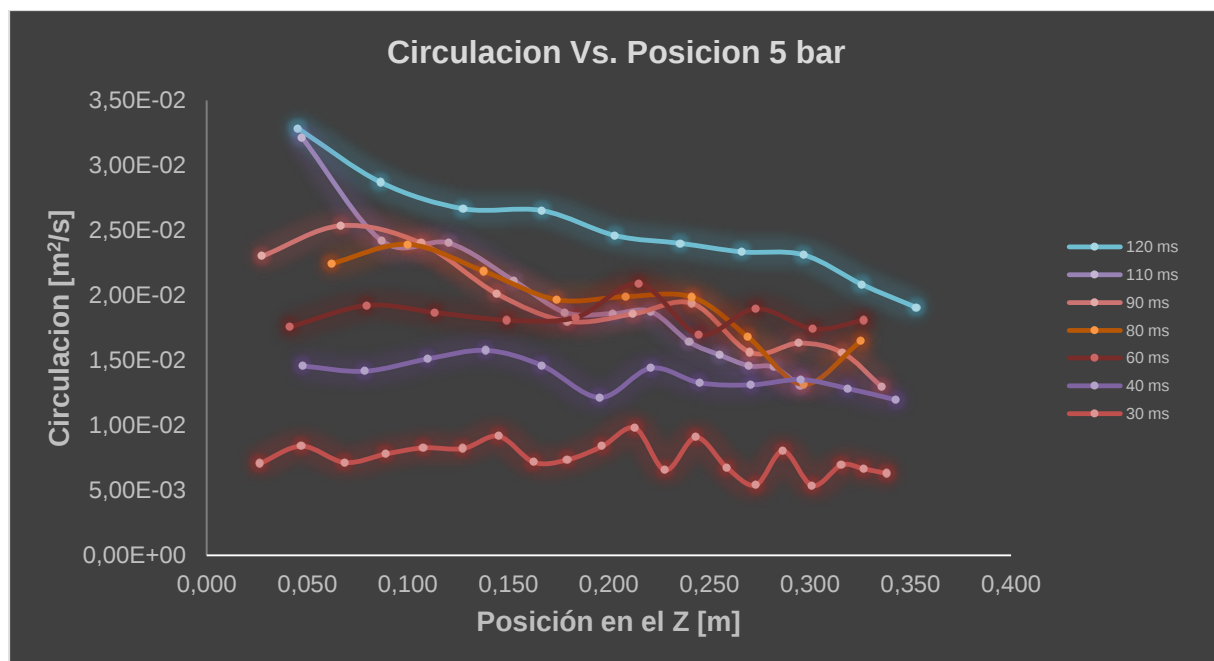


Ilustración 0.2 Tobera de 20 mm. Presión 5 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

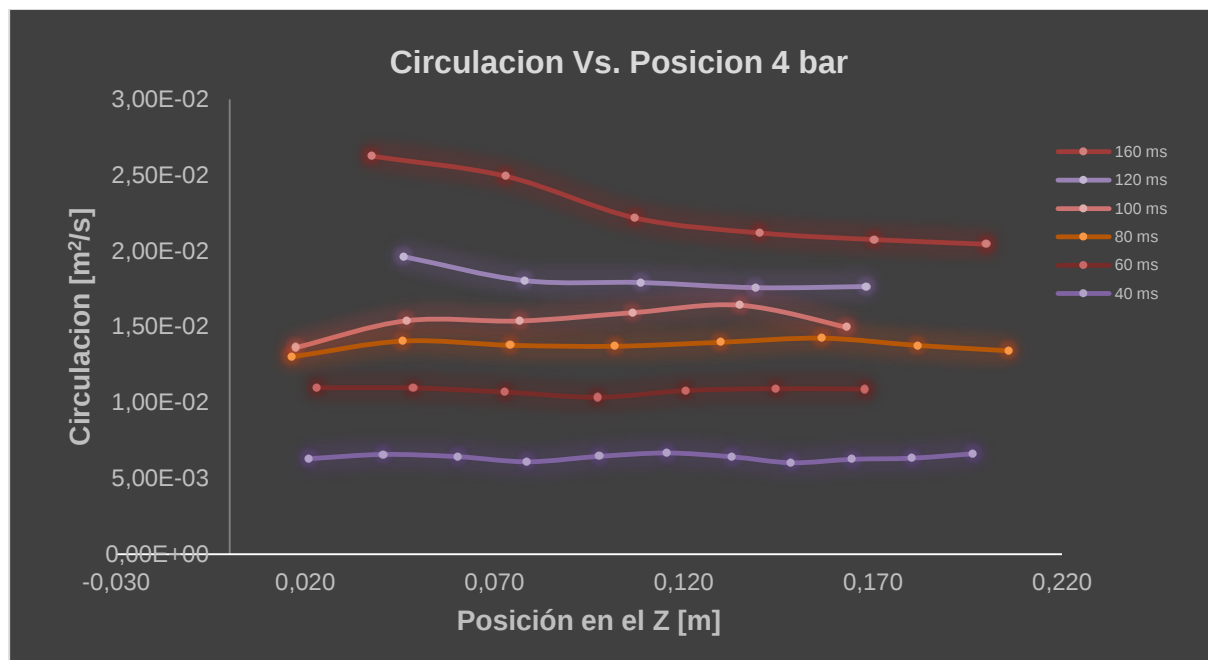


Ilustración 0.3 Tobera de 20 mm. Presión 4 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

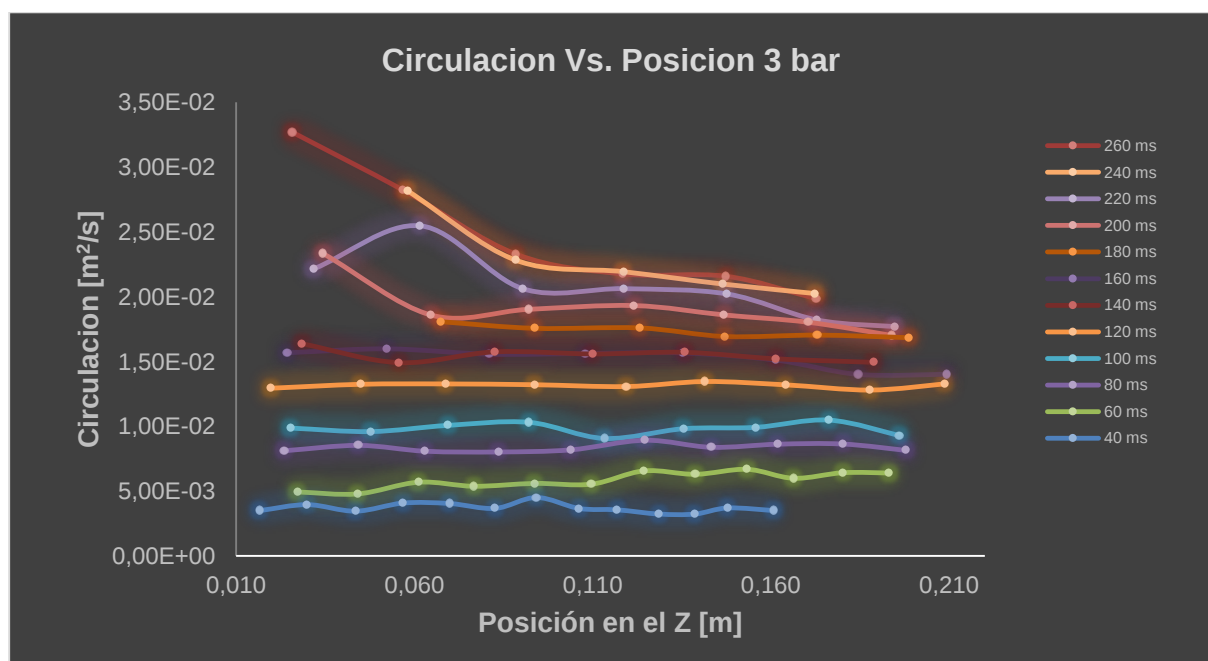


Ilustración 0.4 Tobera de 20 mm. Presión 3 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

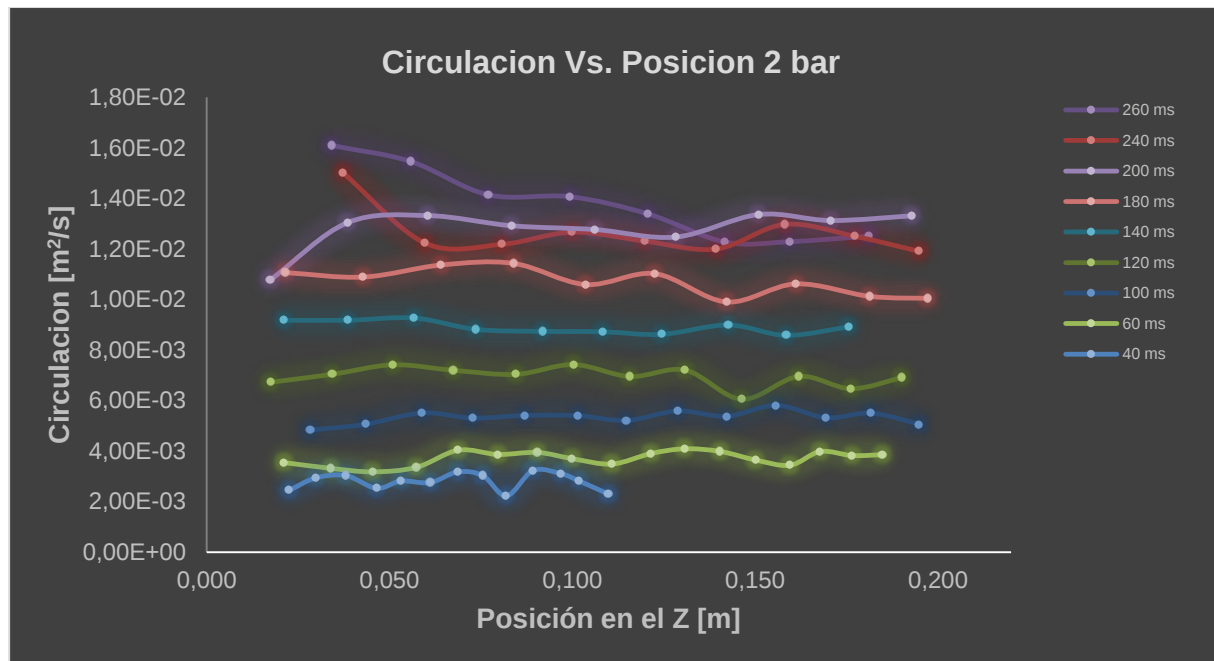


Ilustración 0.5 Tobera de 20 mm. Presión 2 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

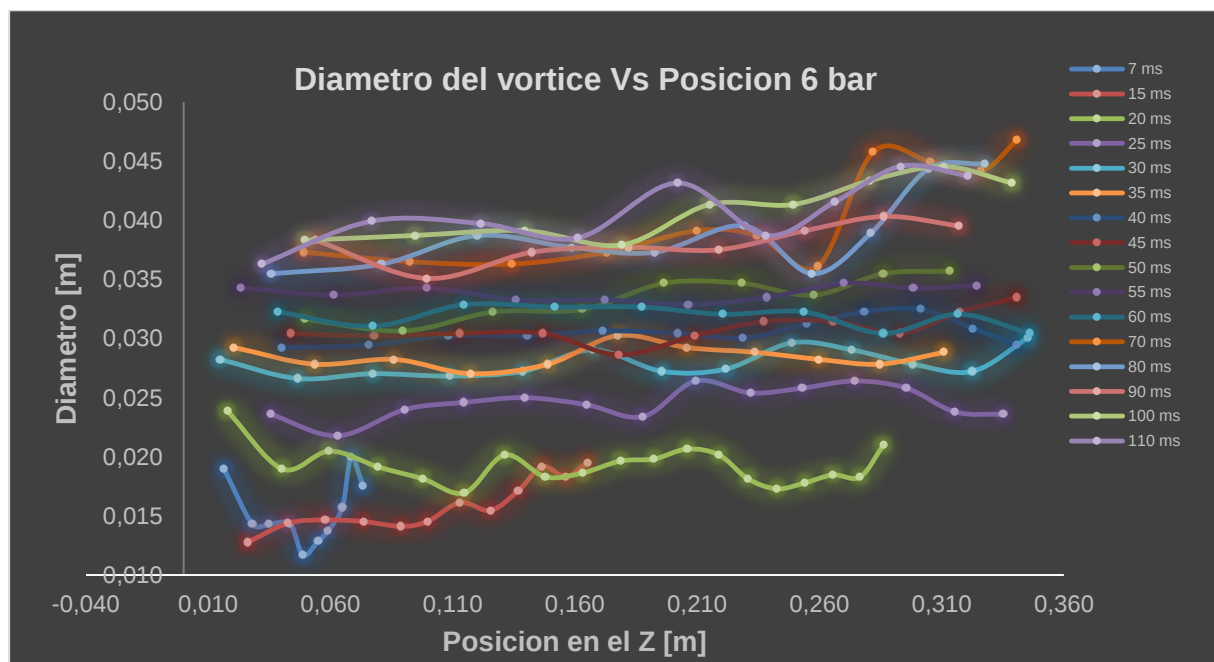


Ilustración 0.6 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Evolucion del diametro del vortice para diferentes tiempos de apertura.

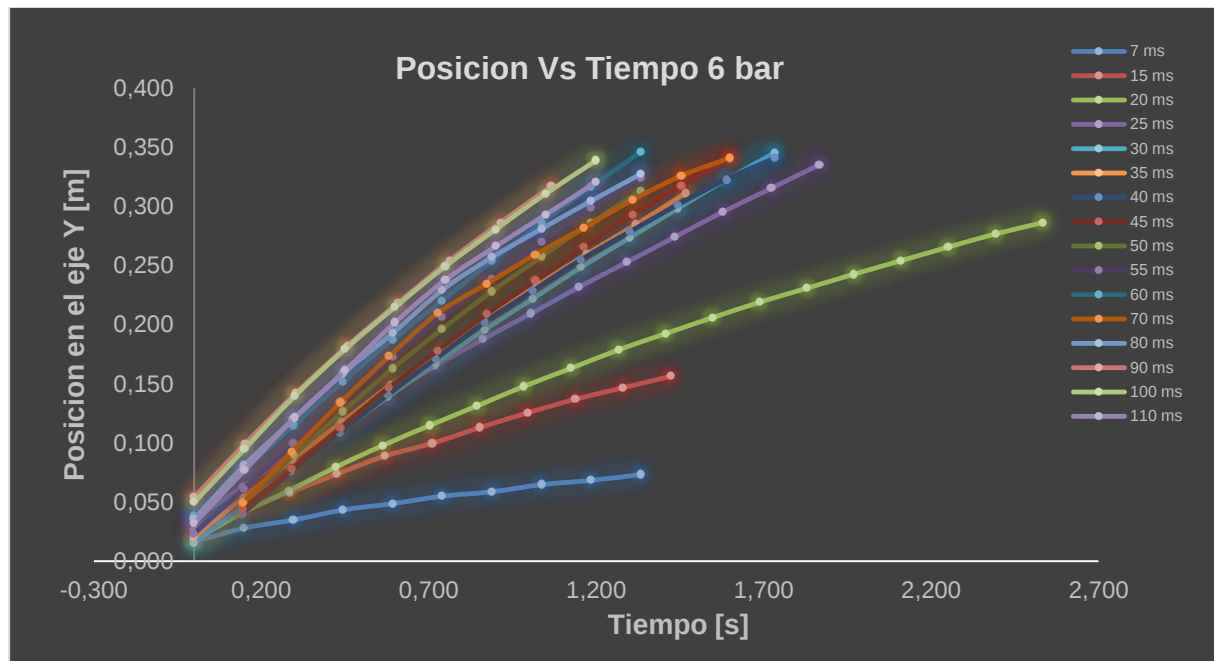


Ilustración 0.7 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Avance del vórtice para diferentes tiempos de apertura.

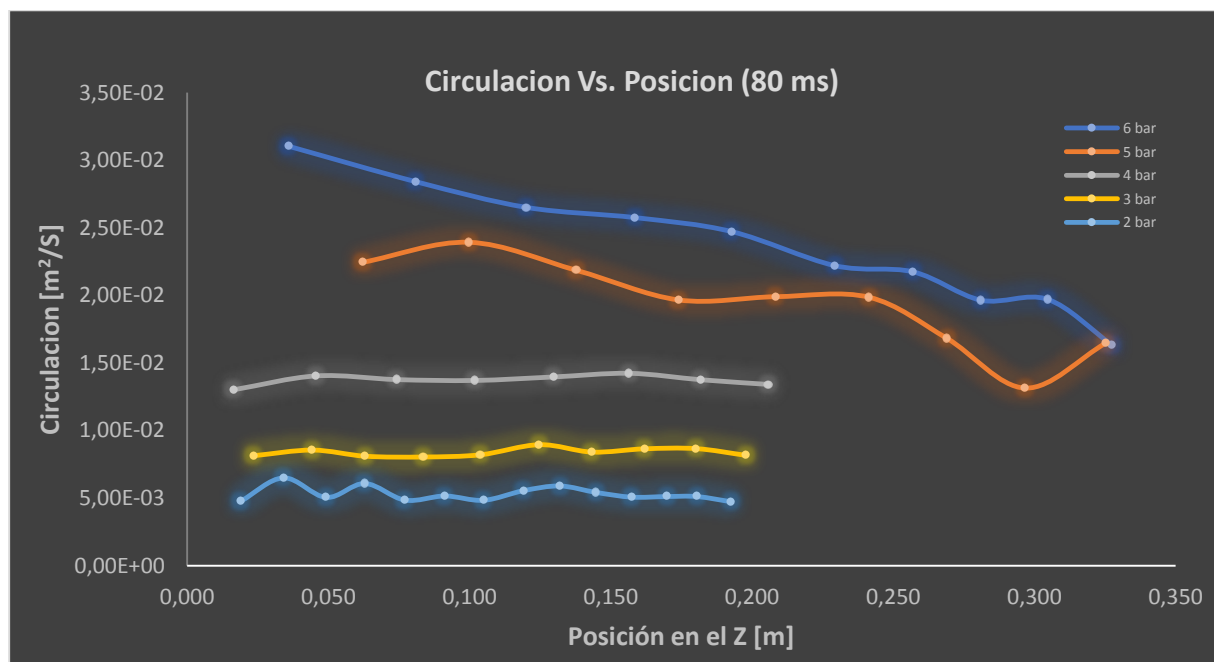


Ilustración 0.8 Tobera 20 mm. Tiempo de apertura 80 ms. Circulación variando la presión del depósito

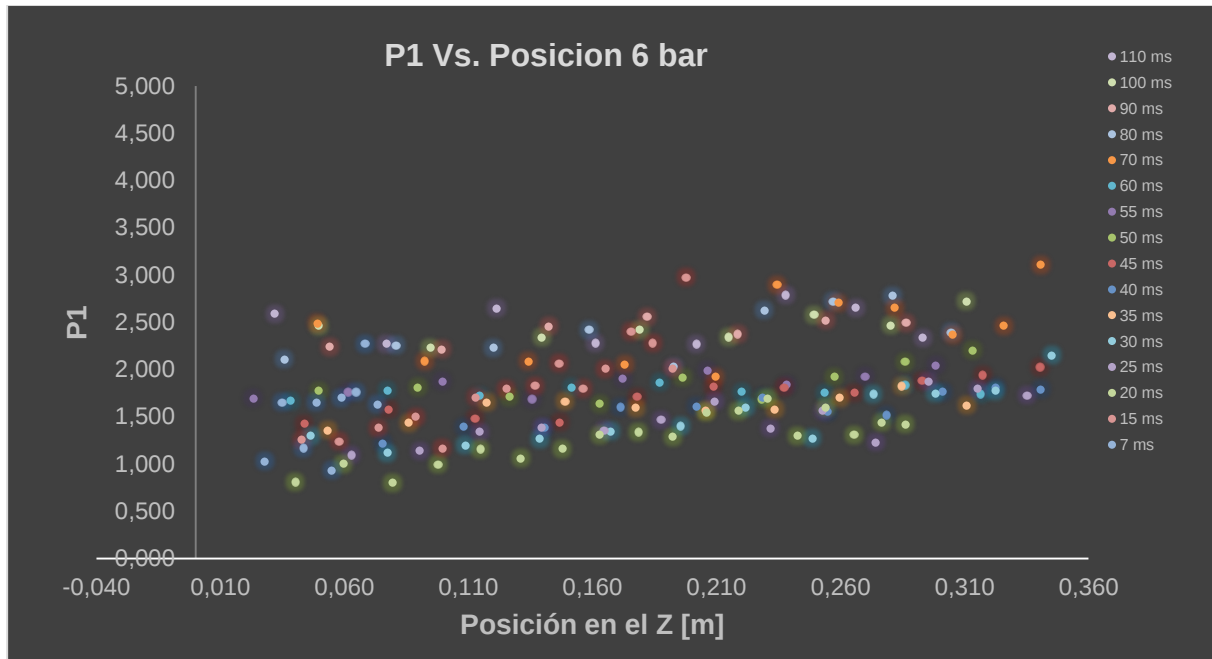


Ilustración 0.9 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura.

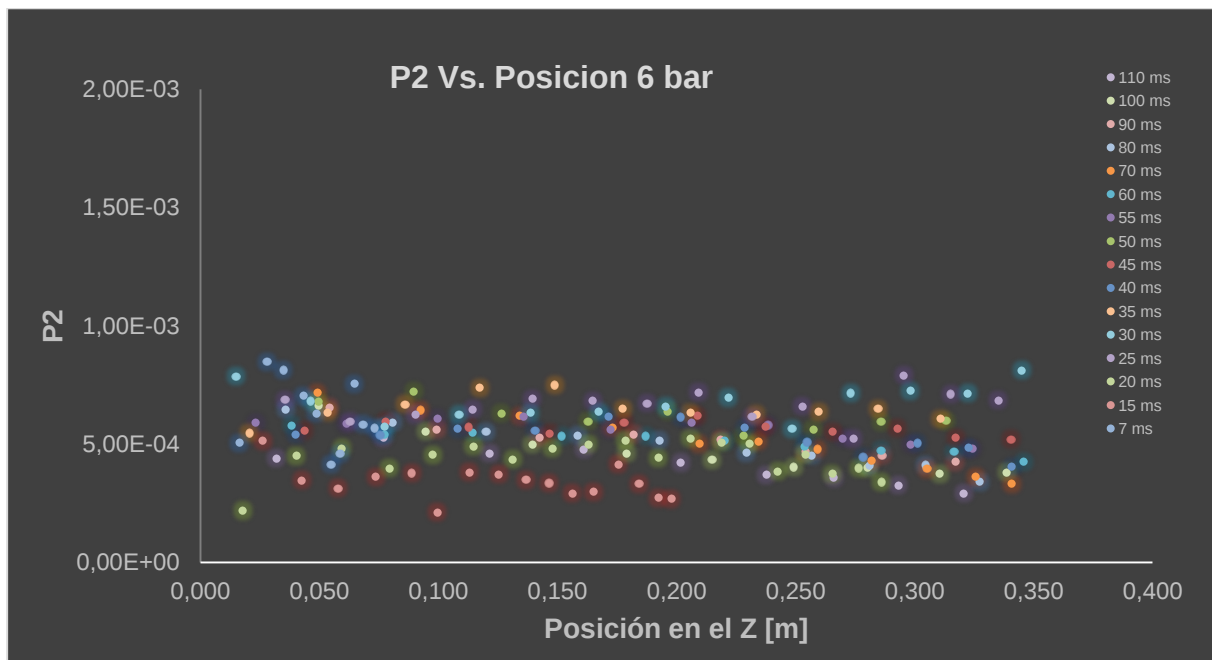


Ilustración 0.10 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura.

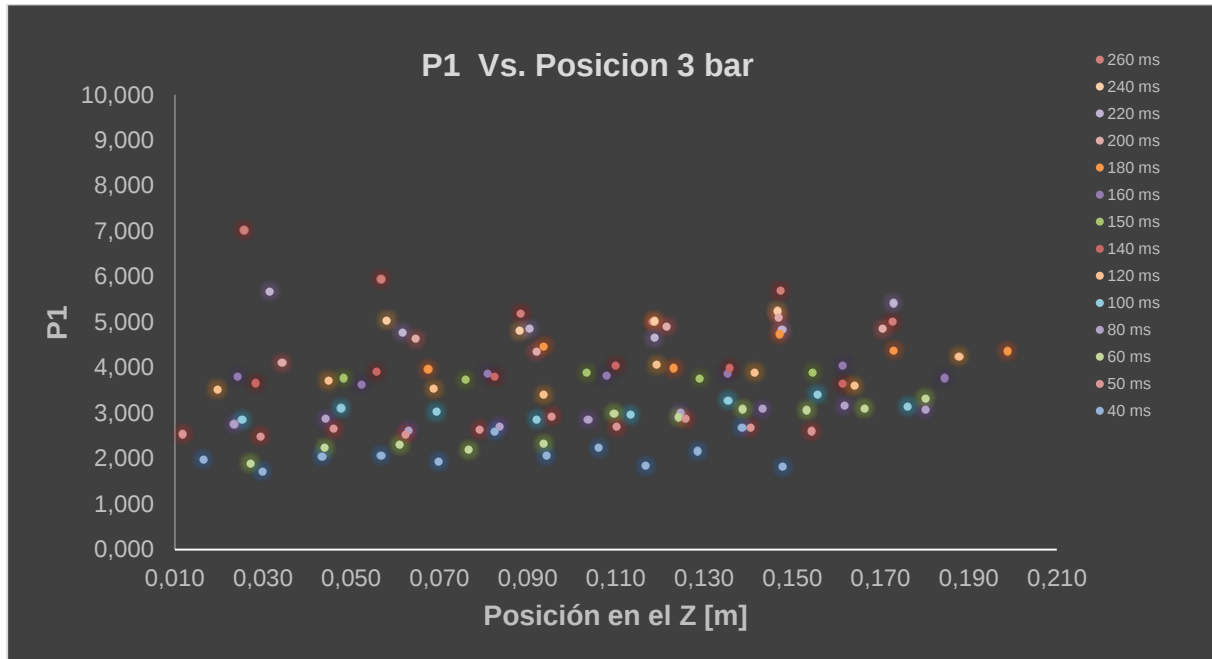


Ilustración 0.11 Tobera de 20 mm. Presión 3 bar. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura.

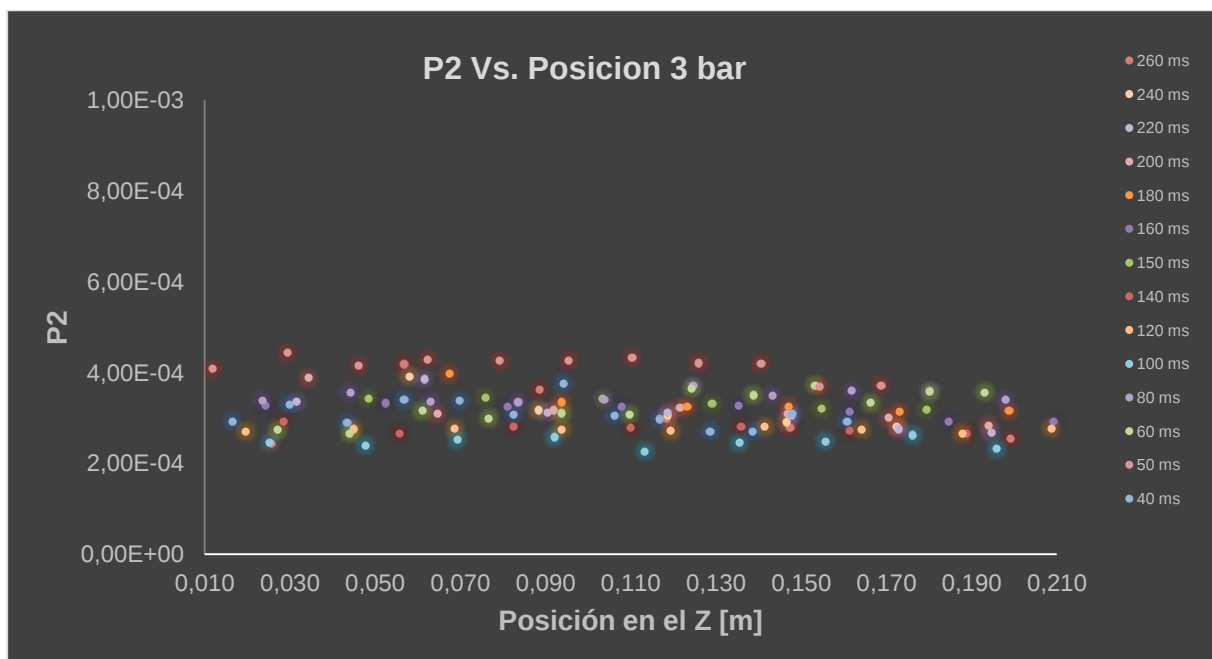


Ilustración 0.12 Tobera de 20 mm. Presión 6 bar. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura.

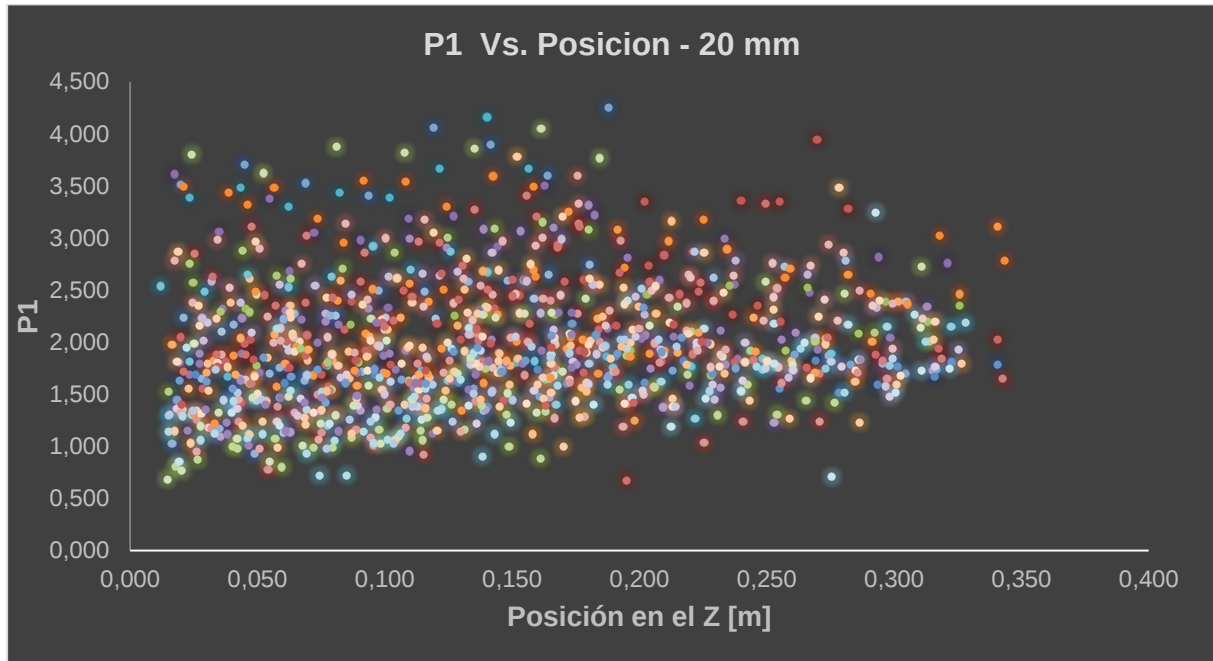


Ilustración 0.13 Tobera de 20 mm. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura y presión.

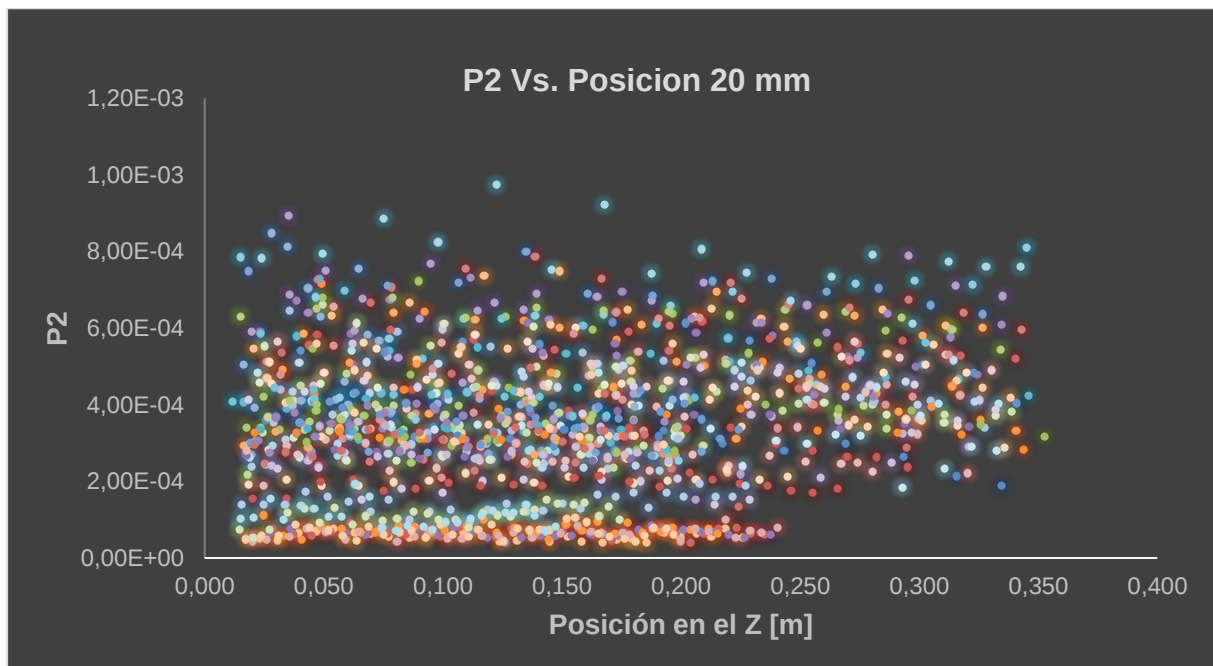


Ilustración 0.14 Tobera de 20 mm. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura y presión

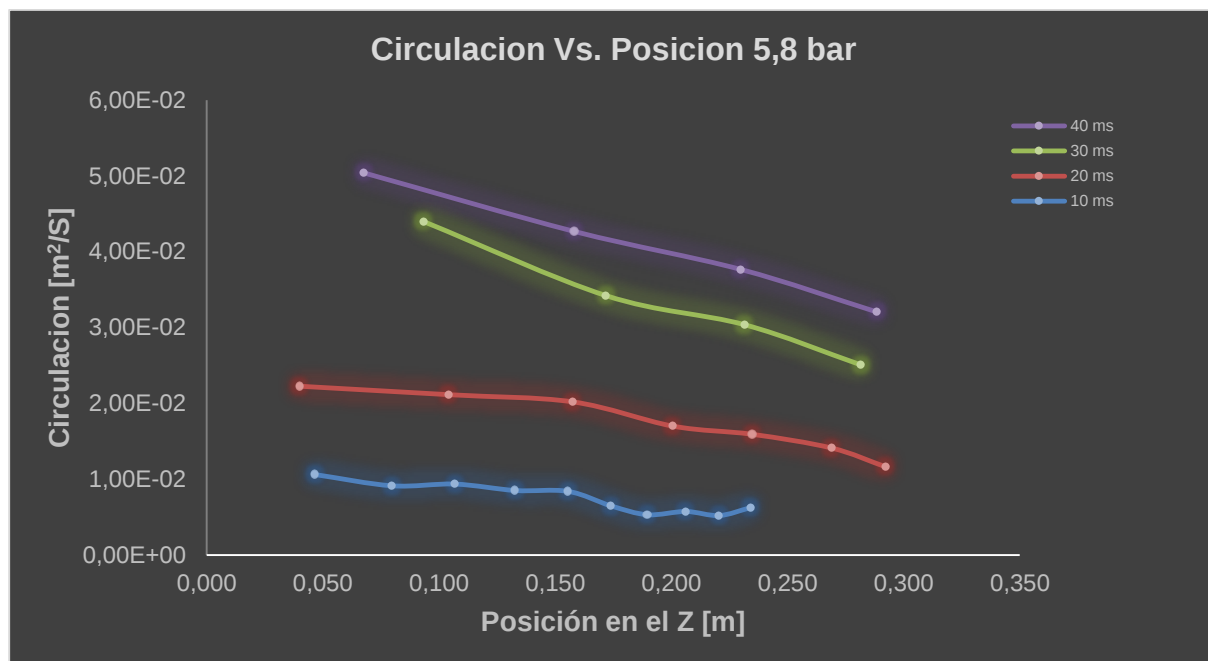
b. Tobera 15.55 mm

Ilustración 0.15 Tobera de 15.55 mm. Presión 5.8 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

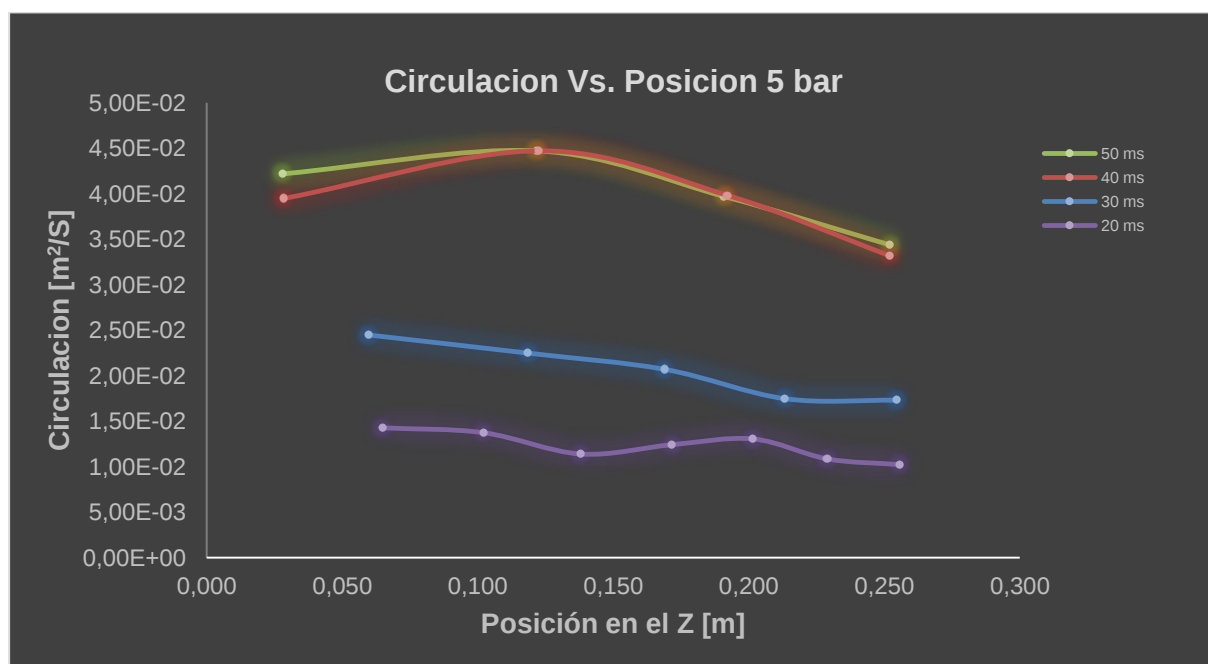


Ilustración 0.16 Tobera de 15.55 mm. Presión 5 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

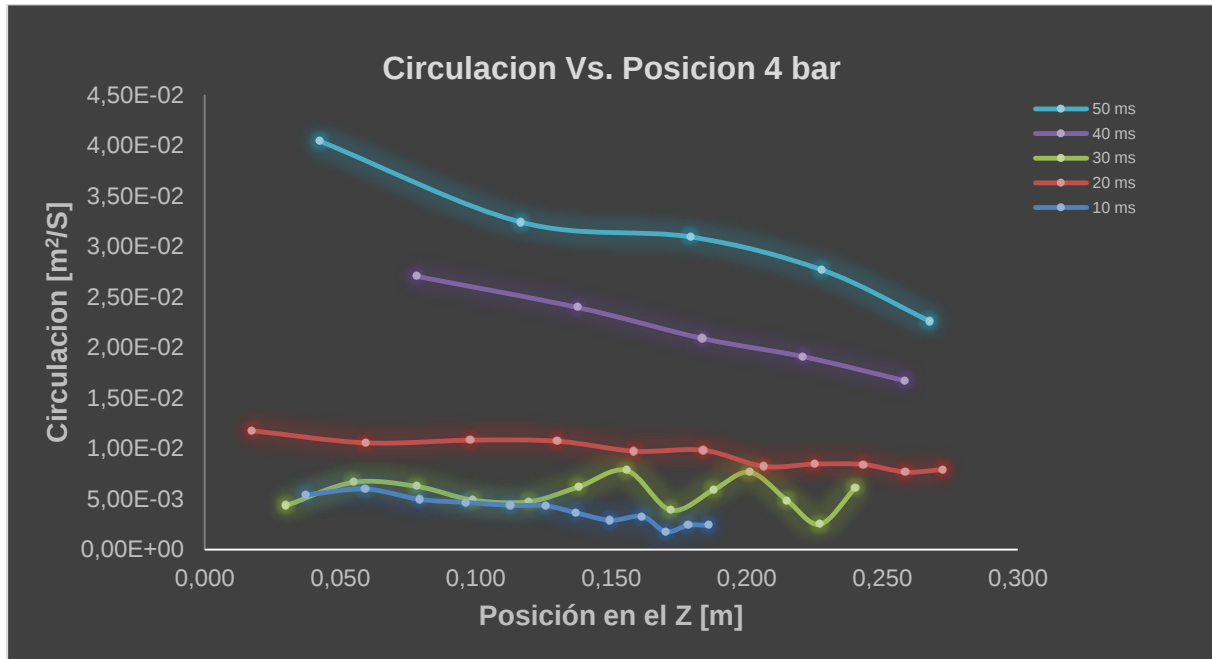


Ilustración 0.17 Tobera de 15.55 mm. Presión 4 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

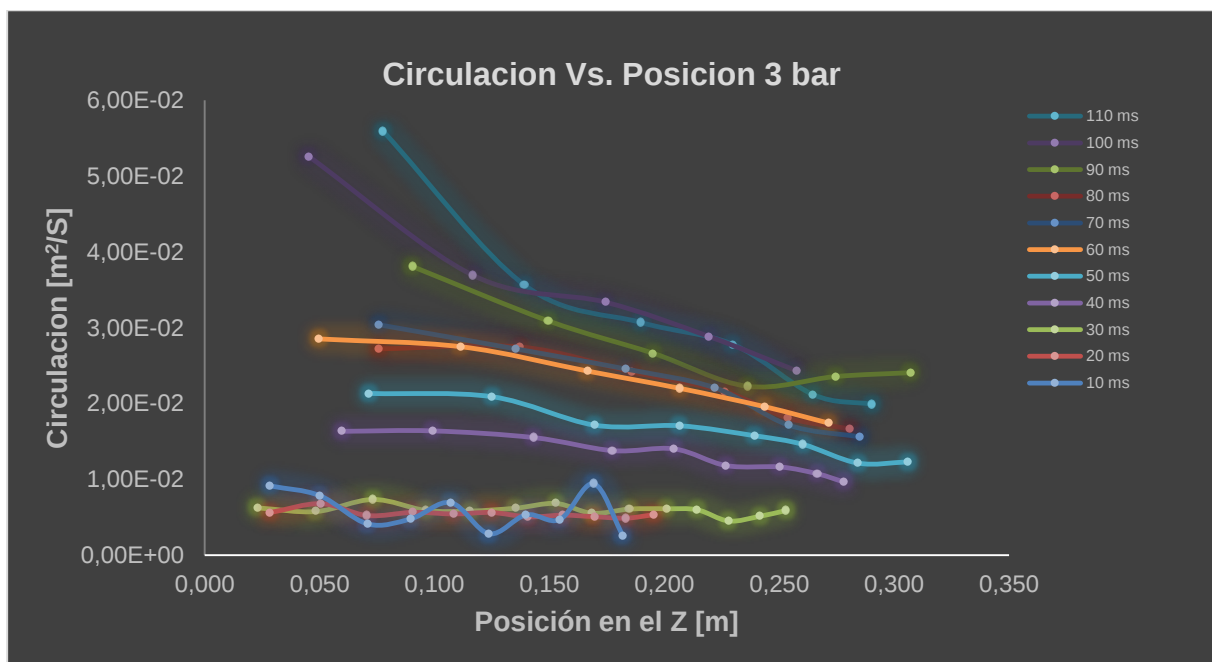


Ilustración 0.18 Tobera de 15.55 mm. Presión 3 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

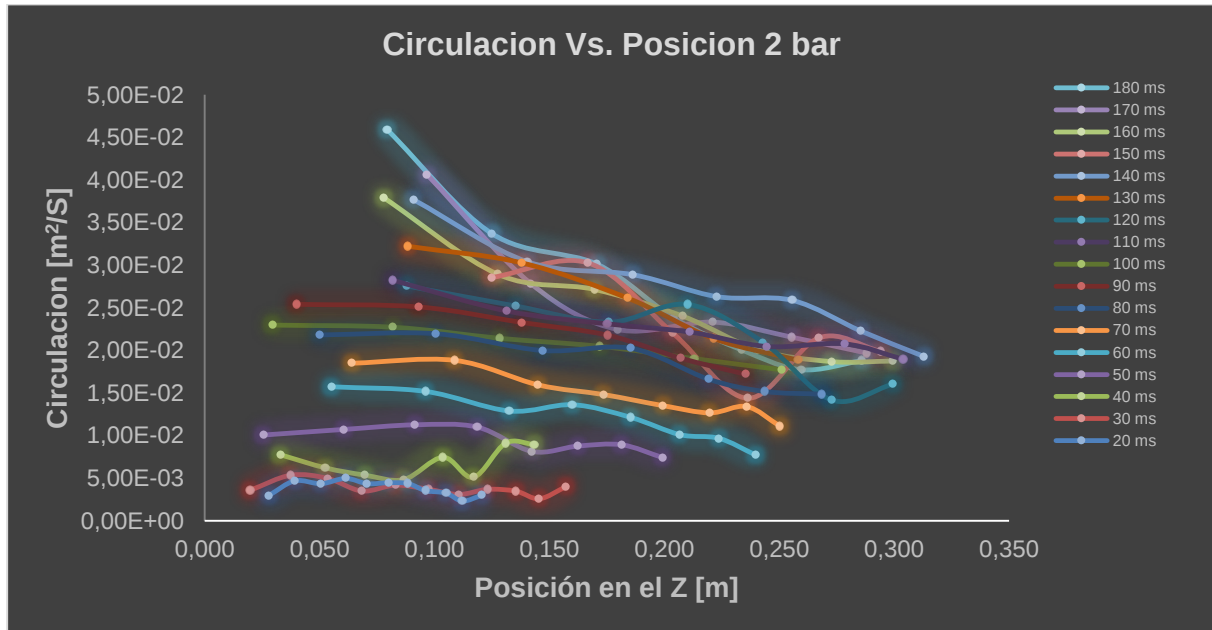


Ilustración 0.19 Tobera de 15.55 mm. Presión 2 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

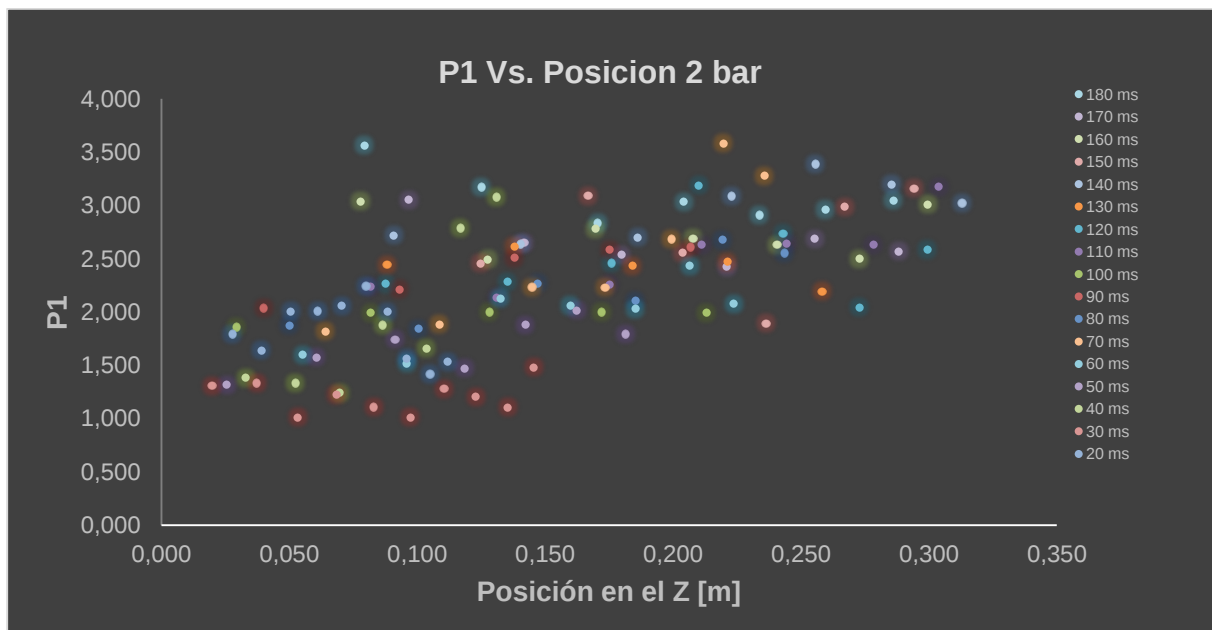


Ilustración 0.20 Tobera de 15.55 mm. Parámetro adimensional 1 con variación del tiempo de apertura

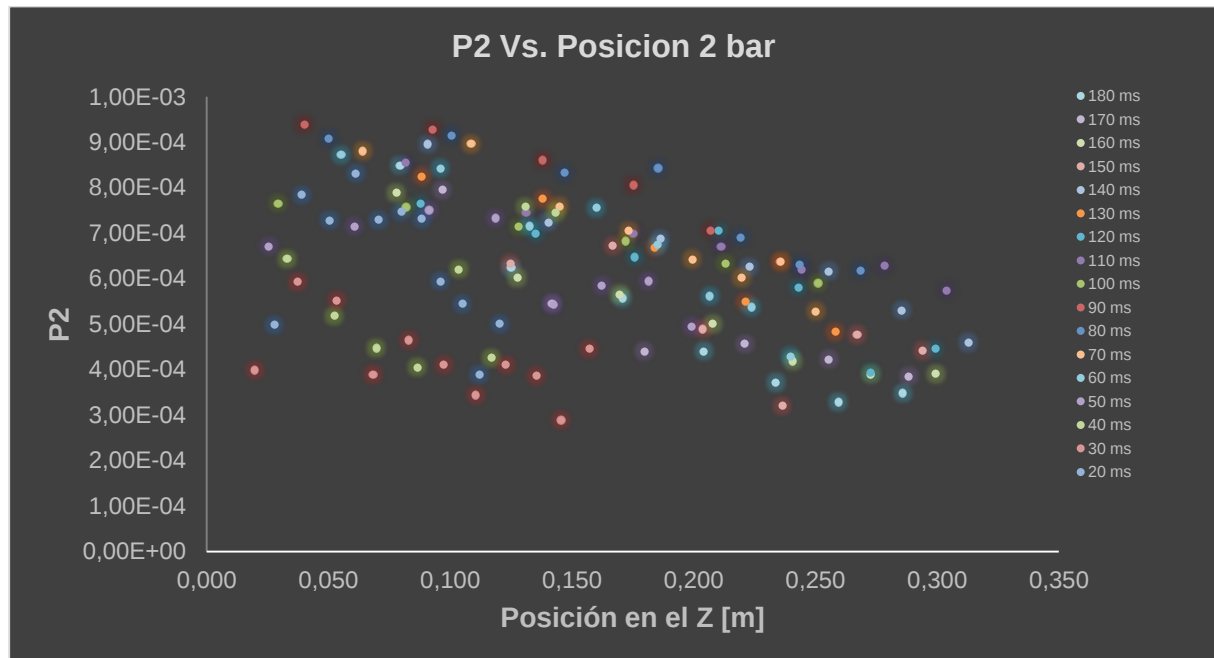


Ilustración 0.21 Tobera de 15.55 mm. Parámetro adimensional 2 con variación del tiempo de apertura

c. Tobera 10 mm

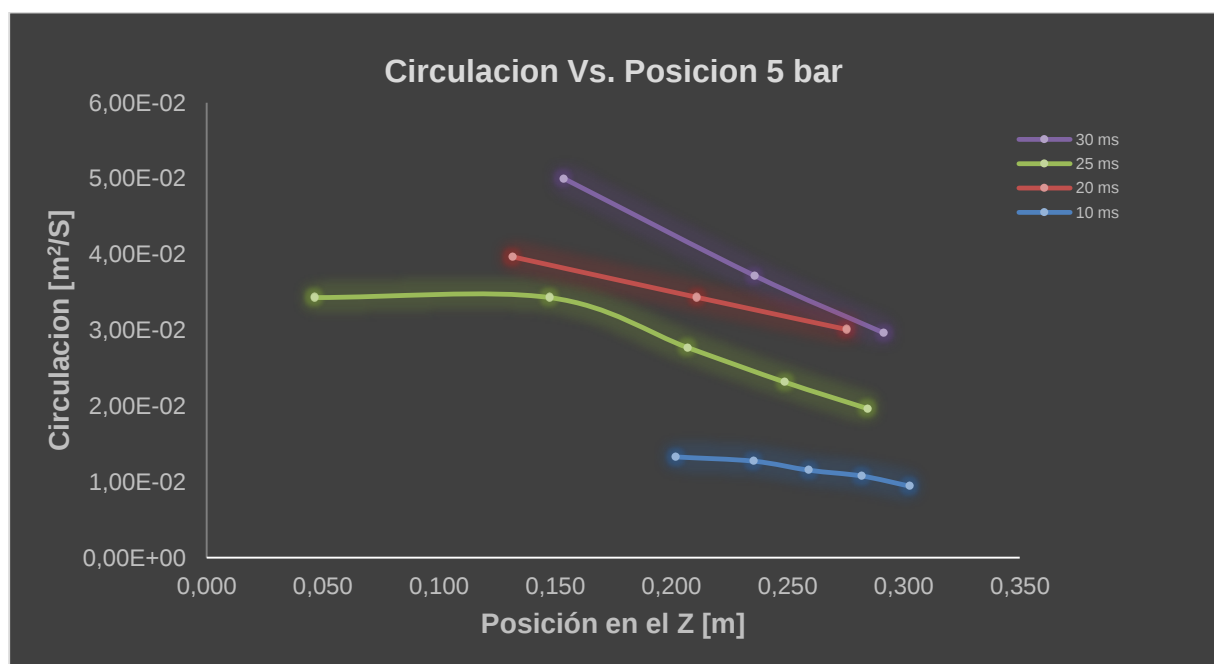


Ilustración 0.22 Tobera de 10 mm. Presión 5 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

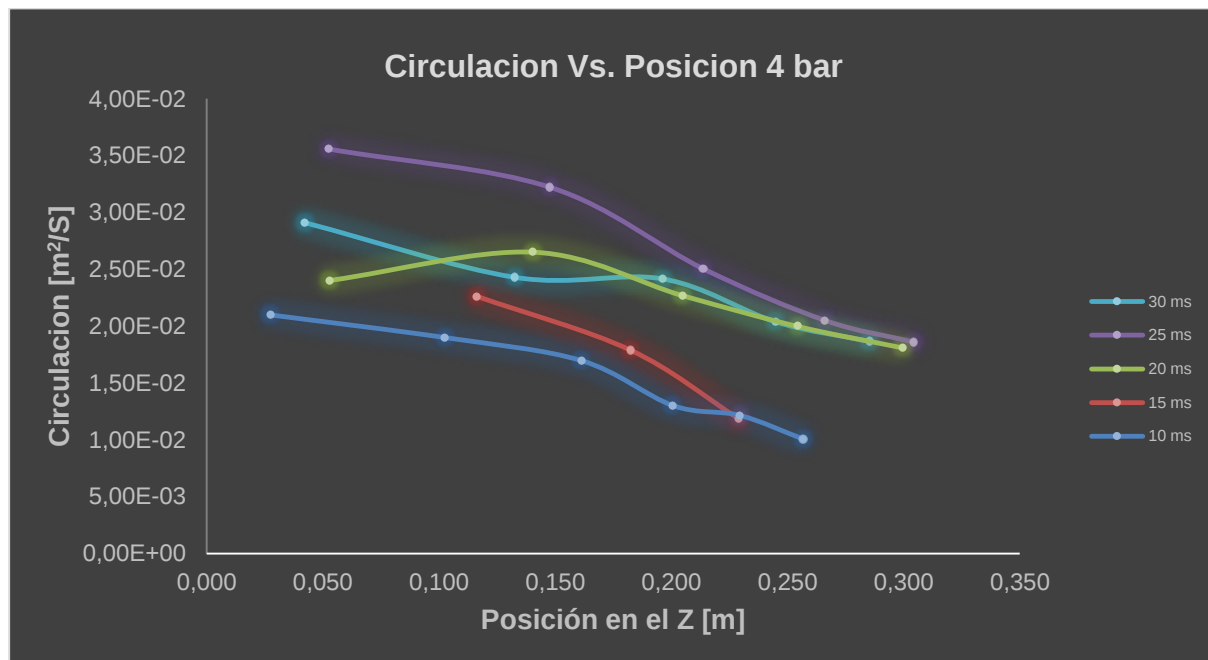


Ilustración 0.23 Tobera de 10 mm. Presión 4 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

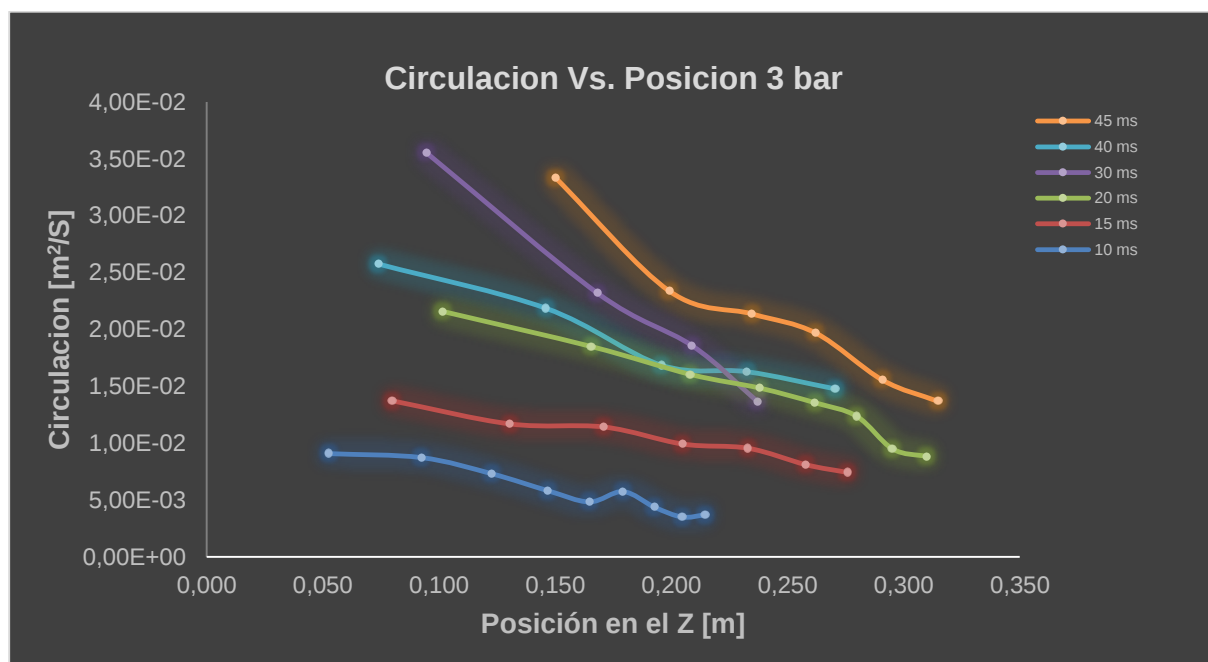


Ilustración 0.24 Tobera de 10 mm. Presión 3 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

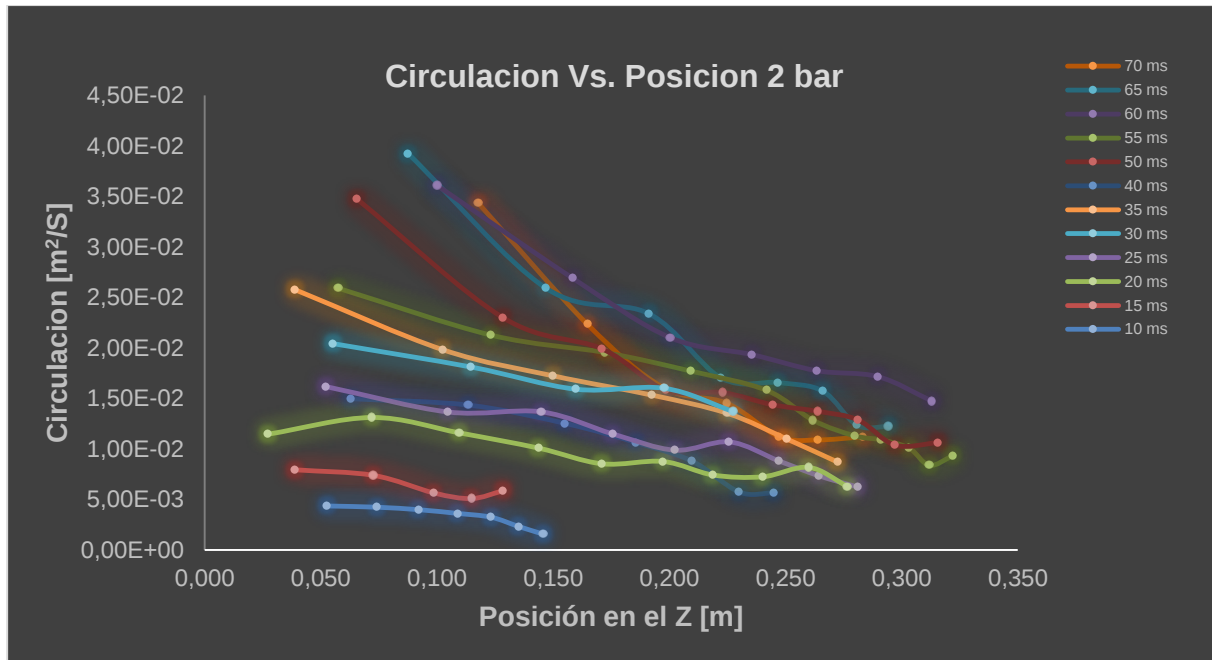


Ilustración 0.25 Tobera de 10 mm. Presión 2 bar. Circulación para diferentes tiempos de apertura.

d. Variando el diámetro de la tobera

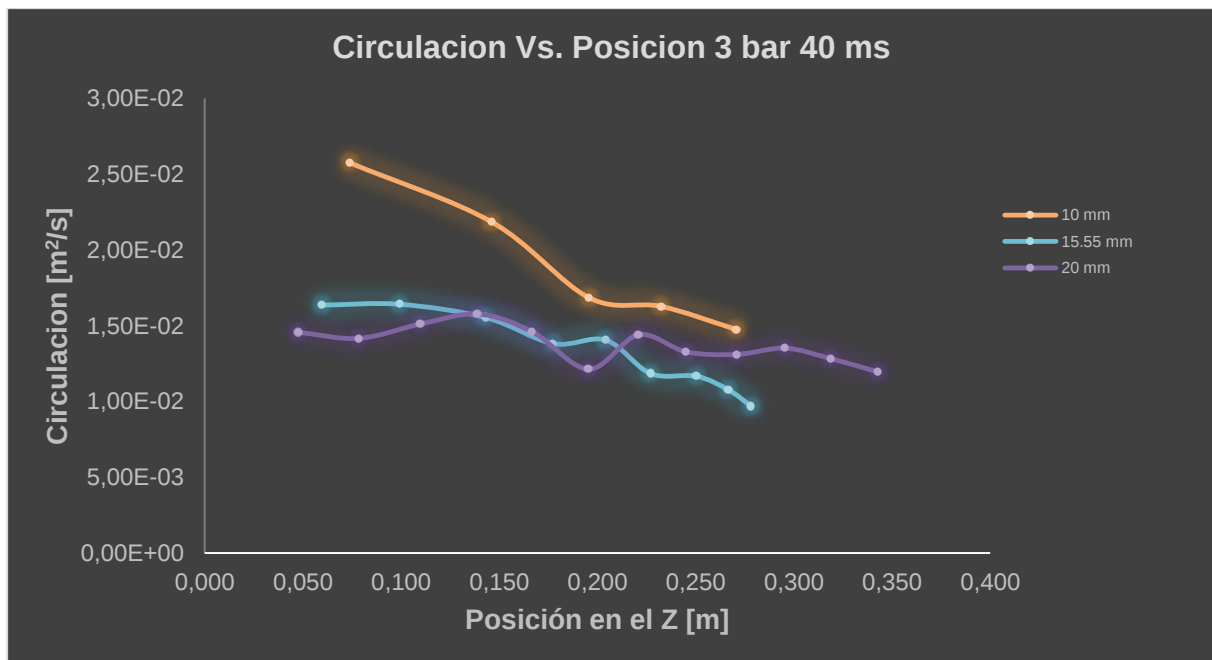


Ilustración 0.26 Circulación un tiempo de apertura de 40 ms y una presión de 3 bar, variando el diámetro salida.

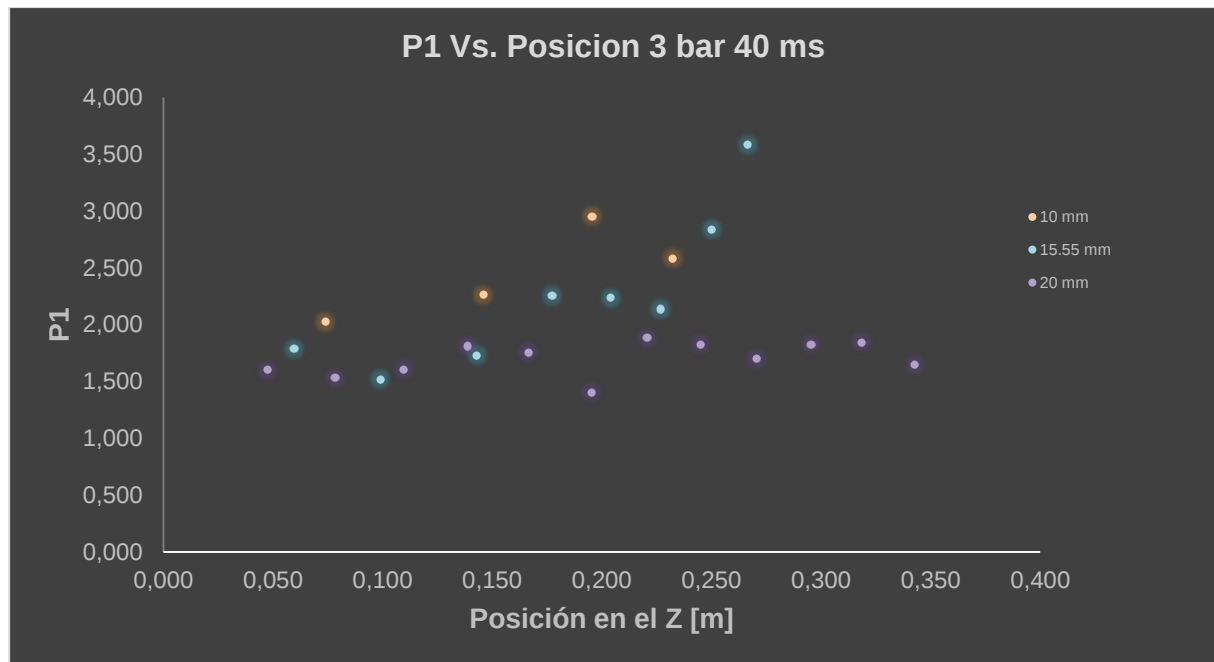


Ilustración 0.27 Parámetro adimensional 1 un tiempo de apertura de 40 ms y una presión de 3 bar, variando el diámetro salida.

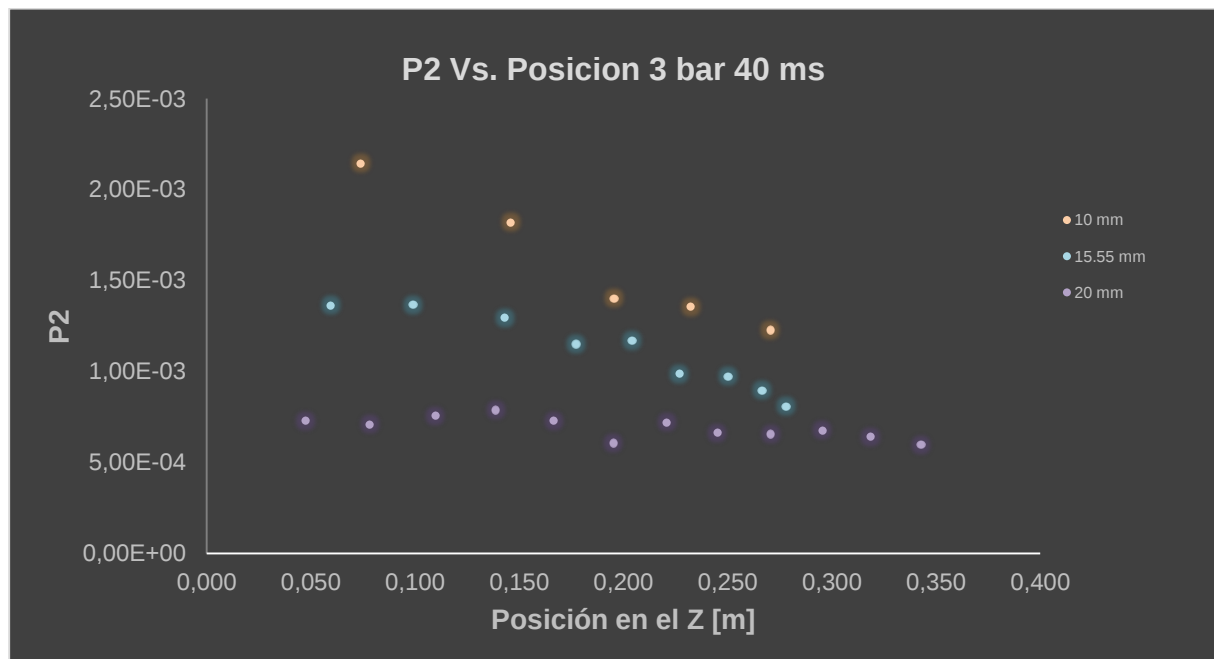


Ilustración 0.28 Parámetro adimensional 1 un tiempo de apertura de 40 ms y una presión de 3 bar, variando el diámetro salida.

ANEXO III: Códigos

a. Script para MATLAB.

Con el siguiente *script* calcularemos, a partir de las matrices extraídas de *PIVlab*:

- Circulación.
- Velocidad de avance.
- Diámetro del anillo de vorticidad.
- Parámetro adimensional 1.
- Parámetro adimensional 2.
- Numero de *Reynolds*.

Además, haremos unas representaciones gráficas para establecer si los datos analizados son representativos y exportaremos los datos a una hoja de cálculo. Nótese que los análisis se han realizado en dos dimensiones considerando el eje de avance del vórtice Y, del mismo modo se ha considerado el eje normal al de avance X.

Script:

```
% _____ CARACTERIZACION DE VORTICES _____

clear;clc;
cd ('C:\Users\danim\Caract_vortices\Vortices\20mm\6 bar\30')
%1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,25,27,28
,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40      Para copiar
casos1=[3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15];

Escala=4;                                % Escala los vectores para ver bien el quiver
Presion=6 *1e5;                          % Presion del deposito
presurizado [Pa]
Tiempo_apertura= 30 *1e-3;               % Tiempo de apertura de la
electrovalvula [s]
D=2 /100;                                % Diametro tobera [m]
Densidad=998.2;                          % Densidad [kg/m3]
Viscosidad_cine=1.007e-6;                % Viscosidad[kg/m·s]

DeltaT=1/7.5;                            % Tiempo entre avance [s]
Tfin=length(casos1)*DeltaT;
time=linspace(0,Tfin,length(casos1));    % Pongo el tiempo a 0 en
primera iteracion

for i=1:length(casos1)

nombre = ['DMat_V_000' num2str(casos1(i)) '.mat'];
load(nombre);

quiver(x,y,u,v,Escala);grid on;          %Representa velocidad y
posición
```

```

% _____SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MAXIMA VORTICIDAD_____

pos1=ginput(2);                                % Derecha-izquierda   Extraigo
la posicion del vortice
posvorty1(i)=(pos1(1,2)+pos1(2,2))/2;
posvortx1(i)=(pos1(1,1)+pos1(2,1))/2;

% _____DELIMITACION DE CONTORNO Y EJE_____

sz = size(x);                                %Tamaño de matriz posicion
eje=posvortx1(i);                            %Posicion del eje introducido
con el raton
dist_eje=abs((x(1,:)-eje));
pos_eje(i,:)=find((dist_eje)-min(dist_eje)==0); %Posicion del eje en la
matriz

x1=pos_eje(i);                                %Eje      x
x2=1;                                          %Izq      x
%x3=x1*2-1;                                  %Derch    x(ojo que no se salga de la foto-->
poner entonces sz(2))
x3=sz(2);
y1=1;                                          %Abajo    y
y2=sz(1);                                    %Arriba   y

dx=mean(diff(x(1,:)));                       %Dx
dy=mean(diff(y(:,1)));                       %Dy

C11a= dy * sum(v(y1:y2,x1));                 %Velocidad contorno y
C12a= -sum(u(y2,x2:x1)) * dx;                %Velocidad contorno x
C13a= -dy * sum(v(y1:y2,x2));                %Velocidad contorno y
C14a= sum (u(y1,x2:x1))*dx;                  %Velocidad contorno x

C1a(i)=C11a+C12a+C13a+C14a;

C11b=dy*sum(v(y1:y2,x1));
C12b=sum(u(y2,x1:x3))*dx;
C13b=-dy*sum(v(y1:y2,x3));
C14b=-sum(u(y1,x1:x3))*dx;

C1b(i)=C11b+C12b+C13b+C14b;

C1(i)=(abs(C1a(i))+abs(C1b(i)))/2;
G11(i)=sum(sum(vort(y1:y2,x2:x1)))*abs(dx*dy);
G12(i)=sum(sum(vort(y1:y2,x1:x3)))*abs(dx*dy);
G1(i)=(abs(G11(i))+abs(G12(i)))/2;

Diametro_anillo(i)=abs((pos1(1,1)-pos1(2,1)));

disp('      n°      Eje      Diametro vortice'); %Solo para mostrar por
[casos1(i) pos_eje(i) Diametro_anillo(i)]        %pantalla en trabajo
end

```

```

VELOCIDAD_AVANCE=diff(posvortyl)/DeltaT;
VELOCIDAD_AVANCE=[0 VELOCIDAD_AVANCE];

%_____ADIMENSIONALES_____

P1=G1./(VELOCIDAD_AVANCE*D);
P2=(G1./(Presion*Tiempo_apertura))*Densidad;
Re=G1/Viscosidad_cine;

%_____REPRESENTACION GRAFICA_____

figure(2)
hold on
plot(time,G1,'b-')
plot(time,C1,'r-')
legend('Circulacion Volumen','Circulacion Superficie')
ylabel('Circulacion [m2/s]');
xlabel('Tiempo [s]');
hold off

figure(3)
plot(time,posvortyl,'b-')
ylabel('Posicion [m]');
xlabel('Tiempo [s]');

figure(4)
plot(time,Diametro_anillo,'r-')
ylabel('Diametro [m]');
xlabel('Tiempo [s]');

%_____EXPORTADO A EXCEL DE LOS DATOS_____

Export ='DMat_export_data.xlsx';
xlswrite(Export,posvortyl',1,'A1')
xlswrite(Export,time',1,'B1')
xlswrite(Export,Diametro_anillo',1,'C1')
xlswrite(Export,VELOCIDAD_AVANCE',1,'D1')
xlswrite(Export,C1',1,'E1')
xlswrite(Export,G1',1,'F1')
xlswrite(Export,P1',1,'G1')
xlswrite(Export,P2',1,'H1')
xlswrite(Export,Re',1,'I1')

```

b. Arduino

1. Control para accionar con pulsador.

```
int SENSOR_B = 4;    // VARIABLE REFERENTE A LA SEÑAL DEL PULSADOR

int RELE = 2;        // VARIABLE REFERENTE A LA SEÑAL DEL RELE.

int ESTADO_B = 0;    // VARIABLE REFERENTE AL ESTADO INICIAL DEL SENSOR DEL
PULSADOR. IMPONEMOS COMO 0.

int BAJADA = 10;     // VARIABLE REFERENTE AL TIEMPO QUE IMPONEMOS PARA QUE
LA ELECTROVALVULA ESTE CERRADA (ms).

int SUBIDA = 50;     // VARIABLE REFERENTE AL TIEMPO QUE IMPONEMOS PARA QUE
LA ELECTROVALVULA ESTE ABIERTA (ms).

int ST = 5000;       // VARIABLE REFERENTE AL TIEMPO QUE NECESITA EL ARDUINO
PARA ESTABILIZARSE (ms).

void setup() {

  Serial.begin(9600); //inicializamos la comunicación

  pinMode(13, OUTPUT);

  pinMode(SENSOR_B, INPUT); // SEÑAL DE ENTRADA PROVENIENTE DEL
FOTODIODO POR EL PIN 2 DIGITAL.

  pinMode(RELE, OUTPUT); // SEÑAL DE SALIDA DIRIGIDA AL RELE POR EL PIN 3
DIGITAL.

  delay(ST);          // TIEMPO REQUERIDO POR EL SISTEMA PARA ESTABILIZARSE.

}

void loop() {

  delay(10);

  ESTADO_B = digitalRead(SENSOR_B); // VALOR QUE ADQUIERE LA ENTRADA DEL
PULSADOR, (0-1).
```

```
Serial.print(ESTADO_B);

if (ESTADO_B == HIGH){    // ACCION DEL RELE CUANDO LA SEÑAL DEL SENSOR
ES 1.

    digitalWrite(RELE,LOW); // EL RELE NO CONMUTA.

    digitalWrite(13, HIGH);

    delay(BAJADA);        // TIEMPO DE ESPERA TRAS LA SEÑAL.

    digitalWrite(RELE,HIGH);

    digitalWrite(13, HIGH);// EL RELE CONMUTA + ENCIENDE EL LED

    delay(SUBIDA);        // TIEMPO QUE LA ELECTROVALVULA PERMANECE
ABIERTA.

    digitalWrite(RELE,LOW); // EL RELE NO CONMUTA.

    digitalWrite(13, HIGH);

    delay(100);

}

else {

digitalWrite(RELE,LOW);

digitalWrite(13, LOW);

}

}
```

2. Control accionado por la sonda de burbuja.

```
int SENSOR_B = 4;    // VARIABLE REFERENTE A LA SEÑAL DEL SENSOR DE LA
BURBUJA.

int RELE = 2;        // VARIABLE REFERENTE A LA SEÑAL DEL RELE.

int ESTADO_B = 0;    // VARIABLE REFERENTE AL ESTADO INICIAL DEL SENSOR DE
LA BURBUJA. IMPONEMOS COMO 0.

int BAJADA = 10;     // VARIABLE REFERENTE AL TIEMPO QUE IMPONEMOS PARA QUE
LA ELECTROVALVULA ESTE CERRADA (ms).

int SUBIDA = 50;     // VARIABLE REFERENTE AL TIEMPO QUE IMPONEMOS PARA QUE
LA ELECTROVALVULA ESTE ABIERTA (ms).

int ST = 5000;       // VARIABLE REFERENTE AL TIEMPO QUE NECESITA EL ARDUINO
PARA ESTABILIZARSE (ms).

void setup() {

  Serial.begin(9600); //inicializamos la comunicación

  pinMode(13, OUTPUT);

  pinMode(SENSOR_B, INPUT); // SEÑAL DE ENTRADA PROVENIENTE DEL
FOTODIODO POR EL PIN 2 DIGITAL.

  pinMode(RELE, OUTPUT);    // SEÑAL DE SALIDA DIRIGIDA AL RELE POR EL PIN 3
DIGITAL.

  delay(ST);                // TIEMPO REQUERIDO POR EL SISTEMA PARA ESTABILIZARSE.

}

void loop() {

  delay(10);

  ESTADO_B = digitalRead(SENSOR_B); // VALOR QUE ADQUIERE LA ENTRADA DEL
SENSOR DEL FOTODIODO (0-1).
```

```
Serial.print(ESTADO_B);

if (ESTADO_B == HIGH){    // ACCION DEL RELE CUANDO LA SEÑAL DEL SENSOR
ES 1.

    digitalWrite(RELE,LOW); // EL RELE NO CONMUTA.

    digitalWrite(13, HIGH);

    delay(BAJADA);        // TIEMPO DE ESPERA TRAS LA SEÑAL.

    digitalWrite(RELE,HIGH);

    digitalWrite(13, HIGH);// EL RELE CONMUTA + ENCIENDE EL LED

    delay(SUBIDA);        // TIEMPO QUE LA ELECTROVALVULA PERMANECE
ABIERTA.

    digitalWrite(RELE,LOW); // EL RELE NO CONMUTA.

    digitalWrite(13, HIGH);

    delay(5000);

}

else {

digitalWrite(RELE,LOW);

digitalWrite(13, LOW);

}

}
```

Bibliografía

AERIALSTAGE. (s.f.). Obtenido de <https://www.aerialstage.com>

Akhmetov, D. G. (2009). *Vortex Rings*. Novosibirsk, Russia: Springer.

Aprendiendo arduino. (s.f.). Obtenido de <https://aprendiendoarduino.wordpress.com>

Carlos Martínez Bazán. (2015). About bubbles and vortex rings. *Cambridge University Press*.

Eisenga, A. (1997). *Dynamics of a vortex ring in a rotating fluid*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven DOI.

Fernandez Feria, R., & Ortega Casanova, J. (2016). *Mecánica de fluidos*. Malaga: Universidad de Málaga.

Flux Work Shop. (s.f.). Obtenido de <http://vi.raptor.ebaydesc.com/ws/eBayISAPI.dll?ViewItemDescV4&item=112962787132&category=26261&pm=1&ds=0&t=1542023352000&ver=0>

Inaipil Leal, M. I. (2015). Análisis fluido dinámico de un flujo de burbujas mediante CFD.

Linares Ureña, A. (2017). *Estudio experimental de interacción de burbujas y anillos de vorticidad*. Jaen: Universidad de Jaen.

Litron Lasers. (s.f.). Obtenido de <http://www.litronlasers.com/>

Lualtec.es. (s.f.). *Lualtec.es*. Obtenido de https://lualtec.es/medidor-de-presion-para-agua-aceite-y-gas-5v-g1-4-0-0-5-mpa.html?gclid=CjwKCAiA5qTfBRAoEiwAwQy-6SxPatRgyqsgCuxacRGxDVSXCoCmlmr3xiaQ5Zdau5wn_Qr4QhGDWhoC5lcQAvD_BwE

Martínez Bazán, C., & Cano-Lozano, J. (2016). *Paths and wakes of deformable nearly spheroidal rising bubbles*. Jaén.

Pérez Vidal, A. J. (2016). *Desarrollo de un sistema PIV didáctico*. Universidad Politécnica de Valencia.

Simmons, J., Sprittles, J., & Shikhmurzaev, Y. (2015). The formation of a bubble from a submerged orifice. *European Journal of Mechanics fluids*.

Sitio oficial de Arduino. (s.f.). Obtenido de <https://www.arduino.cc/>

TSI. (2012). Manual de funcionamiento del sistema PIV.

V. V. Meleshko, A. A. Gourjii, & T. S. Krasnopol'skaya. (2011). Vortex rings: History and state of the art. *Journal of Mathematical Sciences, Vol. 173*.

Wikipedia. (s.f.). Obtenido de <https://es.wikipedia.org>