

Alma Mater Studiorum

Università di Bologna

Universitat Politècnica de Valencia

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN TUBO DE VIENTO A BAJAS VELOCIDADES

**Tesis Final de Grado en Laboratorio de
Termofluidodinámica**

CANIDATO:

Jorge García Vera

RELATOR:

Prof.^a Beatrice Pulvirenti

Año Académico 2017-2018

Resumen/*Abstract*

Introducción

1. TÚNEL DE VIENTO

1.1. Introducción histórica

1.2. Generalidades

1.3 Partes constructivas

1.3.1 *Cámara de ensayos*

1.3.2 *Contracción*

1.3.3 *Difusor*

1.3.4 *Cámara de remanso*

1.3.5 *Curvas*

1.3.6 *Motor y Ventilador*

1.4 Tipos

1.4.1 *De ciclo abierto*

1.4.2 *De ciclo cerrado*

1.4.3 *Verticales*

1.5 Aplicaciones

1.6 Túnel de viento del DIENCA

1.6.1 *Cámara de ensayos DIENCA*

2. INSTRUMENTOS DE MEDIDA

2.1 Anemómetro

2.1.1 *Tipos*

2.2. Medición velocidades

2.2.1 *Laser Doppler Velocimetry (LDV)*

2.2.2 *Particle Image Velocimetry (PIV)*

2.2.3 *Stereo-PIV del D.I.N*

2.3 Instrumentos que componen el sistema PIV

2.3.1 *Sistema láser*

2.3.2 Cámaras fotográficas

2.3.3 Generador de humo

3. CARACTERIZACION DE LA GALERÍA DEL VIENTO DEL LABORATORIO DEL D.I.N.

3.1 Laboratorio

3.2 Medidas de velocidad

3.3 Gráficas 2D relación $v(m/s) / f(Hz)$

3.4 Desviación estándar

3.5 Capa límite

3.6 Perfiles 3D de las velocidades medias

3.7 Caracterización mediante P.I.V.

3.8 Simulación con Fluent

4. FLUJO ALREDEDOR DE UN CILINDRO

4.1 Resistencia aerodinámica

4.1.1 *Fricción viscosa*

4.1.2 *Resistencia de presión o de forma*

4.1.3 *Resistencia inducida*

4.2 Fenómeno de Turbulencia

4.2.1 *Descripción turbulencia*

4.2.2 *Promedio temporal flujo turbulento*

4.2.3 *Ecuaciones de conservación flujo turbulento*

4.3 Flujo alrededor de un cilindro

4.3.1 *Flujo ideal*

4.3.2 *Flujo real*

4.4 Cálculo Número de Reynolds

4.5 Preparación Medidas / Calibración

4.5.1 *Calibración de las cámaras*

4.5.2 *Modelo de imagen fit (IMF)*

4.6 Medidas

4.6.1 *Medidas PIV standard*

4.6.2 *Medidas Stereo-PIV*

4.6.2.1 *Medidas a 0,8 m/s (5 Hz)*

4.6.2.2 *Medidas a 1,6 m/s (10 Hz)*

4.6.2.3 *Medidas a 2,4 m/s (15 Hz)*

4.6.2.4 *Medidas a 3,2 m/s (20 Hz)*

4.6.3 *Comparación*

5. FLUJO ALREDEDOR DE UN COCHE SOLAR

5.1 Coche solar

5.1.1 *Funcionamiento*

5.1.2 *Honda "Dream" '96*

5.2 Aspectos generales aerodinámica en los vehículos.

5.3 Emilia4

5.3.1 *Dimensiones*

5.3.2 *Maqueta laboratorio*

5.4 Cálculo Número de Reynolds

5.5 Medidas

5.5.1 *Medidas a 0,8 m/s (5 Hz)*

5.5.2 *Medidas a 1,6 m/s (10 Hz)*

5.5.3 *Medidas a 2,4 m/s (15 Hz)*

5.5.4 *Medidas a 3,2 m/s (20 Hz)*

Conclusión

Bibliografía

RESUMEN/*ABSTRACT*

La tesis consiste en la caracterización experimental del tubo de viento del D.I.N., laboratorio termofluidodinámico de la Universidad de Bolonia.

Previo a los análisis experimentales, se exponen los conceptos teóricos a tener en cuenta, como la explicación de qué es un tubo de viento, sus funciones, partes características, aplicaciones, tipos y por supuesto del tubo de viento que se ha utilizado para la experimentación. No solo se explica el tubo de viento, si no toda la instrumentación utilizada para la obtención de los cálculos, como el anemómetro, el tubo de Pitot y los métodos PIV con los que se han obtenido los resultados. En particular se explica el funcionamiento detallado del sistema *stereo-PIV* utilizado en el laboratorio y todas las partes que lo componen, como el sistema láser, las cámaras CCD y el generador de humo. Además, se explican conceptos importantes que se utilizan mucho en esta tesis como las definiciones teóricas de turbulencia y del número de Reynolds.

Explicados los conceptos teóricos se procede a la experimentación. Primero se ha caracterizado el tubo calculando el perfil de velocidades para dos casos distintos, con y sin tubo extractor de gases de escape, con distintos métodos: tubo de Pitot (2D), PIV (2D y 3D) y simulación con *Fluent* (3D). Comparados los resultados se observa una relación lineal entre la frecuencia del ventilador y la velocidad del fluido, y que para el caso sin tubo extractor las velocidades son mayores. Para terminar la caracterización, se ha definido la capa límite con el tubo de Pitot a pesar de las limitaciones de espacio presentadas por el grosor de éste.

Caracterizado el tubo por completo, se han expuesto dos casos de experimentación reales, el estudio de la aerodinámica de un cilindro y del *Emila4* (maqueta de un coche solar). Ambos se han realizado mediante un sistema PIV, el primero, mediante dos de ellos, el *PIV standard* y el *stereo-PIV*, comparando los resultados obtenidos por ambos. En ambos métodos aumenta la turbulencia conforme a la velocidad del fluido, solo que en el caso del *stereo-PIV*, los resultados presentan mayor fiabilidad al tener en cuenta las componentes 3D de los vectores. El segundo experimento trabaja con el método *stereo-PIV*, pero al tratarse de un cuerpo más irregular, en los resultados obtenidos solo se busca un análisis cualitativo, y no cuantitativo. Esto es debido a la importancia de la componente z de los vectores velocidad en este ensayo, y a la dificultad que presentan para ser analizados. En este caso los resultados si que difieren de lo esperado, ya que los vórtices que deberían generarse justo debajo de la cola del coche, para velocidades mayores de 0,8 m/s, aparecen separados de ésta. A mayor velocidad, mayor es la separación, hasta el punto de que en velocidades superiores a 3,2 m/s, aparecen un mayor número de vórtices más cercanos a la cola del coche que los que se estaban alejando. Este fenómeno es debido a que, a diferencia de un caso real, la maqueta está sujeta e inmóvil al suelo de la cámara de ensayos, por lo que el efecto que provoca el movimiento relativo entre el coche y el suelo no aparece.

The thesis consists in the experimental characterization of the wind tunnel of the D.I.N., thermofluidic dynamic laboratory of the University of Bologna.

Prior to the experimental analyses, the theoretical concepts to be taken into account are explained, such as the explanation of what a wind tunnel is, its functions, characteristic parts, applications, types and, of course, the wind tunnel that has been used for experimentation. Not only the wind tunnel is explained, but also all the instrumentation used to obtain the results, such as the anemometer, the Pitot tube and the PIV methods with which the results have been obtained. In particular, the detailed operation of the stereo-PIV system used in the laboratory and all its components, are explained. In addition, important concepts that are widely used in this thesis are explained, such as the theoretical definitions of turbulence and the Reynolds number.

Once the theoretical concepts have been explained, some experiments within the wind tunnel are carried out. The tunnel was first characterized by calculating the velocity profile for two different cases, with and without an external tube connected with the fan with the function of extracting smoke used for PIV measurements. The velocity profiles have been obtained by different methods: Pitot tube (2D), PIV (2D and 3D) and simulation with Fluent (3D). Comparing the results, a linear relationship between the fan frequency and the fluid velocity is observed. Higher speeds have been observed in the case without the external extractor tube. To finish the characterization, the boundary layer with the Pitot tube has been measured despite the space limitations presented by its thickness.

Characterized the tube completely, two real experimentation cases have been exposed, the study of the aerodynamics of a cylinder and the Emilia4 (model of a solar car). Both have been made using a PIV system. For the study of the air flow around a cylinder, both the standard PIV and the stereo-PIV have been used. A comparison between the two methods is shown. For measuring the air dynamics around a solar car, the stereo-PIV has been used, but since it is a more irregular body, only a qualitative analysis is sought in the results obtained. This is due to the importance of the z component of the velocity vectors in this test, and the difficulty they present to be analysed. In this case, the results differ from what was expected, since the vortices that should be generated just below the tail of the car, for speeds greater than 0.8 m / s, appear separated from it. The higher the speed, the greater the separation, to the point that at speeds higher than 3.2 m / s, a big number of vortices appear closer to the tail of the car than those that were moving away. This phenomenon is due to the fact that, unlike a real case, the model is fixed and motionless to the floor of the test chamber, so the effect caused by the relative movement between the car and the floor cannot be investigated.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar experimentalmente una galería o tubo de viento que trabaja a velocidades bajas. Para ello también se buscan otros objetivos como: conocer que es un tubo de viento, sus características generales, componentes, tipos y aplicaciones; conocer los distintos modos de trabajo de los tubos de viento, compararlos entre ellos, aprender a manejarlos y aprender a utilizar los softwares externos que nos permitirán caracterizarlo; y por último, entender y comparar los resultados obtenidos mediante los distintos métodos y técnicas utilizados para dos casos de estudio en particular, en los que se ha estudiado la aerodinámica de un cilindro y de un coche solar.

La fase inicial de la investigación se refiere a la explicación de los tubos de viento en general, a sus características generales tanto estructurales como funcionales y a sus componentes. También se han explicado y comparado los diversos tipos de tubos existentes según sus características de funcionamiento, y sus aplicaciones más comunes junto a los experimentos que se llevan a cabo hoy en día. Por último, se ha prestado especial atención al tubo de viento caracterizado en esta tesis, enumerando las partes que lo componen y explicando el funcionamiento de cada una de ellas.

Antes de entrar en la parte experimental, se realizó un marco general sobre la instrumentación necesaria para caracterizar el tubo y realizar las medidas necesarias.

Se ha empezado definiendo que es un anemómetro, su funcionamiento y funciones y tipos existentes en el mercado. A continuación, se han expuesto los distintos métodos y aparatos para llevar a cabo la medición de velocidades, LDV y PIV en líneas generales, y los tres tipos de PIV, standard, stereo y tomo, en líneas específicas. En particular se ha profundizado sobre el stereo-PIV utilizado en el laboratorio. Para finalizar, se habla sobre el láser, las cámaras fotográficas CCD y el generador de humo utilizados en nuestras experimentaciones.

Explicados los conceptos previos, entramos en la parte experimental de la tesis empezando por la caracterización de la cámara de ensayos. El perfil de velocidades se ha calculado para las frecuencias de 5 a 40 Hz hasta con tres métodos distintos, mediante el tubo de Pitot, mediante el sistema *stereo-PIV* y mediante el simulador *Fluent*. Comparados los resultados de los diferentes métodos, se ha trazado la evolución de la capa límite y así calculado su espesor. En concreto, para el método del tubo de Pitot, se han comparado los resultados para dos configuraciones distintas del tubo de viento, con y sin tubo extractor de gases de escape.

En la segunda parte experimental, tras unas previas aclaraciones sobre la turbulencia y haber calculado el número de Reynolds que caracteriza al flujo, se ha hecho uso de la tecnología PIV, con una previa calibración de las cámaras fotográficas, se ha estudiado el caudal para las frecuencias de 5 a 20 Hz alrededor de un cilindro. Esto ha sido gracias al software FlowManager que comparaba y post-procesaba las imágenes captadas por las cámaras gracias al sistema láser y generador de humos. El objetivo de este experimento era identificar los vórtices generados tras el paso del cilindro. La experimentación se ha realizado mediante dos métodos distintos, el *PIV standard* y el

Stereo-PIV, con el fin de comparar resultados entre ambos. La realización de ambos experimentos no ha sido objeto de estudio de esta tesis, por lo que los resultados fueron tomados y expuestos en sus tesis de máster por mis compañeras Elena García (*Master tesis of Elena García Universidad de Sevilla*) y Morena Falcone (*Caratterizzazione sperimentale delle strutture vorticose generate in coda ad un'auto solare*).

La última parte experimental hace uso del sistema *stereo-PIV* y se realiza exactamente igual que para el cilindro, empezando por el cálculo del número de Reynolds. El único cambio es el objeto de estudio, que en este caso es una maqueta 1:18 del coche solar *Emilia4*. El objetivo de esta experimentación es investigar las turbulencias generadas en la parte de la cola del coche, así como identificar los vórtices formados en esta zona. En este caso la experimentación y análisis de imágenes han sido más complicados debido al gran carácter turbulento que presenta el flujo. Este experimento tampoco ha sido objeto de estudio de esta tesis, por lo que las medidas fueron tomadas y expuestas en la tesis, *Caratterizzazione sperimentale delle strutture vorticose generate in coda ad un'auto solare*, de mi compañera Morena Falcone.

1. TÚNEL DE VIENTO

Indice:

- 1.1. Introducción histórica
 - 1.2. Generalidades
 - 1.3 Partes constructivas
 - 1.3.1 *Cámara de ensayos*
 - 1.3.2 *Contracción*
 - 1.3.3 *Difusor*
 - 1.3.4 *Cámara de remanso*
 - 1.3.5 *Curvas*
 - 1.3.6 *Motor y Ventilador*
 - 1.4 Tipos
 - 1.4.1 *De ciclo abierto*
 - 1.4.2 *De ciclo cerrado*
 - 1.4.3 *Verticales*
 - 1.5 Aplicaciones
 - 1.6 Túnel de viento del DIENCA
 - 1.6.1 *Cámara de ensayos DIENCA*
-

1.1. Introducción histórica

El nacimiento de los túneles de viento vino condicionado por la necesidad del ser humano de probar la resistencia aerodinámica en cuerpos diseñados para volar. Fue Francis H. Wenham, quien en 1871, fabricó el primer túnel de viento logrando grandes avances en el mundo aerodinámico, e inventando muchos de los conceptos matemáticos que por ejemplo, definen la forma de las alas de los aviones a día de hoy.

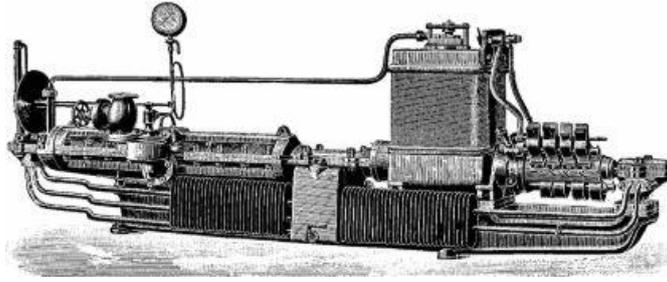


Imagen 1. Túnel de viento del siglo XVIII.

No fue hasta el inicio de la segunda guerra mundial cuando estos aparatos tomaron una gran importancia, siendo principal objeto de estudio de las fuerzas aéreas. Se buscaba mejorar el rendimiento de los aviones de guerra, disminuyendo el consumo de combustible, mayores velocidades, mayor facilidad de maniobra...

Los tubos de viento para estudiar la resistencia aerodinámica de los aviones o vehículos siempre fueron horizontales. Ya fue la NASA quien inventó los tubos de viento verticales, y Jack Tiffany la primera persona en la historia en elevarse sobre el suelo dentro de uno de ellos.

1.2. Generalidades

Un túnel de viento es el sistema que utilizado para estudiar como afecta la circulación de un fluido (generalmente aire) en movimiento alrededor de un cuerpo.

Generalmente se estudian los parámetros de presión, temperatura, velocidad y fuerzas ejercidas por el fluido sobre el cuerpo, y mediante software externos pueden visualizarse los campos de estos. Para medir estos parámetros serán necesarias algunas operaciones como revestir el cuerpo con sustancias especiales o añadir humos o colorantes al flujo de viento para permitir la visualización de sus partículas.

La visualización será posible gracias a la refracción de la luz que cruza dos sustancias distintas, como el aire y el colorante. Muchas veces son necesarias fuentes externas de luz como por ejemplo láseres.

Las velocidades de flujo que se estudian suelen ser subsónicas, sin sobrepasar los 300 m/s.

Una de las grandes ventajas que presentan es que no es necesario realizar los experimentos sobre el prototipo que se desea estudiar, sino que es suficiente con realizarlos sobre un modelo que presente semejanza aerodinámica. Esto nos permite trabajar con todo tipo de objetos, da igual el tamaño que tengan, siempre podemos disponer de un modelo semejante con un tamaño aceptable para el estudio.

1.3 Partes constructivas

1.3.1 Cámara de ensayos

La cámara de ensayos es la zona donde se dispondrán los objetos a ensayar, por lo que estos tienen que entrar sin problema. Para ello esta tendrá una forma cuadrada con un largo aproximadamente dos veces el lado mayor de la sección, siendo siempre lo suficientemente larga como para que el sujeto de estudio se encuentre alejado de la entrada y esté expuesto a un campo de velocidad uniforme. Para evitar la disminución del área efectiva por un aumento del espesor de la capa límite, conviene que las paredes tengan un ángulo pequeño de medio grado de divergencia.

1.3.2 Contracción

La contracción convergente del canal del tubo disminuye su sección provocando un aumento de la velocidad del fluido y una disminución tanto de turbulencia como de espesor de capa límite.

Hay que prestar especial atención a dos aspectos de diseño para la convergencia. Uno es que en la entrada de ésta conviene biselar las esquinas para evitar la alteración del flujo. El otro es considerar que tanto como en la entrada como en la salida, se produce un gradiente de presión no deseable que puede llegar a provocar un desprendimiento de la capa límite.

El coeficiente de contracción no suele ser mayor de 6.

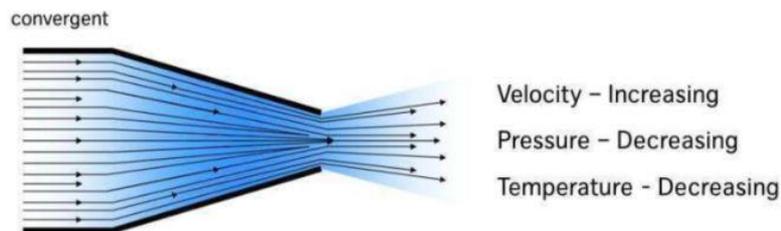


Imagen 2. Convergencia y efectos.

1.3.3 Difusor

La difusión divergente aumenta la sección del tubo causando un decrecimiento de la velocidad. Debido a que las pérdidas varían con la velocidad al cubo, logramos un mejor rendimiento, y también permite hacer uso de un ventilador de menor potencia, y por lo tanto de menor coste económico.

El diseño del difusor es muy meticuloso, siendo la clave del buen funcionamiento del túnel. Se tiene que prestar gran atención a los posibles puntos donde pueda separarse la capa límite, para evitarlo se puede trabajar con ángulos de divergencia muy bajos ($2^\circ, 3^\circ$).

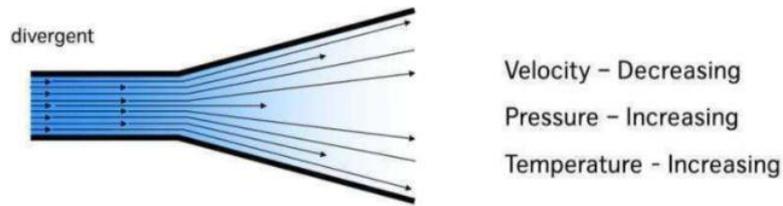


Imagen 3. Divergencia y efectos.

1.3.4 Cámara de remanso

La cámara de remanso es la zona encargada de uniformizar el flujo, disminuyendo el carácter turbulento de éste, mediante mallas, platos perforados o *Honeycombs* (*Paneles de abeja*).

- **Platos perforados:** uniformizan el flujo
- ***Honeycombs*:** rejilla con celdas hexagonales que eliminan la componente ortogonal de los vectores velocidad del flujo
- **Mallas:** Elimina la turbulencia restante aguas abajo.

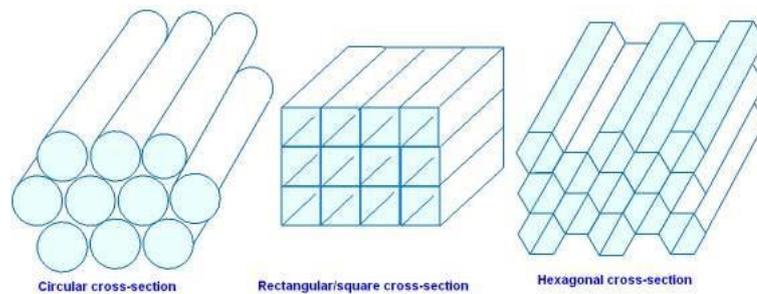


Imagen 4. Celdas Honeycombs.

El *Honeycomb* del laboratorio es un panel de sección 3,6*0,9 m² con 78000 tubos de 7 mm de diámetro.

1.3.5 Curvas

Las curvas cambian la dirección del flujo circulante. En ciertos momentos se puede producir que en la parte interior de una curva se desprenda el flujo de la pared, para evitar este fenómeno se pueden instalar enderezadores de corriente.

1.3.6 Motor y Ventilador

Es el encargado de hacer circular el fluido, absorbiéndolo aguas abajo, gracias a la fuerza transmitida por un motor generalmente eléctrico.

El motor puede ser interno coaxial al ventilador o externo, siendo mejor el externo porque no entra en contacto con el fluido y no varía su comportamiento.

El ventilador puede ser de tipo axial o centrífugo.

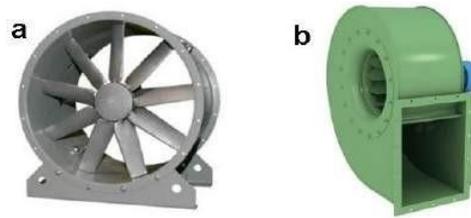


Imagen 5. Ventiladores axial (a) y centrífugo (b).

1.4 Tipos

Los túneles de viento pueden clasificarse según diversos tipos de parámetros como las dimensiones, los usos, la manera en que operan, velocidades de flujo con los que trabajan, pero el criterio principal es según su estructura de funcionamiento o construcción.

Pueden ser:

- De ciclo abierto
- De ciclo cerrado
- Verticales

1.4.1 De ciclo abierto

El túnel de ciclo abierto toma el aire de la atmósfera y lo libera nuevamente a ella tras pasar por la cámara de ensayos.

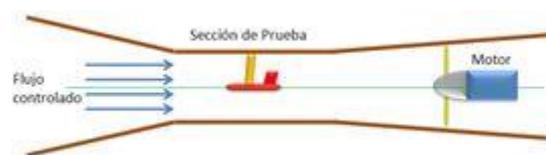


Imagen 6. Ciclo abierto.

Su estructura suele componerse de una sección de entrada más grande a la que sigue un tramo convergente para aumentar la velocidad del fluido, hasta llegar a su máxima en la zona de ensayos. Una vez pasada esta cámara el fluido, pierde velocidad en un tramo de divergencia donde termina encontrando el ventilador aspirador, que siempre se encuentra aguas abajo.

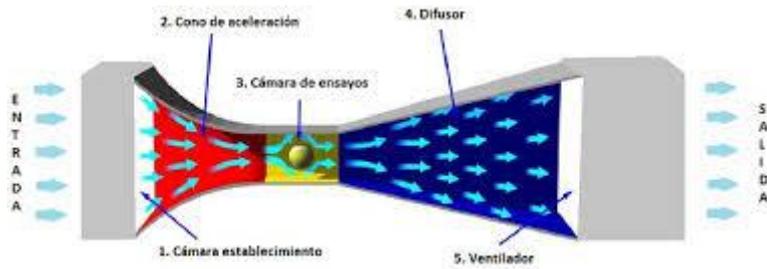


Imagen 7. Estructura Ciclo abierto.

1.4.2 De ciclo cerrado

El aire circula varias veces por la cámara de ensayos recuperando su energía gracias a un difusor.

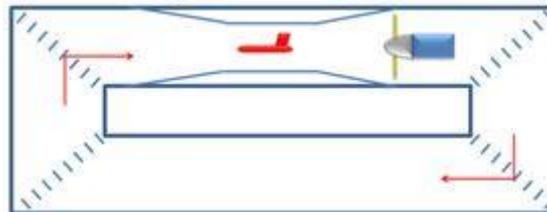


Imagen 8. Ciclo abierto.

La estructura de estos tubos es la misma que la de los tubos de circulación abierta, la única diferencia es la recirculación del fluido, por lo que la entrada y la salida en este caso están unidas. Además se disponen de intercambiadores de calor para enfriar el fluido que con el paso del tiempo va calentándose.

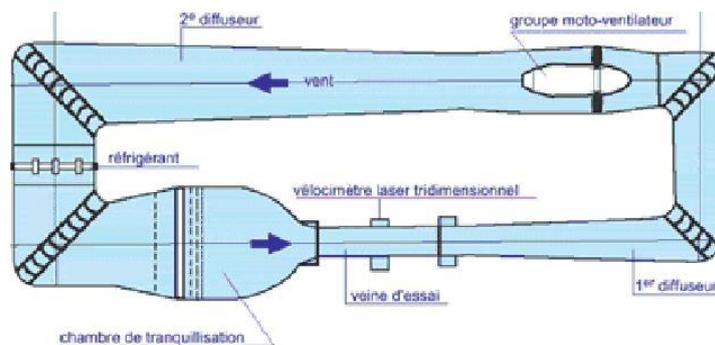


Imagen 9. Estructura Ciclo cerrado.

1.4.3 Verticales

Es una galería de estructura vertical que empuja el aire hacia arriba a unos 180 km/h. Entre sus usos está la mejora de las técnicas acrobáticas de los aviones, de la autorrotación de los helicópteros y la preparación de los paracaidistas.

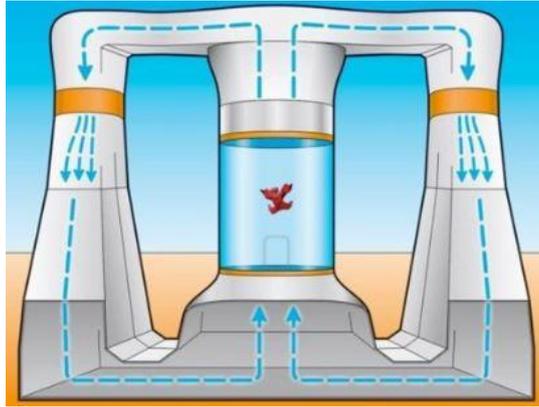


Imagen 10. Estructura Vertical.

1.5 Aplicaciones

En las galerías del viento se ensayan todo tipo de cuerpos que vayan a estar influenciados por las fuerzas de la aerodinámica, como por ejemplo: aviones, coches, trenes, helicópteros, motos... pero no todo son vehículos, también se miden ciclistas, esquiadores y deportistas que la resistencia que el viento les pone es muy determinante para la obtención de mejores o peores resultados.



Imagen 11. Ciclista en un túnel de viento.

Como se observa en la imagen anterior, las ruedas de la bici se colocan encima de unos rodillos que permiten al ciclista pedalear en el sitio, logrando así mayor veracidad en los estudios en comparación con una carrera real.

Para el caso de los aviones, se estudian en túneles cerrados capaces de cambiar condiciones de presión y temperatura de la cámara con el fin de simular las distintas situaciones climatológicas a las que puede enfrentarse el avión.



Imagen 12. *Avión en un túnel de viento.*

Los fórmula 1 suelen ensayarse sobre alfombrillas en movimiento que pueden alcanzar altas velocidades, con el objetivo es simular el efecto suelo.

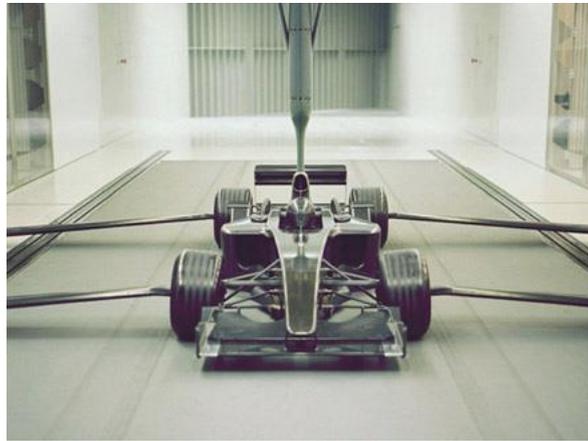


Imagen 13. *F1 en un túnel de viento.*

1.6 Túnel de viento del DIENCA

El túnel de viento del laboratorio trabaja a velocidades bajas y presenta una estructura de circuito abierto y una cámara de ensayos cerrada. Se dispone de un ciclo abierto porque tiene un coste menor de construcción, el problema es que tanto el coste energético como los efectos del ruido son mayores.

Las dimensiones reales son las siguientes:

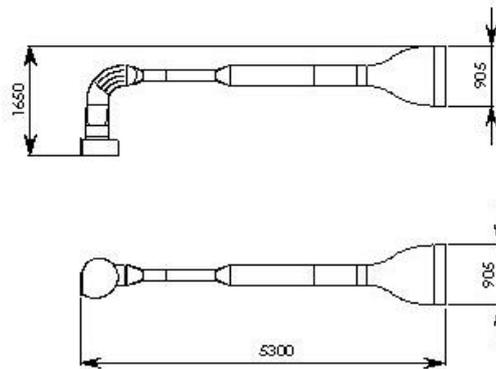


Imagen 14. Planta y alzado del tubo de viento del DIN.

Nuestro tubo de viento se divide en las siguientes partes, cuyas fotos están en el apartado de *CARACTERIZACION DE LA GALERÍA DEL VIENTO DEL LABORATORIO DEL D.I.N.*

1. Entrada (*Honeycomb*) y convergencia.
2. Cámara de ensayos.
3. Tramo largo para evitar perturbaciones debidas a los cambios de sección.
4. Convergencia.
5. Tramo cilíndrico.
6. Tramo cilíndrico.
7. Medidor de flujo tipo diafragma.
8. Divergencia.
9. Curva.
10. Soplante.
11. Ventilador.

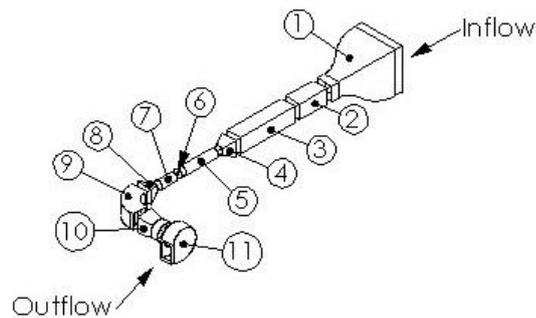


Imagen 15. Partes del tubo de viento del DIN.

El ventilador trabaja en aspiración, y se mueve gracias a la transmisión en cinta del motor *Dayton TRI_VOLT* de características:

- Trifásico
- 60 Hz
- 1470 KW
- 460 V
- 1740 rpm

El motor se controla mediante el inverter *Siemens Micromaster 420* que nos permite controlarlo desde un ordenador.

1.6.1 Cámara de ensayos DIENCA

Como ya se ha indicado anteriormente, la cámara de ensayos es cerrada y de paredes transparentes para poder observar lo que ocurre dentro de ella, en parte para poder caracterizar el tubo mediante el sistema PIV. El material elegido para las paredes es el *Plexiglas*.

Las dimensiones de la sección transversal son $0,3 \times 2,3 \text{ m}^2$ y $0,6$ de longitud, con un espesor de pared de 5 mm .

La cámara se ha diseñado en dos partes distintas, fijadas mediante tornillos, una sin ningún tipo de orificio y la otra con un hueco que se tapaná con una placa de metal. Por este orificio es por donde se introducen los objetos de ensayos o, en su caso, los instrumentos de medida necesarios.

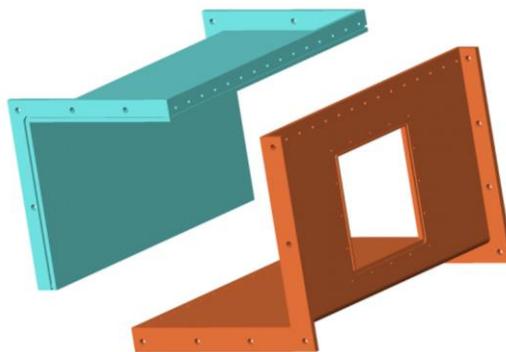


Imagen 16. Partes cámara de ensayos del tubo de viento del DIN.

La placa de metal que cierra la cámara es de aluminio, y se fija a ella mediante tornillos. La circularidad que presenta le permite disponerse de varias formas, para así lograr distintas configuraciones de entrada a la cámara por los pequeños orificios cilíndricos que presenta. Estos orificios nos permiten entre otras cosas introducir el tubo de Pitot manteniendo la cámara cerrada, con la ayuda de plastilina que fija el tubo al orificio. La zona que ocupan los cilindros es cuadrada de lado $0,24 \text{ m}$. Por razones de espacio la placa metálica dispone de un total de 13 orificios separados entre ellos una distancia de 24 mm . A la hora de tomar medidas, los orificios que no sean necesarios se tapanán con la ayuda de cilindros de diámetro 24 mm .

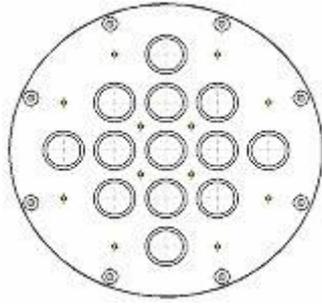


Imagen 17. *Placa de metal con orificios cilíndricos.*

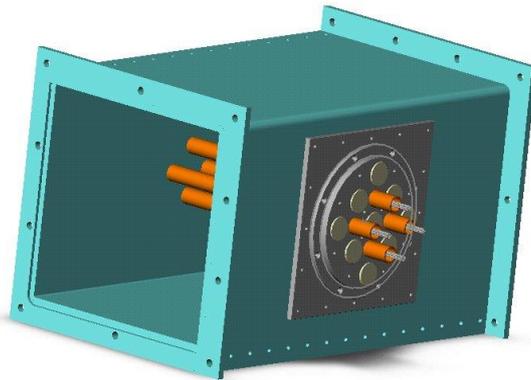


Imagen 18. *Cámara de ensayos del DIENCA.*

2. INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Indice:

2.1 Anemómetro

2.1.1 Tipos

2.2. Medición velocidades

2.2.1 Laser Doppler Velocimetry (LDV)

2.2.2 Particle Image Velocimetry (PIV)

2.2.3 Stereo-PIV del D.I.N

2.3 Instrumentos que componen el sistema PIV

2.3.1 Sistema láser

2.3.2 Cámaras fotográficas

2.3.3 Generador de humo

2.1 Anemómetro

El anemómetro es un dispositivo que nos permite conocer la velocidad y dirección del viento, así como otros datos adicionales. Sus principales usos se han llevado a cabo en muchos sectores de la industria siempre que haya sido necesario conocer la velocidad del viento, como en la aeronáutica o la automotriz, así como en el campo de la meteorología.

El mundo de los anemómetros ha evolucionado mucho desde el primero inventado por León Batista Alberti (1450). Este anemómetro consistía en un disco que se veía empujado por la acción del viento y se medía la fuerza de éste basándose en una escala que medía el ángulo de inclinación del disco.



Imagen 19. Anemómetro de León Batista Alberti

A este primer invento le han sucedido muchos otros como el de Leonardo da Vinci, que ya permitía medir la dirección del viento.



Imagen 20. Anemómetro de Leonardo da Vinci.

Y anemómetro tras anemómetro se ha llegado a muchos tipos de ellos, que se agrupan según su estructura o funcionalidad.

2.1.1 Tipos

- De empuje

La velocidad del viento se determina midiendo la inclinación de un alambre de plomada.



Imagen 21. Anemómetro de empuje.

- De paleta

La resistencia que oponen las paletas al viento provoca el giro de éstas, y mediante el número de revoluciones dadas en un período de tiempo se puede obtener la velocidad del viento.



Imagen 22. Anemómetro de paletas.

- De cazoletas

La resistencia que oponen las bolas al viento provoca el giro de éstas, y mediante el número de revoluciones dadas en un período de tiempo se puede obtener la velocidad del viento.

Incorporan una paleta que indica la dirección de la acción del viento.



Imagen 23. Anemómetro de cazoletas.

- De presión hidrodinámica

El funcionamiento se basa en la presión adicional que ejerce el viento sobre un fluido distinto con la ayuda de un tubo de Pitot.

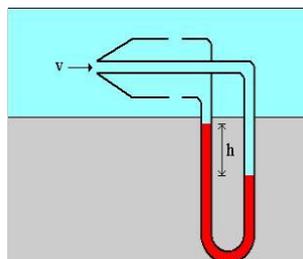


Imagen 24. Funcionamiento anemómetro de presión hidrodinámica.

Este es el tipo de anemómetro que disponemos en el laboratorio, que se explicará con detalle en el apartado de *Caracterización de la galería*.

- De alambre caliente

Se constituyen de un sensor (alambre, película o resistencia) que se calienta con un aumento de la velocidad del aire al que se expone. El aire que pasa por el sensor tiende a enfriarse, y mediante un circuito de puente se mantiene constante la temperatura del sensor. Con un aumento de velocidad, la temperatura disminuye proporcionalmente, por lo que será necesaria mayor energía para mantener constante la temperatura del sensor. Midiendo la energía necesaria se deduce la velocidad del viento.



Imagen 25. Anemómetro de alambre caliente.

2.2. Medición velocidades

2.2.1 Laser Doppler Velocimetry (LDV)

Esta técnica nos permite medir la velocidad de un fluido mediante una luz láser, evaluando la variación de frecuencia o longitud de onda de los fotones que atraviesan las partículas de fluido.

Basándose en el efecto Doppler, permite conocer la velocidad a la que circula el fluido mediante el análisis de la variación de la longitud de onda de la luz láser, una vez atraviesa el fluido de ensayo y es captada por el receptor.

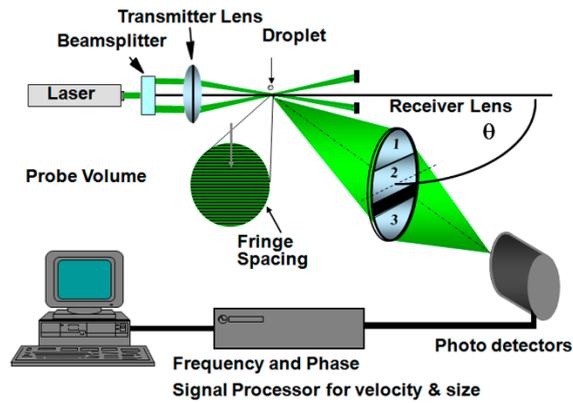


Imagen 26. Laser Doppler Velocimetry (LDV).

La gran ventaja de esta técnica es la posibilidad de medir velocidades sin ningún tipo de contacto con el material. Además, nos permite medir velocidades muy bajas y se puede utilizar en una gama muy amplia de casos, ya sea con flujos líquidos o gaseosos, o con velocidades subsónicas o supersónicas.

El gran inconveniente es el alto coste que implica utilizarla, debido a la necesidad de ordenadores muy sofisticados.

2.2.2 Particle Image Velocimetry (PIV)

Al igual que la técnica LDV, la técnica PIV consiste en la utilización de una luz láser no intrusiva pero que en este caso no servirá para medir longitudes de onda, si no que servirá para iluminar las partículas del fluido.

Esta técnica se basa en la expresión:

$$v = \frac{x}{t}$$

donde x es la distancia recorrida por las partículas y t el tiempo que tardan en hacerlo.

El láser en este caso no es continuo, si no estroboscópico, para iluminar en distintos momentos de tiempo las partículas de fluido, momentos en los que las cámaras fotográficas captarán pequeñas motas claras en un fondo oscuro.

Ambos instrumentos, láser y cámaras, se sincronizan con la misma frecuencia para así captar en cada haz de luz lanzado una posición distinta de las partículas. Con este cambio de posición se trazan mapas de vectores desplazamiento, y sabiendo la frecuencia de captación, conoceremos la velocidad de las partículas y se trazarán mapas de vectores de velocidad con la ayuda de un software externo.

Como se explicará más adelante, mediante el método de *crosscorrelation*, eliminamos los vectores erróneos y nos quedamos con un buen campo de vectores velocidad.

Dependiendo de las componentes de los vectores velocidad estudiadas se diferencian tres tipos de PIV:

- PIV standard
- Stereo-PIV
- Tomo-PIV

PIV standard

Este método solo tiene en cuenta dos componentes (2C) para la velocidad en el plano (2D) con la ayuda de una sola cámara fotográfica. El método para representar el campo de velocidades es el explicado para el PIV en general. Decir que la velocidad será más cercana a la instantánea cuanto menor sea el intervalo de tiempo entre fotogramas.

En este método se discute la concentración de partículas que conviene que tenga el fluido, ya que, para concentraciones bajas, las partículas son más fáciles de seguir, pero el comportamiento del fluido obtenido es menos realista, y para concentraciones muy elevadas, es difícil captar las trayectorias que ha seguido cada partícula en cada intervalo de tiempo.

Otro problema que presenta esta técnica es que al no tener en cuenta las componentes ortogonales del movimiento de las partículas, algunas pueden escapar del fino haz de luz antes de ser fotografiadas dos veces.

Por último, se presenta la duda de qué intervalo de tiempo es el adecuado. Para intervalos largos, las partículas pueden escapar del haz de luz y perderse entre fotogramas, y para intervalos muy cortos, el efecto del ruido es mucho mayor y dificulta el análisis de las imágenes.

El período de tiempo más utilizado es del orden de 10 μ s.

Stereo-PIV

Esta técnica sí que tiene en cuenta las tres componentes de la velocidad (3C) en el plano (2D), y son necesarias dos cámaras fotográficas.

Para construir en el plano el espacio tridimensional, esta técnica utiliza el mismo sistema que el ojo humano. Mediante las dos cámaras fotográficas dispuestas de manera inclinada y separadas entre ellas, se toman dos planos de imagen distintos que reconstruyen el campo tridimensional mediante la aplicación de algoritmos en un software.

Los problemas que presenta esta técnica son los mismos que se presentan en el *PIV standard* más otros adicionales como, el post-procesamiento de imágenes y la necesidad de una exhaustiva calibración de las cámaras.

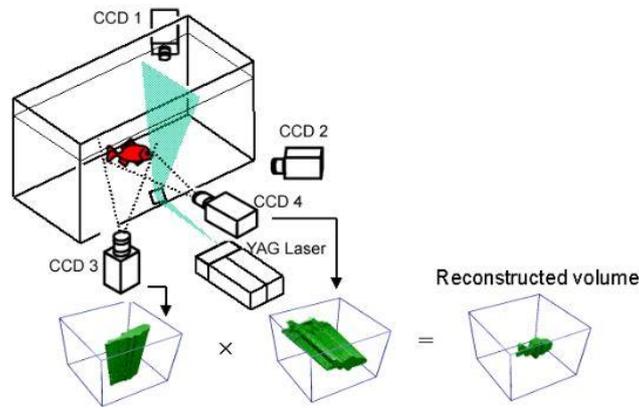


Imagen 27 . Stereo-PIV.

Este es el sistema PIV que se utilizó para tomar las imágenes en el laboratorio. Explicaremos éste en concreto más adelante.

Tomo-PIV

Este es el sistema más complejo de los tres, ya que utiliza dos rayos láser para iluminar todo el volumen de ensayo, y las cámaras necesarias para poder representar el volumen en su totalidad. Capta las tres componentes de la velocidad (3C) y las representa en un campo tridimensional (3D).

Presenta problemas de localización de partículas, ya que las proyecciones de muchas partículas pueden solaparse. Como consecuencia, el software crea partículas fantasmas que reconstruyen el campo de partículas no captadas.

2.2.3 Stereo-PIV del D.I.N

FlowMap es el nombre de la instrumentación empleada para la elaboración de esta tesis, con el que se han obtenido los distintos campos de velocidades. Se compone de varios hardware que se explican más adelante, y del software *FlowManager*.

A continuación, se explican algunos conceptos que caracterizan el sistema *FlowMap*:

Sistema de coordenadas

El sistema de coordenadas utilizado es el clásico sistema cartesiano donde la hoja utilizada para calibrar el sistema coincide con el plano XY. Los ejes para un operario que se encuentra detrás de las cámaras son, eje x positivo hacia la derecha y eje y positivo hacia arriba, siendo el origen de coordenadas la esquina inferior de la hoja que coincide con el pixel inferior izquierdo de la imagen de la cámara.

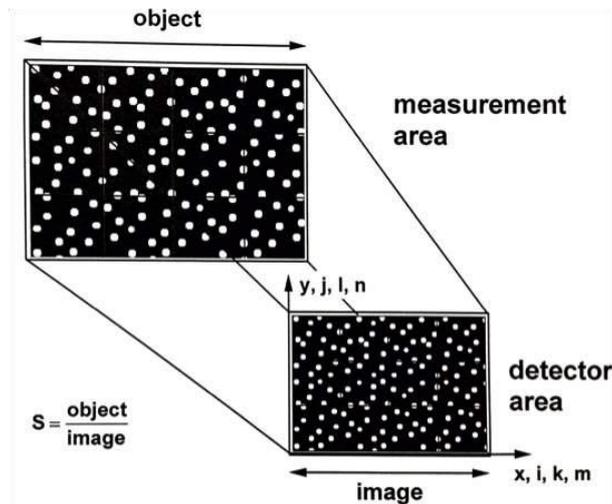


Imagen 28. Sistema de coordenadas PIV y factor de escala S.

La unidad de medida es el píxel, que mediante el factor de escala se obtiene la medida en metros, y las coordenadas utilizadas para las medidas de éstos son (i,j), (k,l) y (m,n).

Las coordenadas para las medidas reales en el S.I. son (x,y).

Cross-correlation

Cuando se obtienen dos pares de imágenes en un intervalo de tiempo, éstas se pueden comparar para describir un mapa vectorial simplemente con un modelo de proceso con una señal digital lineal como la siguiente:

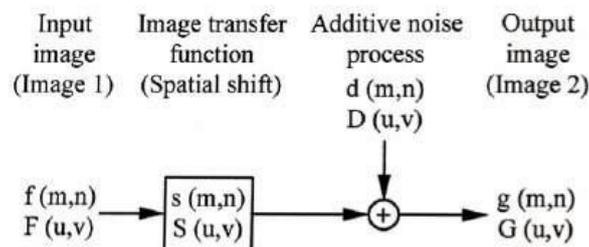


Imagen 29. Proceso señal digital lineal.

donde las funciones $f(m,n)$ y $g(m,n)$ representan la intensidad de luz registrada en cada instante, t y $t+dt$ respectivamente. La función $s(m,n)$ es una función de desplazamiento espacial, y $d(m,n)$ el ruido adicional. Las funciones en mayúsculas son las transformadas de Fourier y (u,v) sus coordenadas.

El método utilizado para obtener la función $s(m,n)$ es el de *cross-correlation*.

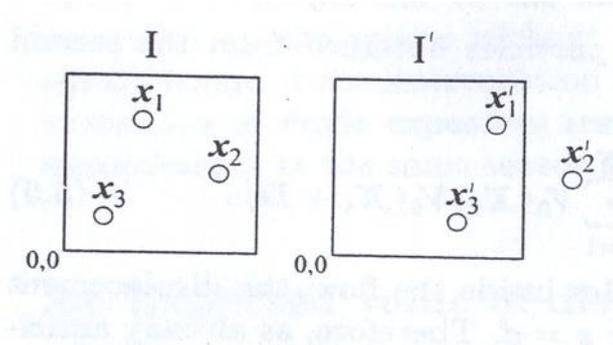


Imagen 30. Imágenes complementarias en instante t (iz.) y $t+dt$ (der.).

En el caso de que las partículas sean identificadas con su pareja en ambos instantes de tiempo se habla de *cross-correlation verdadera*, y en el caso de que se asocian a partículas que no son su pareja se habla de *cross-correlation aleatoria*.

Para representar mejor la correspondencia entre las funciones $f(m,n)$ y $g(m,n)$, consideraremos el mayor valor de *cross-correlation*, que se representa en el plano en forma de pico.

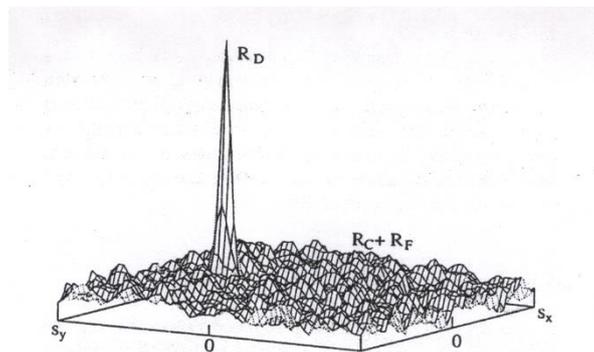


Imagen 31. Picos función *cross-correlation*.

No obstante, para disminuir el tiempo de *cross-correlation*, en lugar de sumar todos los elementos de una región, se multiplica de manera conjugada cada par de coeficientes de Fourier correspondientes mediante una Transformación rápida de Fourier (FFT).

El proceso quedaría sistematizado de la siguiente forma:

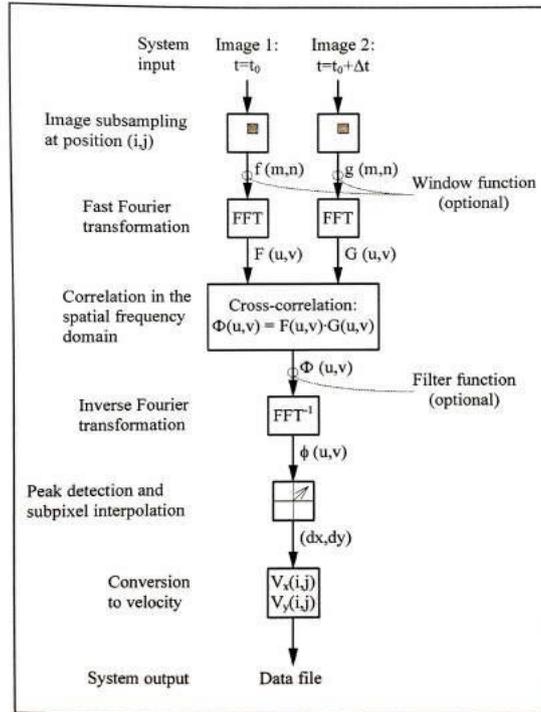


Imagen 32. Diagrama de flujo del proceso numérico del PIV.

Resolución de las estructuras de velocidad

Para explicar este concepto nos basaremos en la captación de imágenes del sistema PIV, donde para cada imagen adquirida, se separa en pequeñas áreas de interrogación que contienen un número de píxeles.

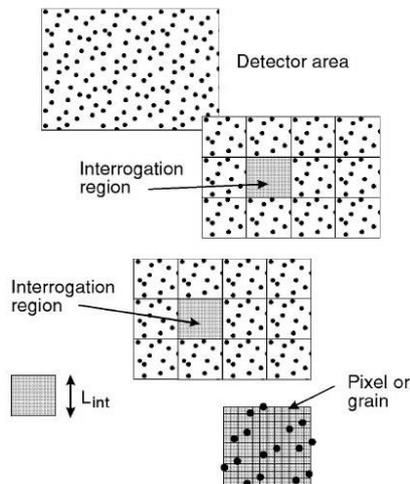


Imagen 33. Proceso separación pequeñas áreas interrogación.

Para cada área de interrogación se calcula el vector velocidad a partir de la media de los vectores velocidad de las partículas que incluye, representando cada área con un vector velocidad. Las dimensiones del área son:

$$R_{estruct} = S \cdot N_{int} \cdot d_{paso}$$

con $R_{estruct}$ radio de estructura de velocidad mínima que se puede medir, $S = \frac{D_{objeto}}{D_{imagen}}$ factor de escala, N_{int} número de píxeles por cada lado del área y d_{paso} paso entre píxeles.

Por lo que la resolución va a depender de el tamaño del lado de las áreas de interrogación $L_{int} = N_{int} \cdot d_{paso}$ y del factor de escala. A menor tamaño de ambos parámetros, mayor resolución.

Límite superior de velocidad

El límite superior de velocidad v_{max} está relacionado con el desplazamiento máximo d_{max} que se puede medir a partir de dos fotografías complementarias. Este desplazamiento solo se puede medir si es menor que el lado de las áreas de interrogación, por lo que las dimensiones de estas áreas también influyen en el límite superior de velocidad. Para captar bien este vector, es necesario que sea mucho menor que el lado del área, si no se perderían muchos de ellos ya sea por que se pierde el punto inicial o final de la partícula. Una conveniente limitación es la siguiente:

$$d_{max} = \frac{v_{max} \cdot t}{S} \leq \frac{1}{4} N_{int} \cdot d_{paso}$$

Teniendo en cuenta las limitaciones, una buena elección para una buena resolución, sería 32 píxeles de lado de área de interrogación.

Métodos de validación y filtros

Dado que el PIV capta todos los datos en un instante, las imágenes obtenidas y campos vectoriales están llenos de errores y vectores no válidos debidos al ruido, por lo que es necesario corregir posteriormente estos campos. Los métodos más útiles disponibles en el *FlowManager* son el de *Validación de rango de velocidad* y el *filtro medio móvil*.

-Validación de rango de velocidad

Este método se encarga de descartar todos los vectores que no caigan dentro de un rango determinado. Se puede aplicar a mapas vectoriales 2D, dando como resultado otro mapa 2D sin los vectores descartados.

Los vectores que satisfagan las siguientes ecuaciones se validan, los que no se descartan:

$$\overline{v_{\min}} \leq \overline{v} \leq \overline{v_{\max}} \quad , \text{con } \overline{v} = \sqrt{\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2}}$$

Componente x: $\overline{v_{x,\min}} \leq \overline{v_x} \leq \overline{v_{x,\max}}$

Componente y: $\overline{v_{y,\min}} \leq \overline{v_y} \leq \overline{v_{y,\max}}$

-Filtro Moving Average:

Este método se aplica sobre campos vectoriales 2D, sustituyendo cada vector con la media uniformemente pesada de los vectores de algún área de interrogación vecina con las dimensiones $m*n$, donde m y n son números impares de áreas de interrogación dispuestas de manera simétrica respecto al vector analizado. La media se calcula solo teniendo en cuenta las celdas que dispongan de vectores disponibles, con la siguiente ecuación:

$$\overline{V}(x, y) = \frac{1}{m * n} \sum_{i=x-\frac{n-1}{2}}^{x+\frac{n-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{n-1}{2}}^{y+\frac{n-1}{2}} \overline{V}(i, j)$$

-Enmascarar:

En el caso de las áreas de interrogación que no contienen ningún tipo de información válida, mediante este método podemos eliminarlas directamente.

2.3 Instrumentos que componen el sistema PIV

2.3.1 Sistema láser

El sistema láser del que se dispone en el laboratorio es el modelo *III-15 PIV*. Es un sistema con doble cabeza de laser compacta, que proporciona un haz de luz verde fuertemente estable. Está diseñado para trabajar con sistemas PIV, tanto con líquidos como con aire. Gracias a sus pequeñas dimensiones, trabajar con él es muy fácil y proporciona una gran flexibilidad a la hora de usarlo en el laboratorio.



Imagen 34. III-15 PIV.

Algunas de sus características técnicas expuestas en su ficha técnica son las siguientes:

- Frecuencia: 15 Hz
- Energía: 50 mJ (pérdidas energéticas del 10% debido a atenuadores opcionales)
- Estabilidad energética: $\pm 4\%$ (valor referido al 98% de los impulsos luminosos tras 30 min de precalentamiento)
- Diámetro de cara: 4 mm
- Duración del impulso: 3÷5 ns

Condiciones de funcionamiento:

- Temperatura: 10÷30 °C
- Humedad relativa: 20÷80 %
- Tensión: 95÷240 V, 50/60 Hz
- Potencia: 800 W (15Hz), 900 W (30 Hz)

2.3.2 Cámaras fotográficas

Su función es la de captar las distintas posiciones de las partículas en su paso por la cámara de ensayo. Para ello, idealmente captan sobre un fondo negro las reflexiones que se producen en las partículas de humo producidas por la luz láser.

Realmente la luz aptada por las cámaras es analizada por los sensores en estado sólido *charge coupled device* (CCD), que convierten la luz en carga eléctrica en forma de electrones, creando señales digitales instantáneas de las imágenes.

El sensor CCD también se conoce como píxel, y se compone de un grupo de sensores dispuestos de forma rectangular en forma de matriz. En ordenes de magnitud, un milímetro lineal equivale a 100 píxel, densidad 10^4 píxel/mm².

Un sensor CCD se constituye de un material semiconductor, normalmente silicio, dividido en dos partes, ánodo y cátodo. En la parte inferior del píxel se encuentra una parte de óxido aislante, y en la parte superior conductores metálicos que, al aplicarles

una diminuta tensión, generan un campo eléctrico con el cátodo. Como consecuencia, en el ánodo se crea otro campo eléctrico mínimo por falta de electrones.

Cuando un fotón llega a los materiales semiconductores, se produce el *efecto fotoeléctrico*, creando una pareja electrón-hueco. El hueco lo absorbe el cátodo y el electrón el ánodo, donde éstos se acumulan.

Finalmente, según la cantidad de electrones almacenados, se crea una tensión de cierto valor, que es leída por un chip y comparada con una escala de grises, generando así la imagen que buscamos.

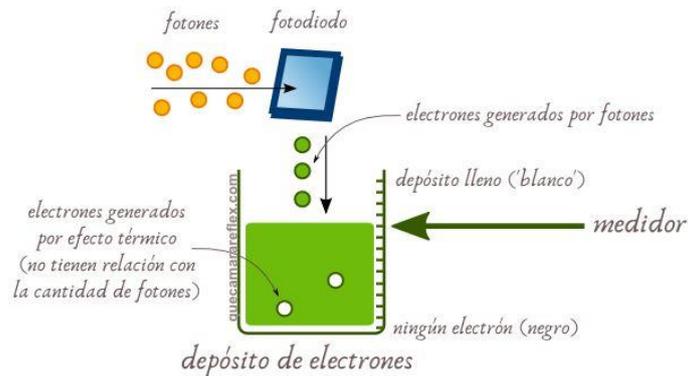


Imagen 35. Funcionamiento cámara fotográfica.

2.3.3 Generador de humo

Proporciona las partículas de aceite en forma de humo que serán el fluido de estudio en nuestro experimento. Se encarga por lo tanto de transformar el aceite líquido en forma de humo y expulsarlo hacia el tubo de ensayo. Un ventilador, colocado en la salida del tubo, aspira el humo logrando la circulación de éste por la cámara de ensayos.

La máquina de la que se dispone en el laboratorio es un modelo *Jem Techno-fog*.



Imagen 36. JemTechno-fog.

Se compone de las siguientes partes:

- Tanque líquido (mezcla compuesta de agua destilada, glicerol y glicoles)
- Caldera
- Bomba de membrana
- Termostato
- Control remoto arranque de la bomba

Las características expuestas en su ficha técnica son:

- Potencia: 750 W
- Tiempo de recalentamiento: 7 min
- Funcionamiento en continuo
- Flujo de humo saliente: 200 m³/min
- Control remoto
- Contador automático de tiempo
- Control del flujo saliente
- Capacidad del tanque: 1L

3. CARACTERIZACION DE LA GALERÍA DEL VIENTO DEL LABORATORIO DEL D.I.N.

Indice:

- 3.1 Laboratorio
 - 3.2 Medidas de velocidad
 - 3.3 Gráficas 2D relación $v(m/s) / f(Hz)$
 - 3.4 Desviación estándar
 - 3.5 Capa límite
 - 3.6 Perfiles 3D de las velocidades medias
 - 3.7 Caracterización mediante P.I.V.**
 - 3.8 Simulación con Fluent
-

3.1 Laboratorio

El laboratorio donde se han tomado las medidas se encuentra en Via Terracini 34 – 40131 BOLOGNA, en el departamento de D.I.E.N.C.A. y se llama Laboratorio del Lazzaretto Roberto Alessi. Dentro se encuentra el tubo de viento junto a todos sus componentes, que son los siguientes:

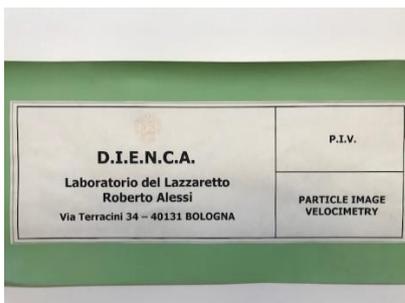


Imagen 37. Dirección.



Imagen 38. Túnel de viento Unibo (Cubierto).



Imagen 39. Túnel de viento Unibo (Destapado).



Imagen 40. Pulverizador.



Imagen 41. Pulverizador.



Imagen 42. Entrada Panal de Abejas y primera convergencia.

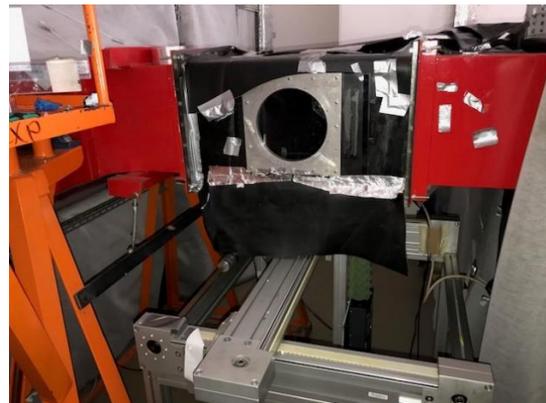


Imagen 43. Sección de pruebas.

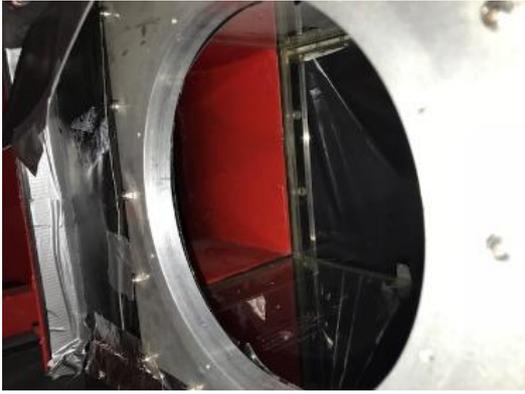


Imagen 44. Interior sección e pruebas.



Imagen 45. Tapadera de metal sección de pruebas.



Imagen 46. Cámaras fotográficas.



Imagen 47. Láser.



Imagen 48. Segunda convergencia (izquierda) y divergencia (derecha).

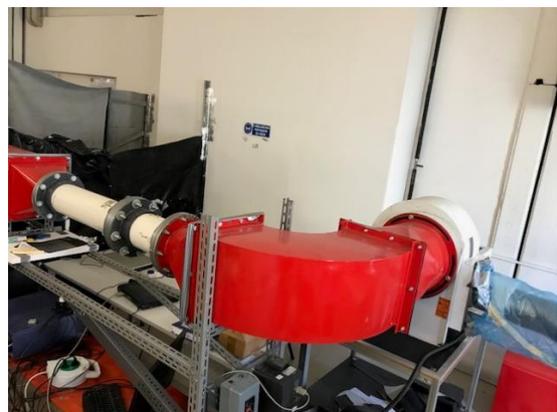


Imagen 49. Curva.



Imagen 50. Motor eléctrico ventilador.



Imagen 51. Ventilador.



Imagen 52. Tubo extracción de gases de escape.



Imagen 53. Inversor.

3.2 Medidas de Velocidad

El objetivo de esta caracterización es determinar para cada frecuencia de giro del ventilador, la velocidad del flujo de aire en el interior del tubo, concretamente en la sección de pruebas.

Para caracterizar el túnel de viento del D.I.N. se ha utilizado el tubo de Pitot conectado a un anemómetro.



Imagen 54. Tubo di Pitot (Gris). Anemómetro (Azul).

Para ello, lo primero es unir el tubo al anemómetro, conectando el orificio positivo al lado corto paralelo del tubo y el negativo al lado largo perpendicular al tubo. Una vez listo el instrumento de medida, se introduce en la sección de prueba a través de uno de los orificios de la tapa metálica que la cierra. El orificio elegido será en función del punto en el que queramos calcular la velocidad del viento. Los demás orificios deben permanecer tapados, al igual que el utilizado para introducir el tubo, que se recubrirá con plastilina para así también lograr que el tubo permanezca fijo en la posición deseada. La posición correcta del tubo para que las medidas sean válidas siempre va a ser la misma, el orificio de entrada del viento perpendicular éste, y todo el tubo paralelo a la dirección de incidencia del viento.

La disposición y manera de trabajo es la siguiente:



Imagen 55. *Medición de Velocidades.*

Como observamos en la imagen, nos beneficiamos de una base de corcho de altura regulable para introducir el tubo en los distintos puntos de la galería. Las medidas se han tomado de la siguiente manera:

-> Por cada agujero A, B, C y D de la vertical de la placa de metal, se han tomado en 4 posiciones horizontales (profundidad) distintas. En:

$x_1 = 3 \text{ cm}$

$x_2 = 9 \text{ cm}$

$x_3 = 15 \text{ cm}$

$x_4 = 21 \text{ cm}$

$x_5 = 27 \text{ cm}$

-> En cada uno de estos puntos se han tomado medidas a las distintas frecuencias (Hz):

$f_1 = 5 \text{ Hz}$

$f_2 = 10 \text{ Hz}$

$f_3 = 15 \text{ Hz}$

$f_4 = 20 \text{ Hz}$

$f_5 = 25 \text{ Hz}$

$f_6 = 30 \text{ Hz}$

$f_7 = 35 \text{ Hz}$

$f_8 = 40 \text{ Hz}$

-> Por cada posición, de cada agujero y de cada frecuencia se han hecho 3 medidas distintas.

Se han tomado todas estas medidas con la intención de lograr una mayor fiabilidad en las medias de los resultados y calcular una correcta desviación típica.

Las medidas tomadas son las siguientes:

PRUEBA 1/AGUJERO A	v (m/s)				
f(Hz)	x1	x2	x3	x4	x5
5	0,35	0,31	0,34	0,33	0,32
10	0,7	0,68	0,69	0,7	0,69
15	1,05	1,03	1,04	1,03	1,03
20	1,38	1,36	1,36	1,36	1,35
25	1,7	1,69	1,7	1,68	1,66
30	2,03	2,02	2,01	2	1,99
35	2,36	2,33	2,34	2,32	2,31
40	2,67	2,65	2,66	2,63	2,62

Tabla 1. Primeras medidas agujero A.

PRUEBA 2/AGUJERO A	v (m/s)				
f(Hz)	x1	x2	x3	x4	x5
5	0,36	0,36	0,35	0,36	0,36
10	0,72	0,7	0,71	0,71	0,71
15	1,06	1,05	1,04	1,05	1,05
20	1,4	1,38	1,38	1,38	1,38
25	1,71	1,71	1,71	1,71	1,69
30	2,05	2,04	2,03	2,03	2
35	2,37	2,36	2,35	2,35	2,32
40	2,69	2,68	2,68	2,67	2,64

Tabla 2. Segundas medidas agujero A.

PRUEBA 3/AGUJERO A	v (m/s)				
	f(Hz)	x1	x2	x3	x4
5	0,36	0,36	0,39	0,39	0,37
10	0,72	0,71	0,71	0,71	0,71
15	1,06	1,05	1,06	1,05	1,05
20	1,39	1,38	1,38	1,38	1,37
25	1,72	1,71	1,72	1,71	1,68
30	2,04	2,03	2,03	2,02	2
35	2,36	2,36	2,35	2,35	2,32
40	2,68	2,68	2,68	2,67	2,63

Tabla 3. Terceras medidas agujero A.

PRUEBA 1/AGUJERO B	v (m/s)				
	f(Hz)	x1	x2	x3	x4
5	0,36	0,36	0,35	0,37	0,36
10	0,71	0,7	0,71	0,71	0,71
15	1,06	1,05	1,04	1,04	1,04
20	1,39	1,37	1,37	1,37	1,37
25	1,72	1,7	1,7	1,7	1,69
30	2,04	2,03	2,03	2,02	2,01
35	2,36	2,36	2,35	2,34	2,33
40	2,68	2,67	2,67	2,66	2,65

Tabla 4. Primeras medidas agujero B.

PRUEBA 2/AGUJERO B	v (m/s)				
	f(Hz)	x1	x2	x3	x4
5	0,38	0,34	0,37	0,37	0,37
10	0,72	0,7	0,71	0,71	0,71
15	1,06	1,05	1,05	1,05	1,04
20	1,39	1,38	1,38	1,38	1,37
25	1,71	1,71	1,71	1,7	1,7
30	2,04	2,03	2,04	2,03	2,01
35	2,37	2,36	2,36	2,35	2,34
40	2,69	2,68	2,68	2,67	2,65

Tabla 5. Segundas medidas agujero B.

PRUEBA 3/AGUJERO B	v (m/s)				
	x1	x2	x3	x4	x5
f(Hz)					
5	0,35	0,36	0,37	0,35	0,36
10	0,71	0,72	0,71	0,7	0,71
15	1,05	1,06	1,05	1,04	1,04
20	1,38	1,38	1,38	1,37	1,37
25	1,7	1,71	1,7	1,7	1,7
30	2,04	2,03	2,03	2,03	2,02
35	2,36	2,36	2,36	2,34	2,33
40	2,69	2,68	2,67	2,67	2,66

Tabla 6. Terceras medidas agujero B.

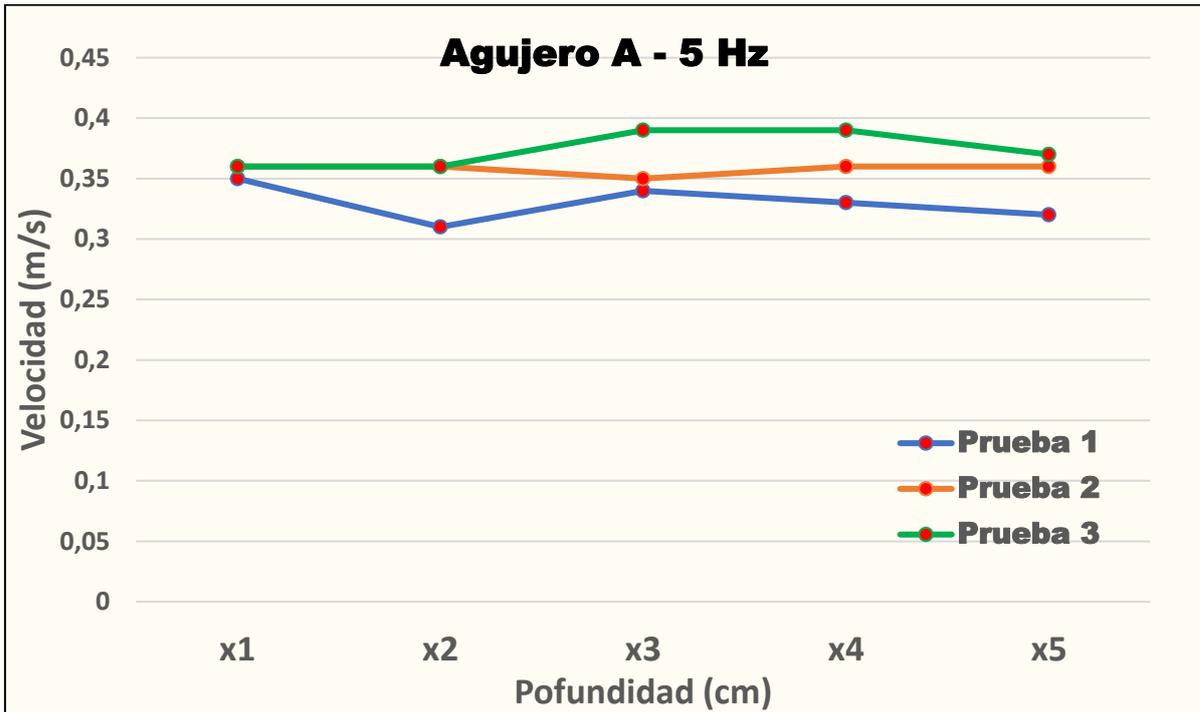
Estas son las medidas que pude llegar a tomar antes de la ruptura del ventilador. Cierto es que me faltan por tomar todas las de los agujeros C y D, pero observada la poca variación entre los datos ya tomados en los A y B, se intuye que en los restantes las medidas van a ser muy similares.

3.3 Gráficas 2D relación $v(m/s)$ / $f(Hz)$

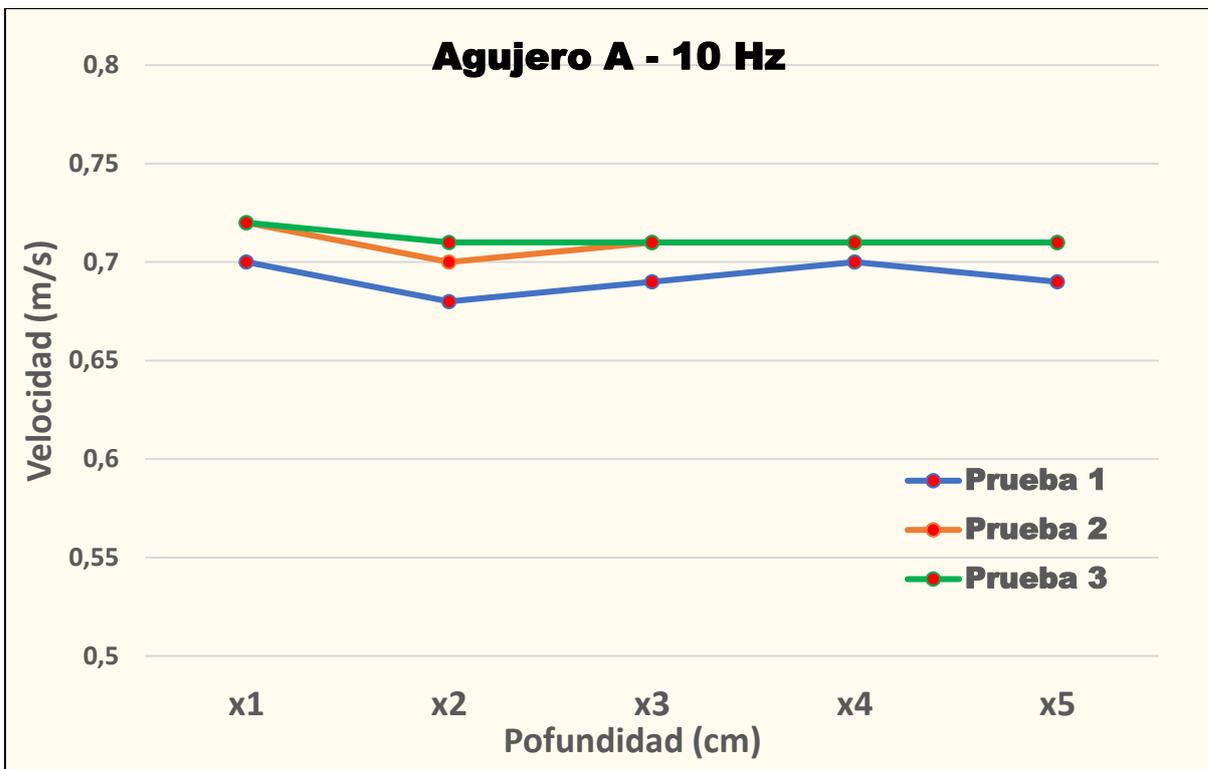
A partir de los datos expuestos en las tablas, se han podido sacar las gráficas que hay a continuación, donde el eje de abscisas es el de profundidad para cada agujero, y el de ordenadas la velocidad calculada con el Pitot. Cada una de las gráficas refleja las 3 pruebas de cada posición del tubo a cierta frecuencia f_i , es decir, para cada agujero hay 8 gráficas de distintas frecuencias. La obtención de las gráficas se ha hecho posible gracias al software de EXCEL.

Las gráficas que hemos obtenido son las de los agujeros A y B, ya que son los únicos de los que disponemos datos.

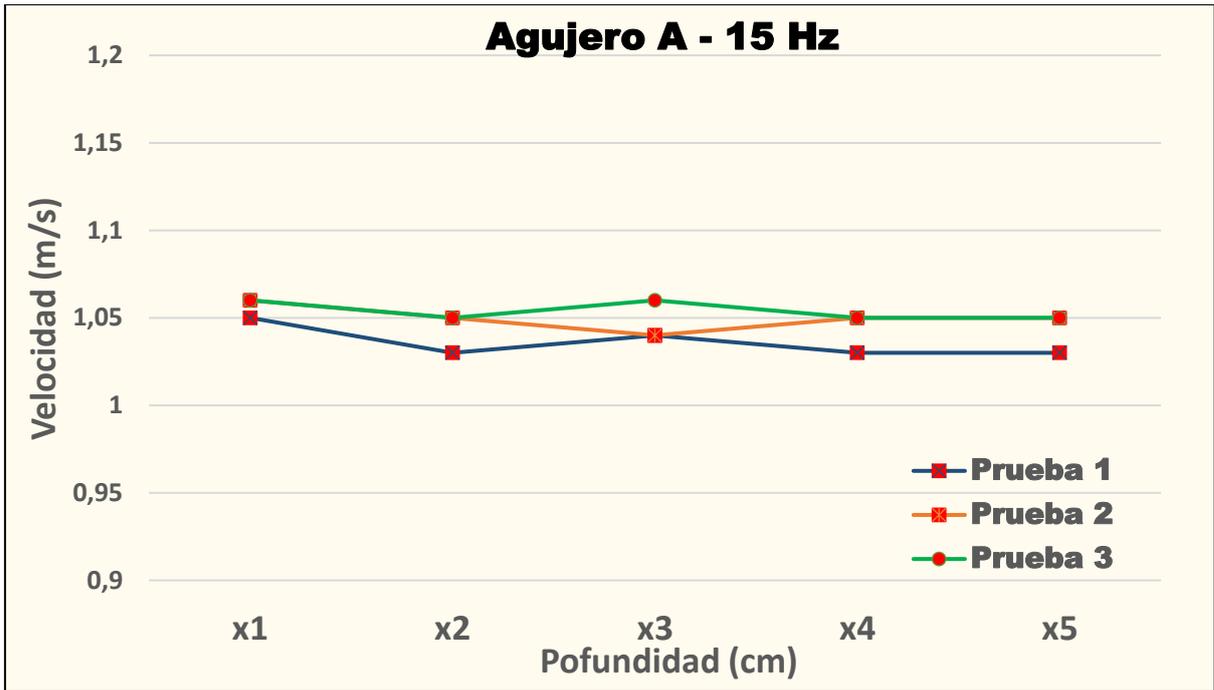
AGUJERO A



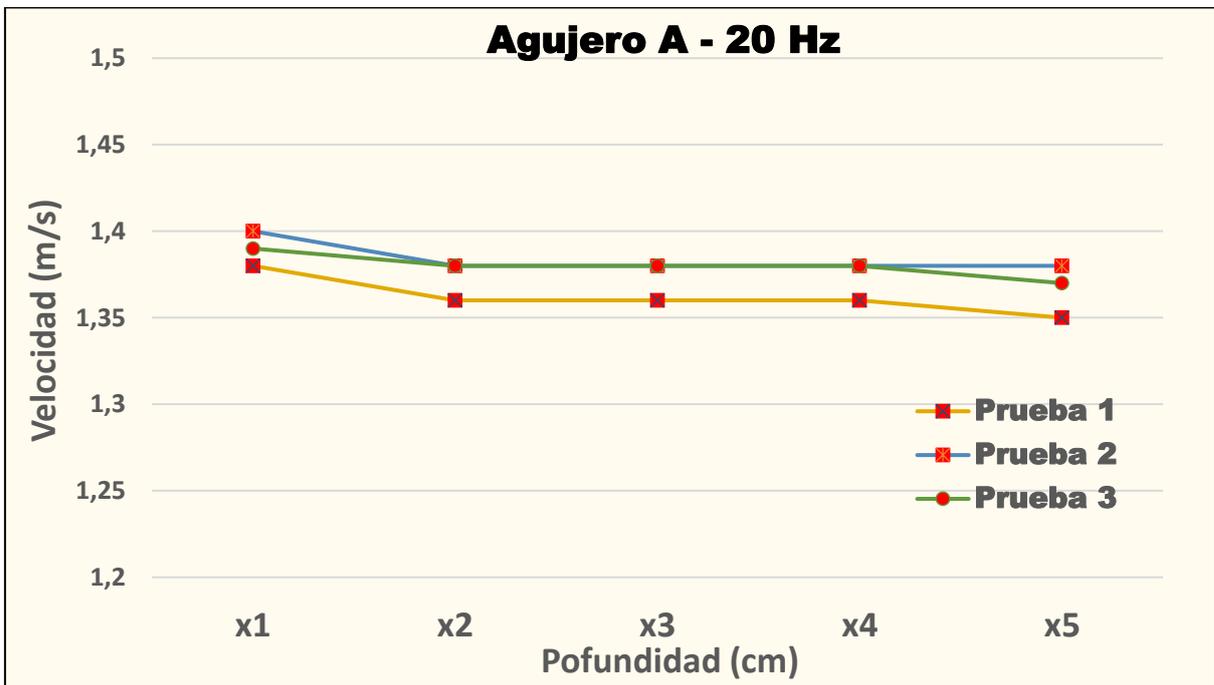
Gráfica 1. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero A, a 5 Hz.



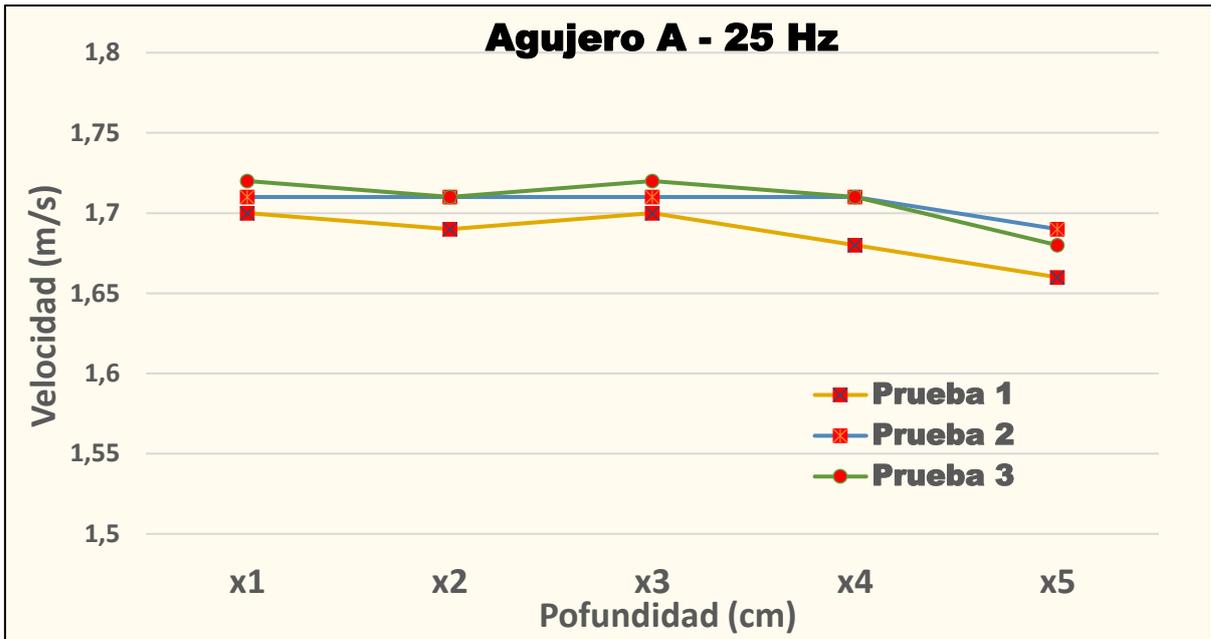
Gráfica 2. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero A, a 10 Hz.



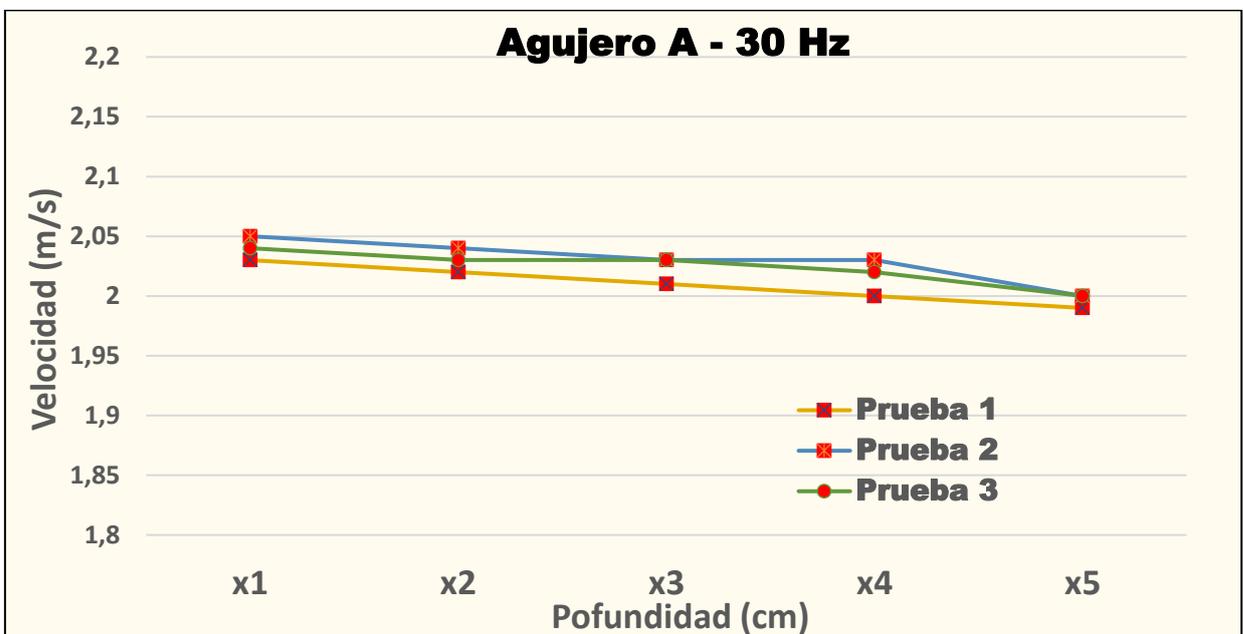
Gráfica 3. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero A, a 15 Hz.



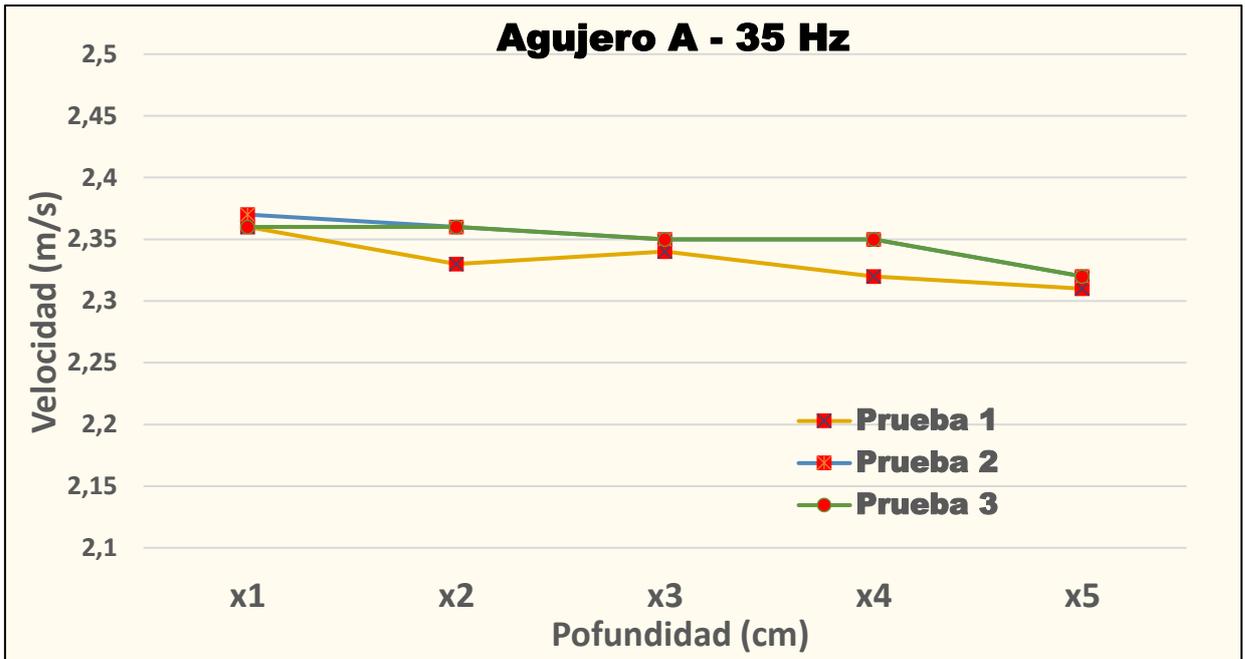
Gráfica 4. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero A, a 20 Hz.



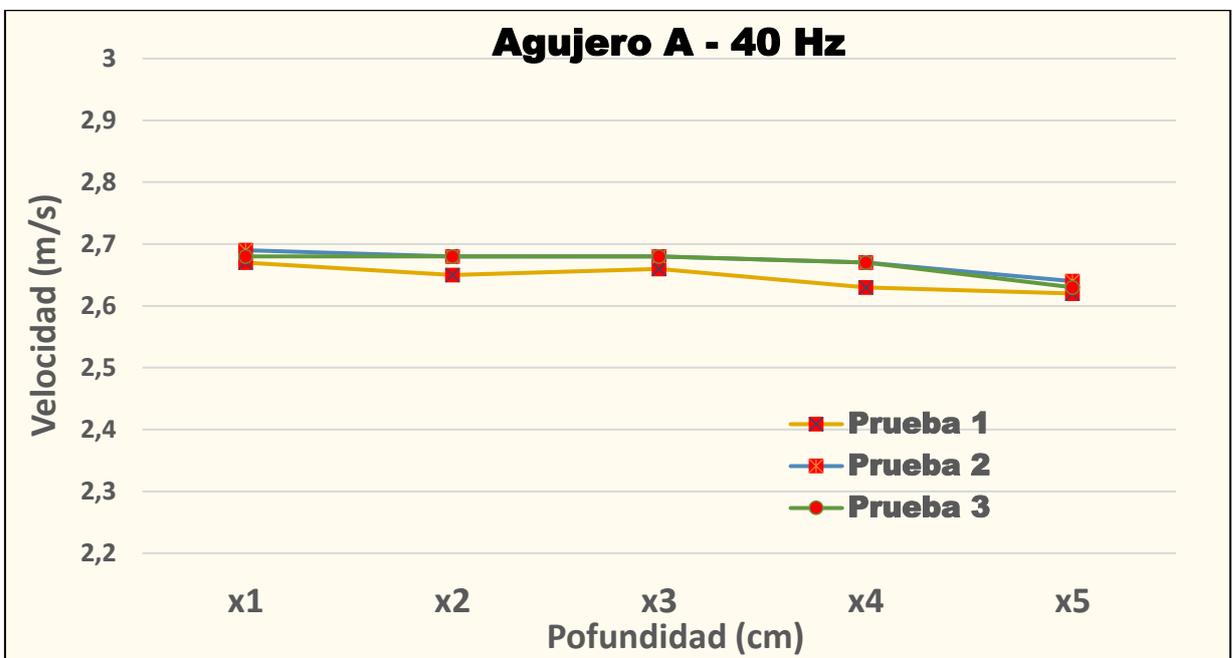
Gráfica 5. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero A, a 25 Hz.



Gráfica 6. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero A, a 30 Hz.

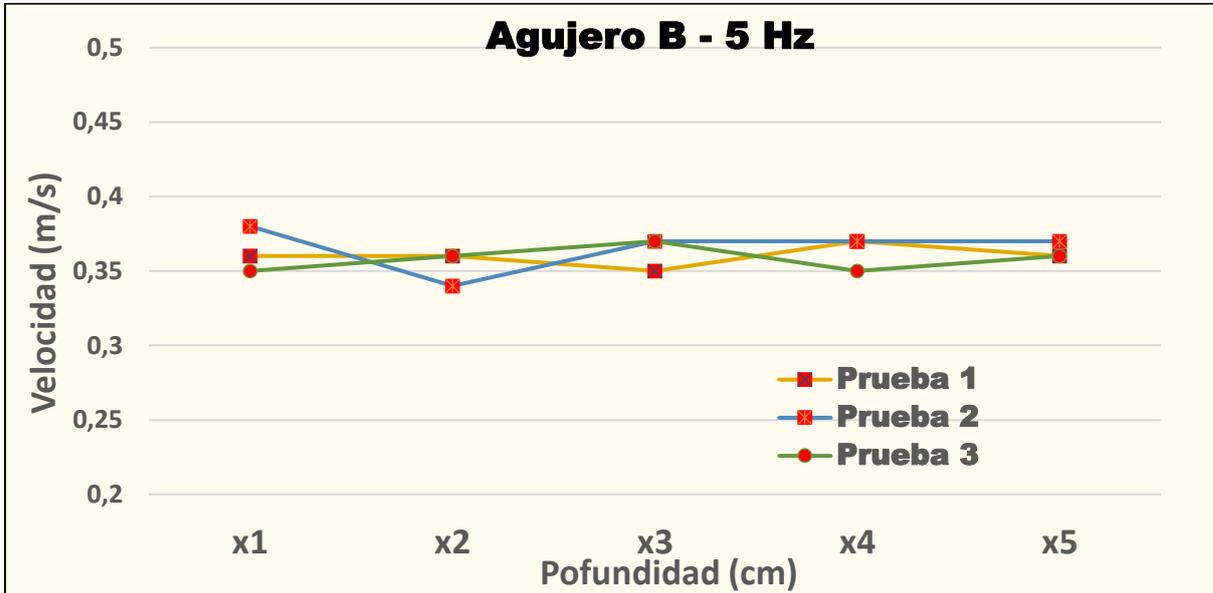


Gráfica 7. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero A, a 35 Hz.

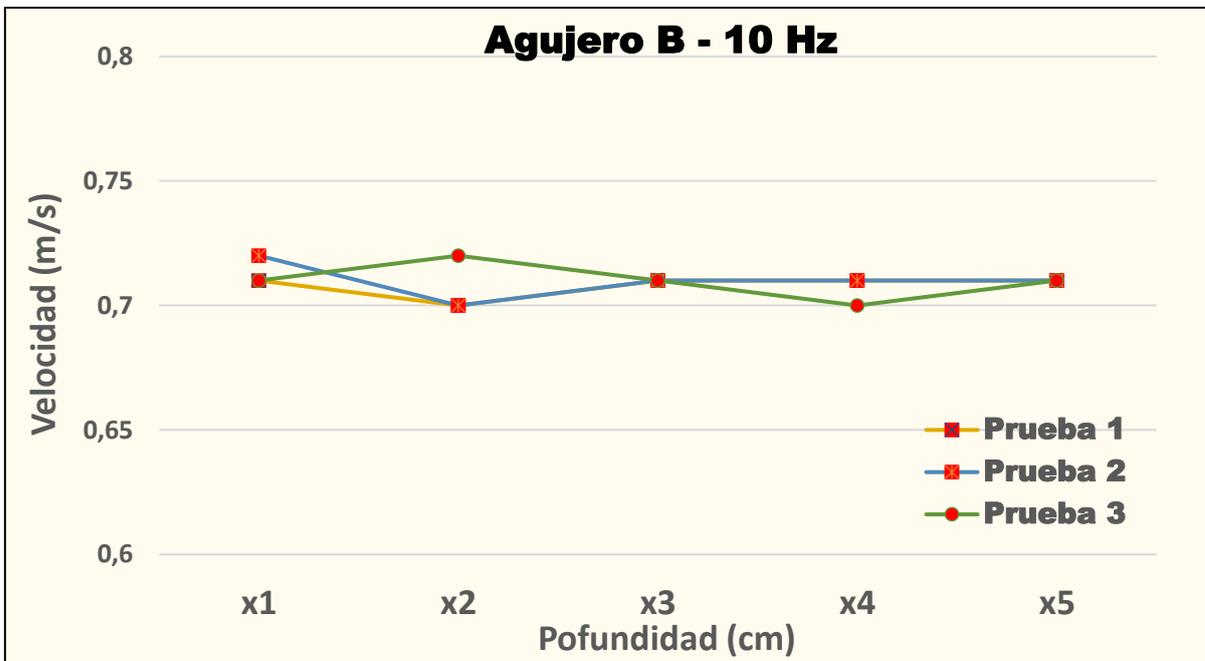


Gráfica 8. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero A, a 40 Hz.

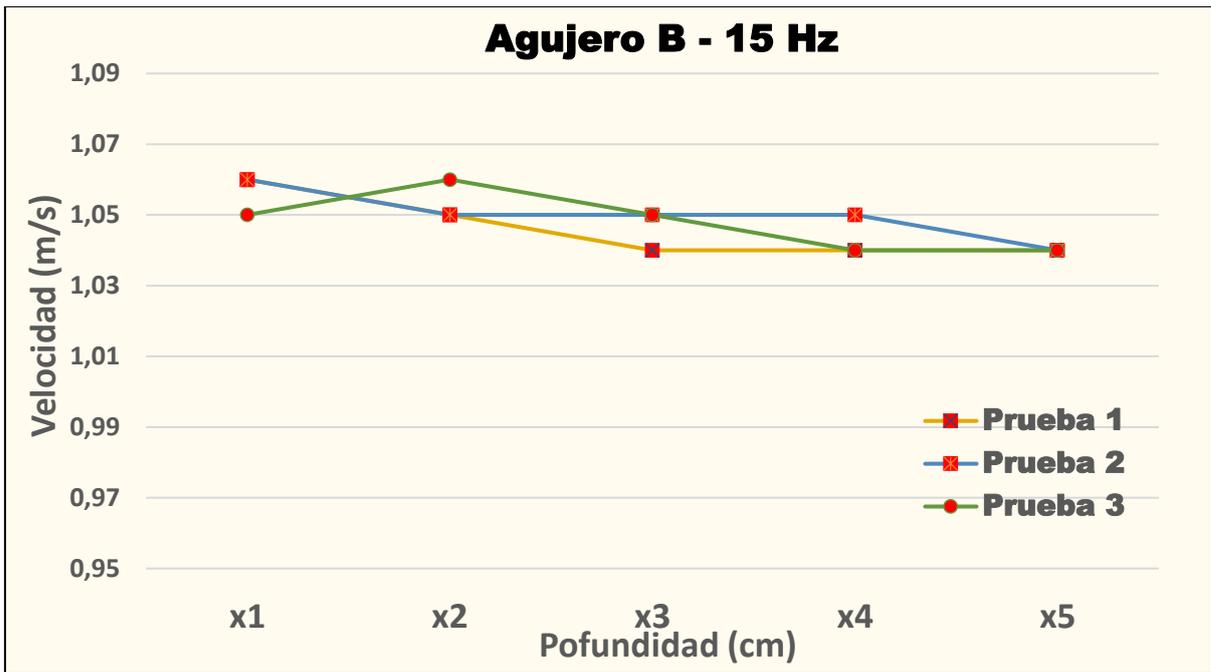
AGUJERO B



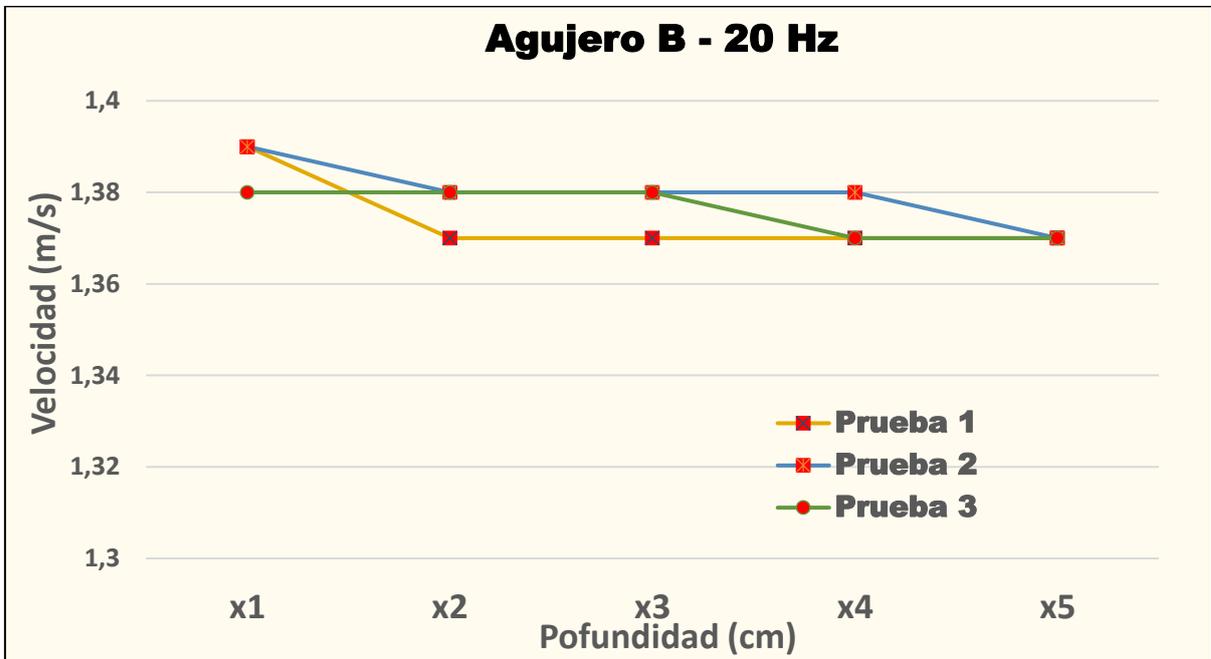
Gráfica 9. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero B, a 5 Hz.



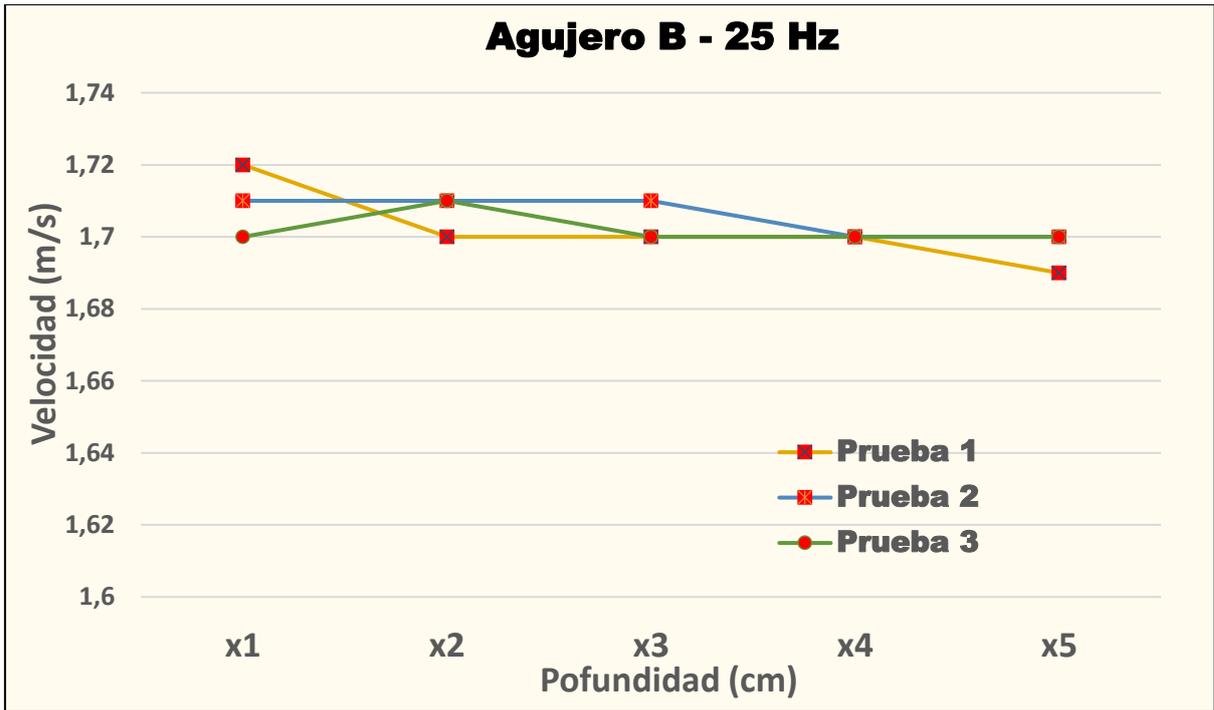
Gráfica 10. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero B, a 10 Hz.



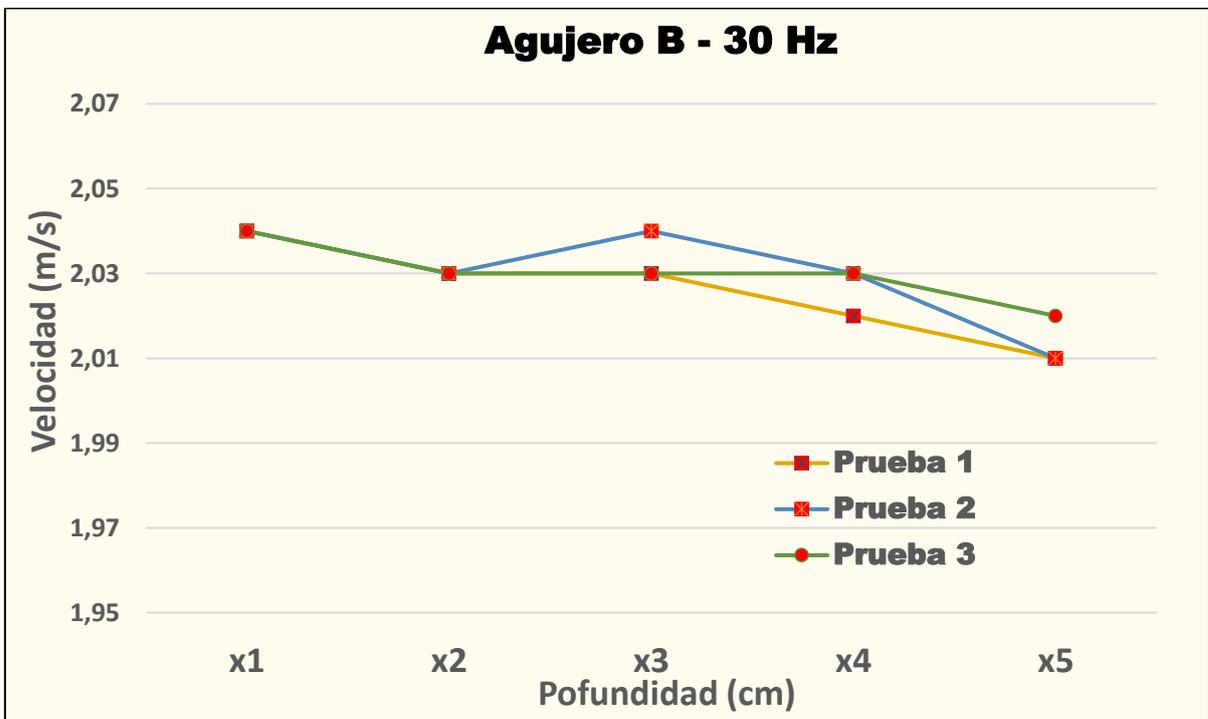
Gráfica 11.. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero B, a 15 Hz.



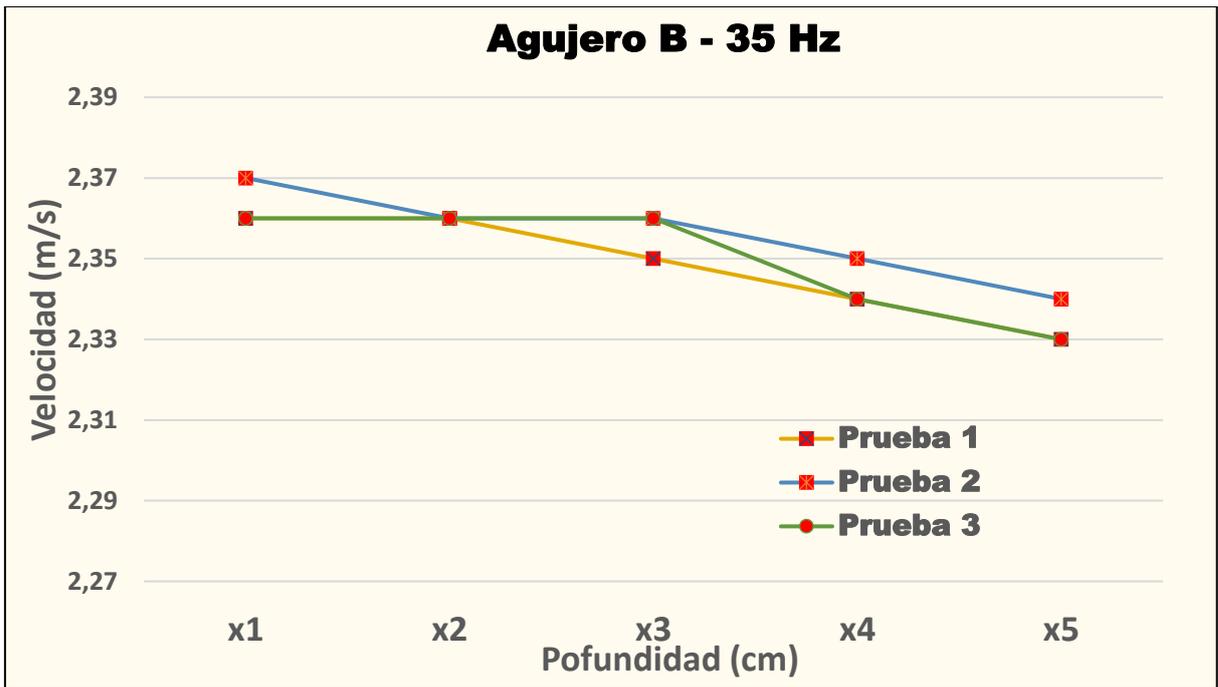
Gráfica 12. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero B, a 20 Hz.



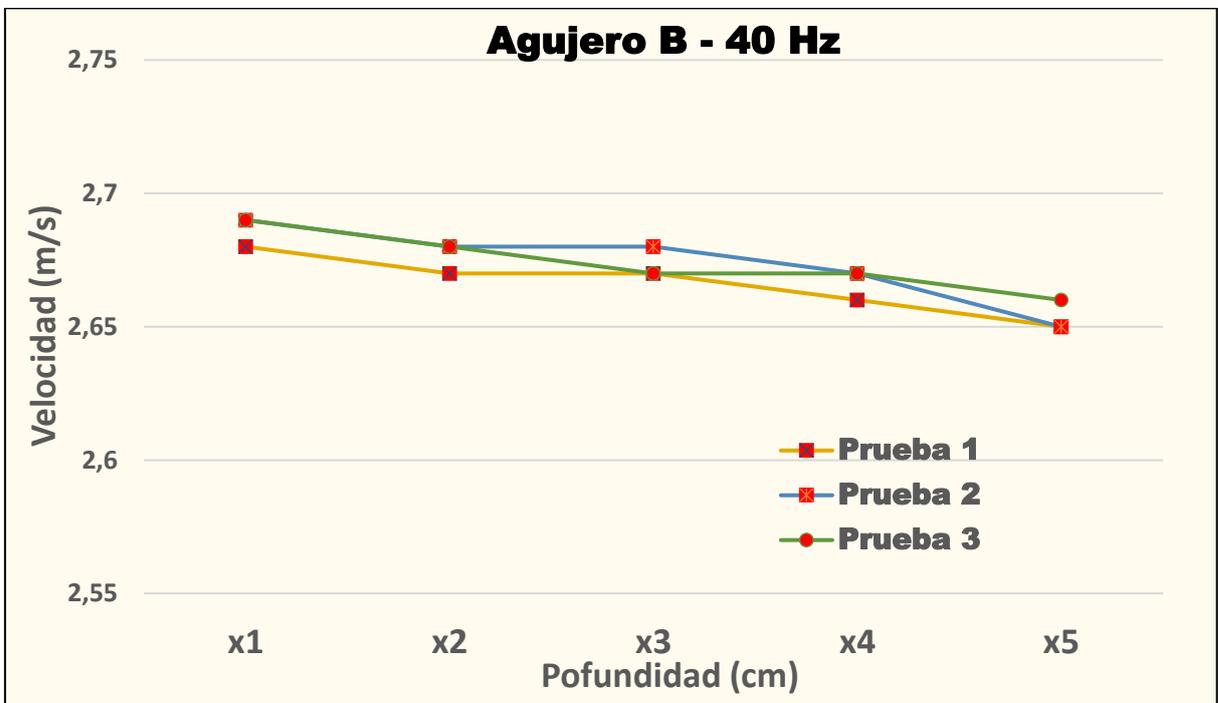
Gráfica 13. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero B, a 25 Hz.



Gráfica 14. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero B, a 30 Hz.



Gráfica 15. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero B, a 35 Hz.



Gráfica 16. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero B, a 40 Hz.

3.4 Desviación estándar

La desviación estándar (σ) indica la dispersión de los datos respecto a la media aritmética. A mayor desviación, mayor dispersión de datos. La definición matemática en nuestro experimento es la siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^5 (v_{ij} - \bar{v}_i)^2}{N-1}} \quad \text{con} \quad v_{ij} = v(X_i)_j, \quad \bar{v}_i = \sum_{j=1}^5 \frac{v_{ij}}{5}$$

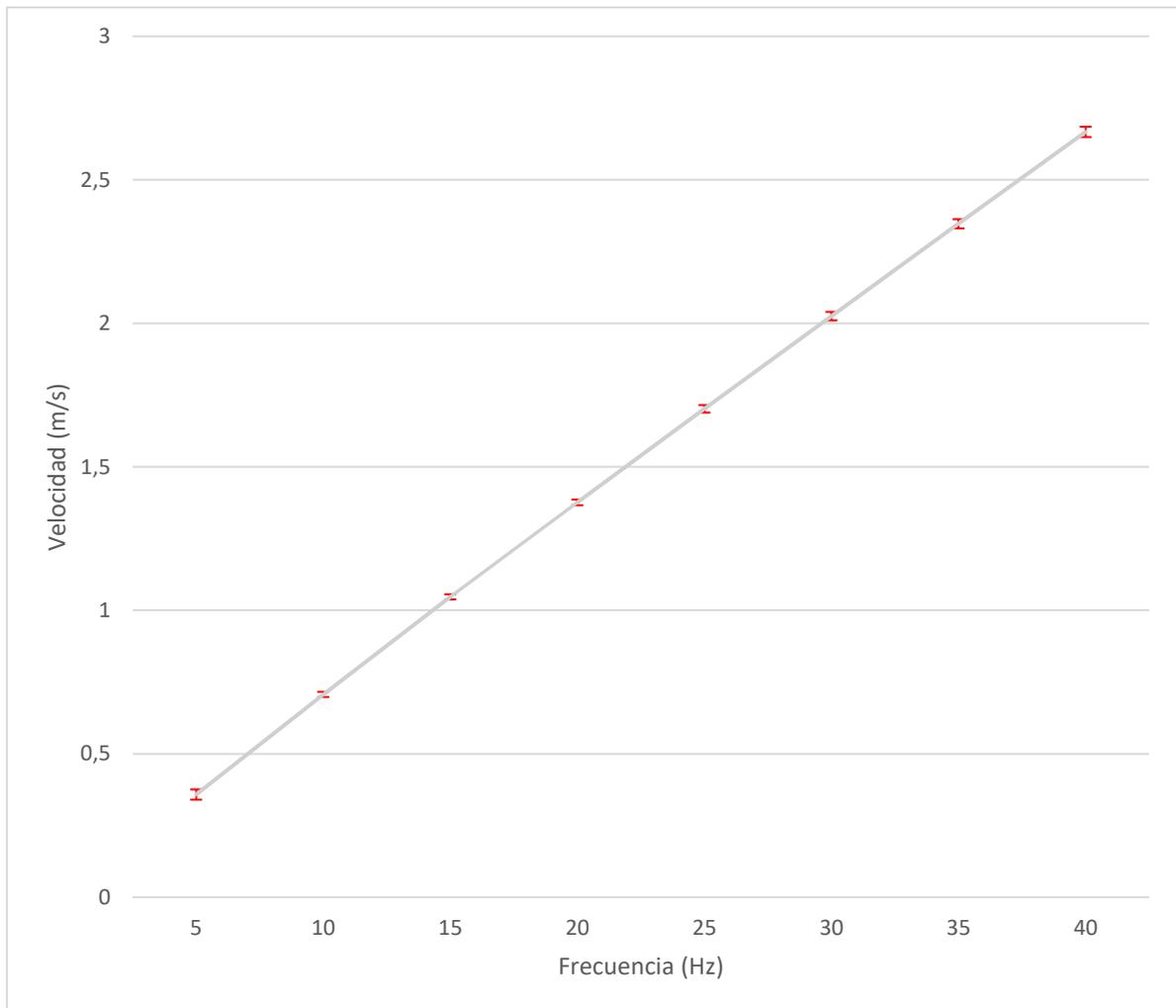
Donde j se refiere a la medida. La desviación estándar ha sido calculada para cada frecuencia, teniendo en cuenta todas las medidas tomadas a distintas profundidades y en los dos orificios A y B.

Finalmente se ha calculado la siguiente tabla que indica la velocidad media del flujo para cada frecuencia con su correspondiente desviación estándar, para los orificios A y B conjuntamente:

Frecuencia (Hz)	Velocidad Media (m/s)	Desviación Estándar (m/s)
5	0,358	0,018
10	0,707	0,009
15	1,047	0,009
20	1,376	0,010
25	1,702	0,013
30	2,025	0,015
35	2,347	0,016
40	2,667	0,018

Tabla 7 . Velocidades medias y desviaciones estándar para cada frecuencia.

Gracias a estos resultados se pudo realizar la curva de calibración del tubo de viento, con la frecuencia en el eje de abscisas y la velocidad media en el eje de ordenadas. En rojo se representa la desviación estándar para cada una de las velocidades, que como se puede observar es mínima, aunque algo mayor para las frecuencias mínima y máxima.

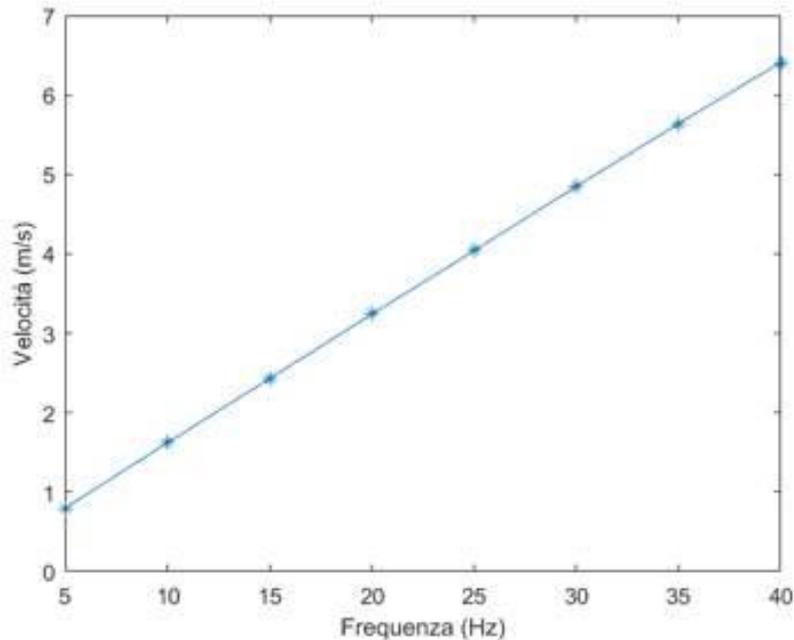


Gráfica 17 . Curva de calibración.

Las medidas tomadas para el cilindro y el coche solar que se mostrarán más adelante se han tomado con las velocidades siguientes, que corresponden al mismo proceso de experimentación, con el mismo tubo de viento, pero sin el tubo final extractor de los gases de escape.

Frecuencia [Hz]	Velocità media [m/s]	Deviazione standard [m/s]
5 Hz	0,797	0,014
10 Hz	1,617	0,007
15 Hz	2,432	0,005
20 Hz	3,243	0,008
25 Hz	4,045	0,008
30 Hz	4,847	0,008
35 Hz	5,637	0,012
40 Hz	6,409	0,013

Tabla 8. Velocidades medias y desviaciones estándar para cada frecuencia (Morena Falcone).



Gráfica 18. Curva de calibración (Morena).

Comparando las velocidades obtenidas, tanto con el tubo extractor de gases de escape como sin él, se puede observar que, para todos los valores de frecuencia, sin el tubo se obtuvieron velocidades más altas. Esto se debe a que el aire se libera directamente al ambiente tras pasar por el ventilador, sin ningún tipo de redireccionamiento.

En ambos casos se puede observar una proporcionalidad lineal entre la velocidad y la frecuencia. Con tubo cada 5 Hz aumenta la velocidad entre 0,35 m/s para los valores más bajos, y 0,32 m/s para los más altos. En cambio, para el caso sin tubo, cada 5 Hz de frecuencia, la velocidad aumenta en 0,8 m/s aproximadamente.

3.5 Capa límite

La capa límite es una creación del ser humano para explicar de una manera más sencilla el comportamiento de los fluidos alrededor de un cuerpo.

Cuando un cuerpo circula a través de un fluido, en el punto de contacto entre ambos, la velocidad del aire es nula respecto al cuerpo, debido a los efectos de la viscosidad. Sin embargo, a partir de cierta separación entre ambos, el fluido no se ve afectado por la presencia del cuerpo, viscosidad despreciable. Entre ambos puntos, el aire se ve influenciado de otra manera, sufriendo una transición gradual entre ambos comportamientos, aumentando la velocidad de éste desde cero a V .

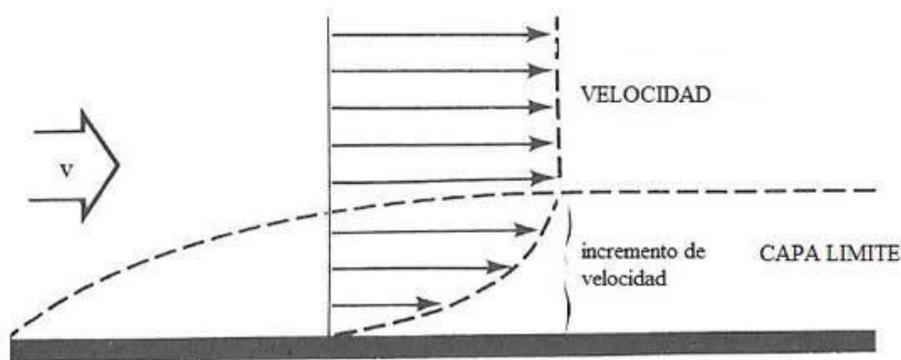


Imagen 56. Definición de capa límite.

La capa límite puede ser de dos tipos: laminar, donde el fluido sigue las trayectorias laminares sobre el contorno del fluido, y turbulenta, (ligeramente más gruesa), donde el aire se mueve en todas direcciones disipando mayor energía, provocando así una fricción mayor. La otra gran diferencia que va a influenciar a la hora de preferir un tipo de capa u otra para el diseño de nuestros cuerpos y donde establecer el punto de transición, es que la capa laminar va perdiendo velocidad a lo largo de su recorrido, llegando incluso a retroceder.

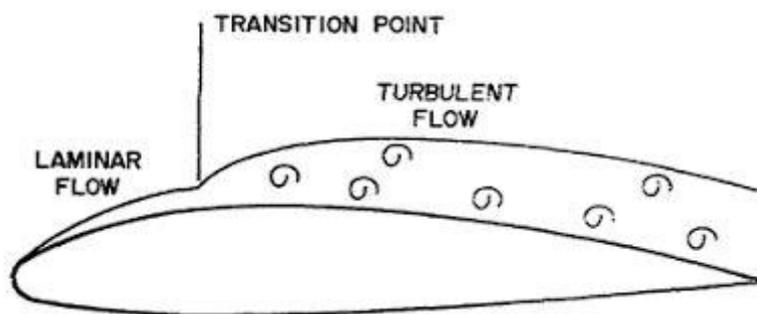


Imagen 57 . Capa límite laminar (derecha), turbulenta (izquierda) y punto de transición.

Las medidas necesarias para caracterizar la capa límite se han tomado sin el tubo extractor, logrando así un mayor espesor e identificación de ésta.

Estas se han obtenido con el tubo de Pitot a distintas profundidades, siempre cercanas a ambas paredes de la cámara de ensayo:

$X_6 = 0,2 \text{ cm}$

$X_7 = 0,5 \text{ cm}$

$X_8 = 0,7 \text{ cm}$

$X_9 = 29,3 \text{ cm}$

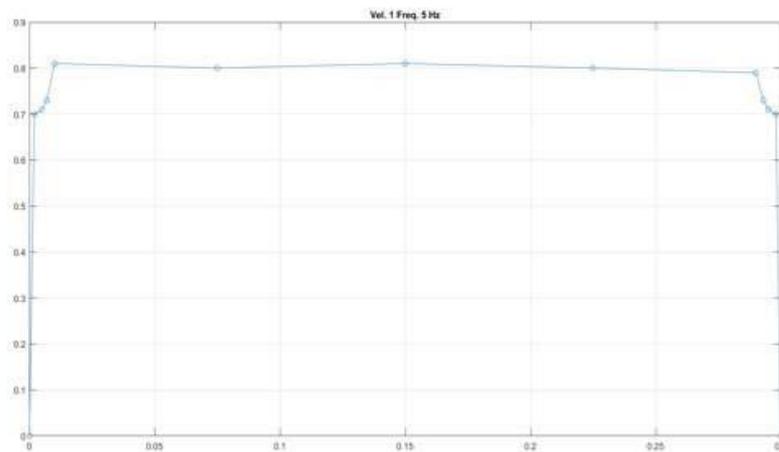
$X_{10} = 29,5 \text{ cm}$

$X_{11} = 29,8 \text{ cm}$

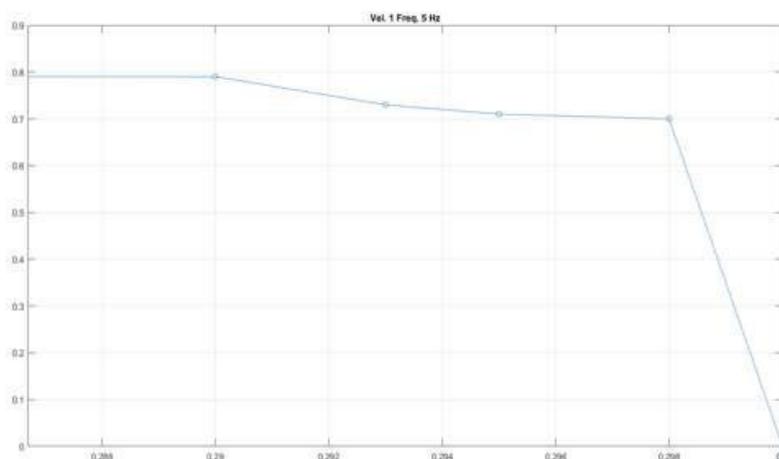
Para cada una de las frecuencias utilizadas anteriormente.

Las tres primeras profundidades son para caracterizar la pared de la placa de metal por la que se accede a la cámara, y las tres últimas para el lado opuesto.

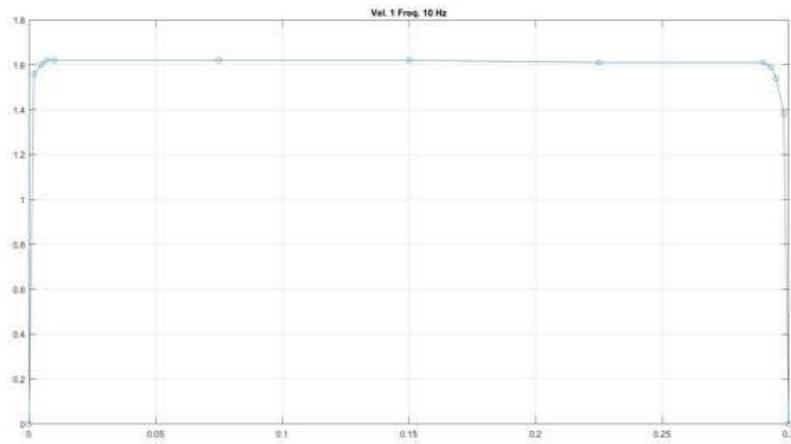
Los resultados obtenidos fueron tomados en el agujero C, y se obtuvieron las gráficas del perfil de velocidades y de las zonas aumentadas donde se puede observar la capa límite, en las esquinas de las paredes.



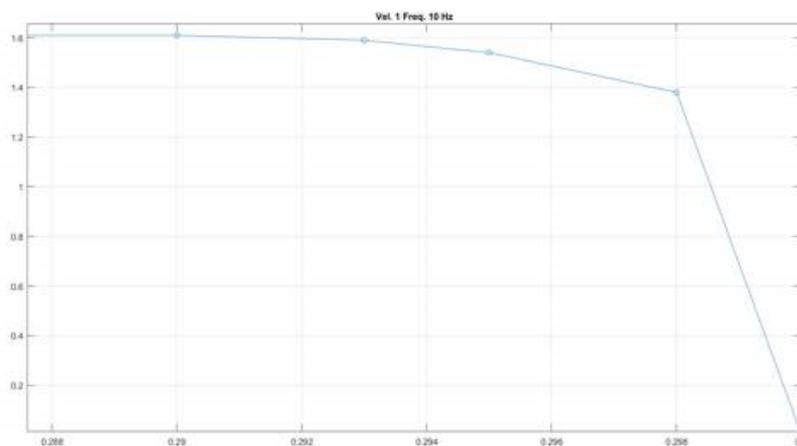
Gráfica 19 . Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 5 Hz.



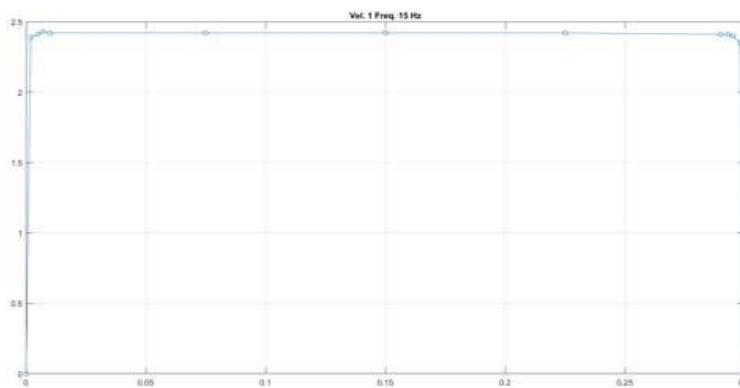
Gráfica 20 .Ampliación de la zona donde se manifiesta la capa límite, a 5 Hz.



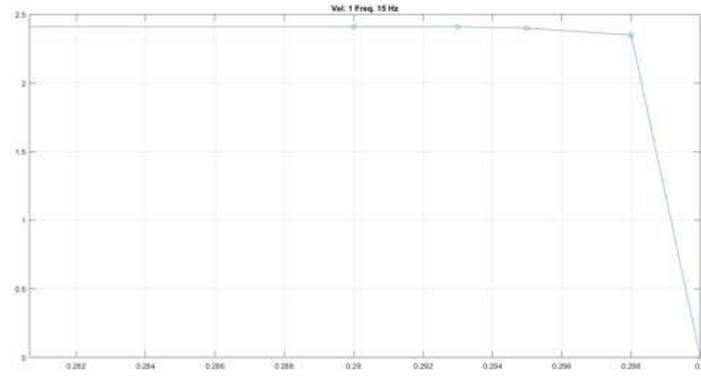
Gráfica 21 . Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 10 Hz.



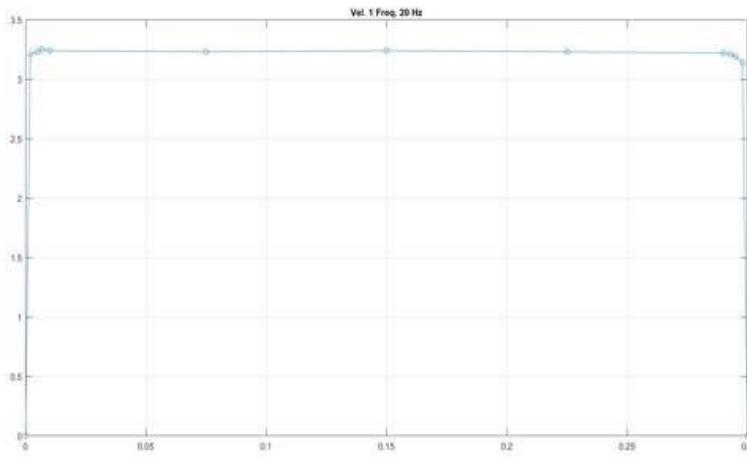
Gráfica 22 .Ampliación de la zona donde se manifiesta la capa límite, a 10 Hz.



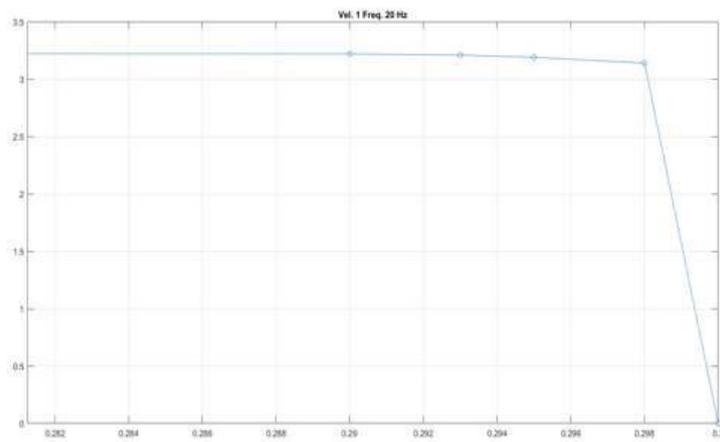
Gráfica 23 . Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 15 Hz.



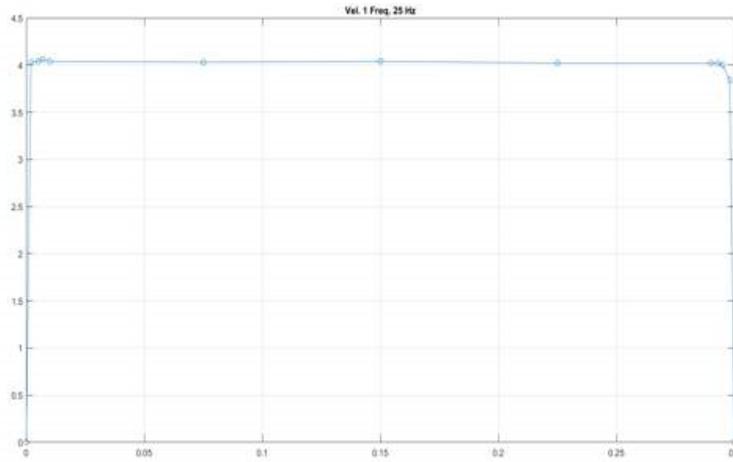
Gráfica 24 .Ampliación de la zona donde se manifiesta la capa límite, a 15 Hz.



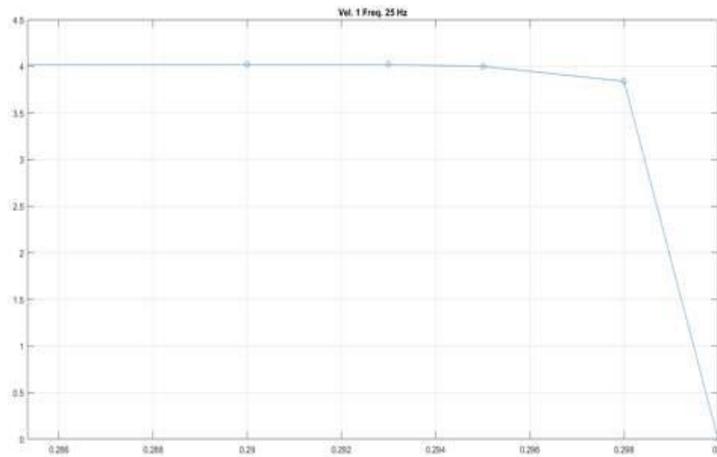
Gráfica 25 . Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 20 Hz.



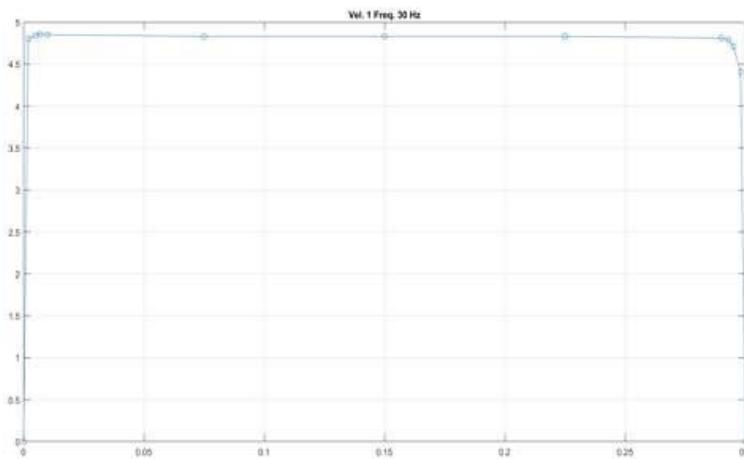
Gráfica 26 .Ampliación de la zona donde se manifiesta la capa límite, a 20 Hz.



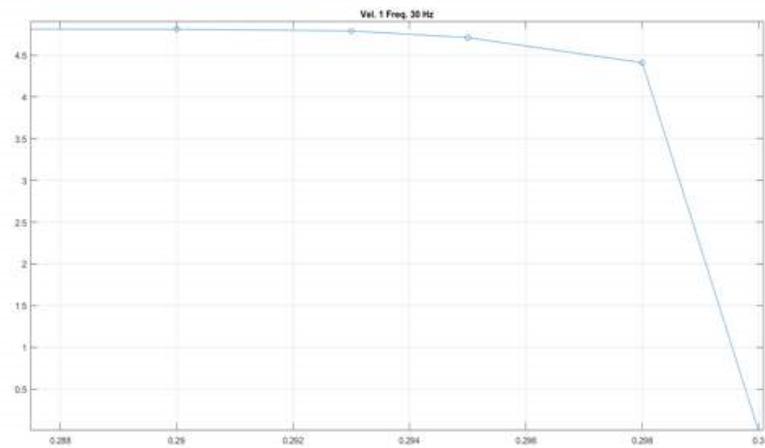
Gráfica 27 . Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 25 Hz.



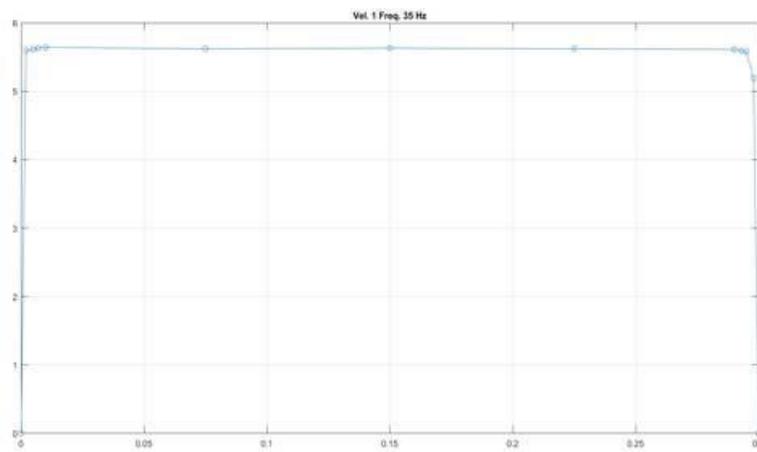
Gráfica 28 .Ampliación de la zona donde se manifiesta la capa límite, a 25 Hz.



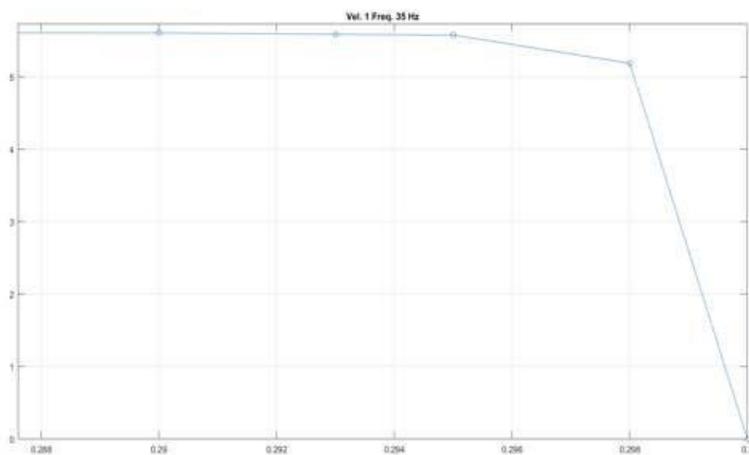
Gráfica 29 . Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 30 Hz.



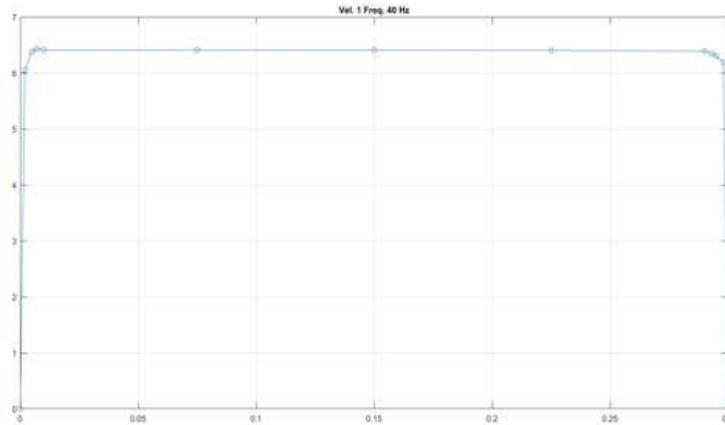
Gráfica 30 .Ampliación de la zona donde se manifiesta la capa límite, a 30 Hz.



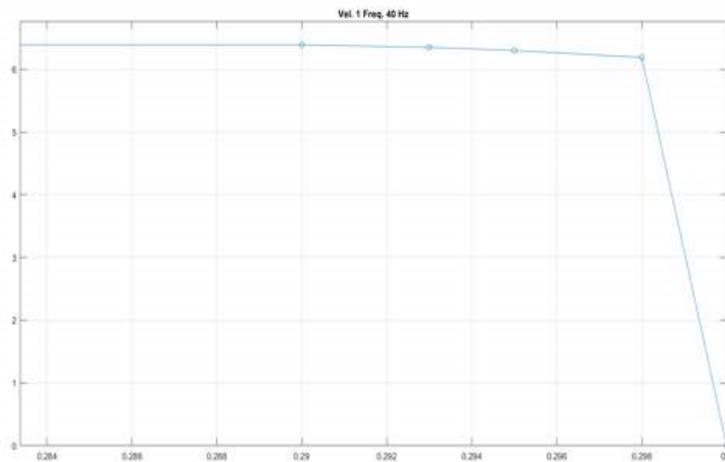
Gráfica 31 . Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 35 Hz.



Gráfica 32 .Ampliación de la zona donde se manifiesta la capa límite, a 35 Hz.



Gráfica 33. Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 40 Hz.



Gráfica 34. Ampliación de la zona donde se manifiesta la capa límite, a 40 Hz.

Observando las gráficas se puede definir el espesor (δ) de la capa límite para cada una de las frecuencias.

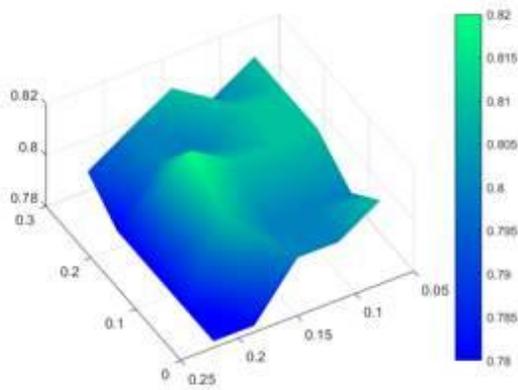
Freq. (Hz)	δ (mm)
5	10
10	7
15	5
20	7
25	7
30	7
35	5
40	7

Tabla 9 . Espesores capa límite.

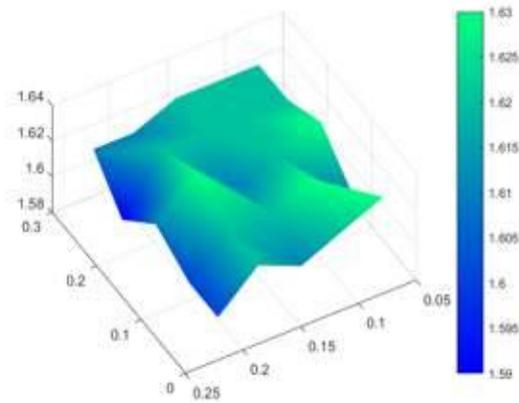
3.6 Perfiles 3D de las velocidades medias

Los perfiles 3D se han obtenido a partir de las velocidades medias calculadas para cada una de las frecuencias. Las velocidades utilizadas han sido las obtenidas cuando no había tubo extractor de gases de escape.

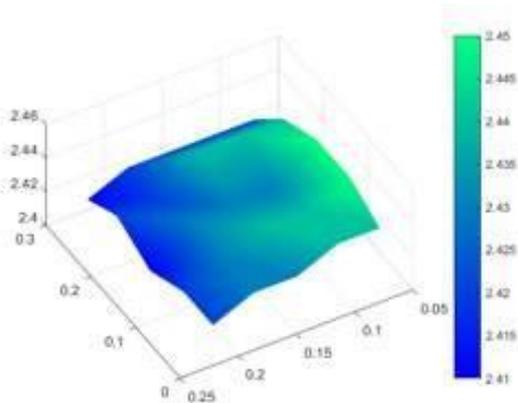
Cada uno de los perfiles están definidos por una de las frecuencias en concreto, para todo punto de profundidad x_i , y para cada una de las alturas en función del orificio por el que se introduzca el tubo de Pitot.



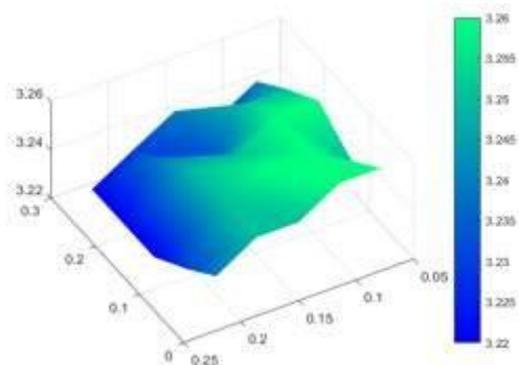
Gráfica 35. Perfil 3D de velocidades para 5Hz.



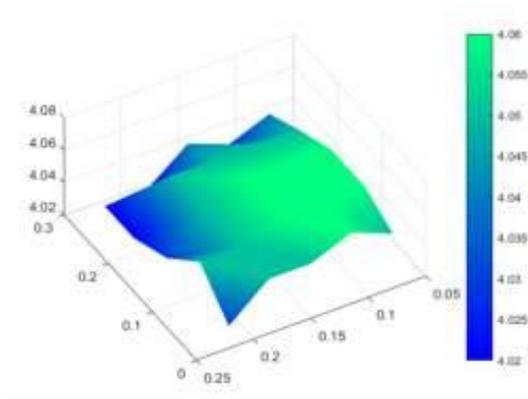
Gráfica 36. Perfil 3D de velocidades para 10Hz.



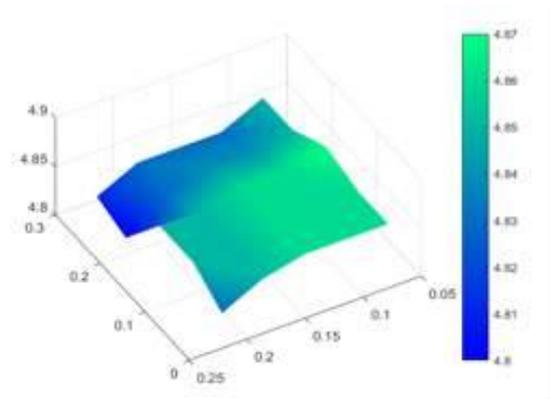
Gráfica 37. Perfil 3D de velocidades para 15Hz.



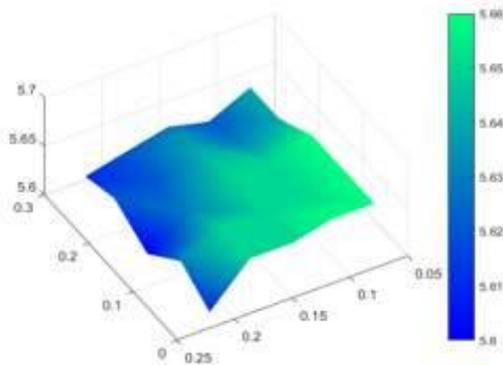
Gráfica 38 . Perfil 3D de velocidades para 20Hz.



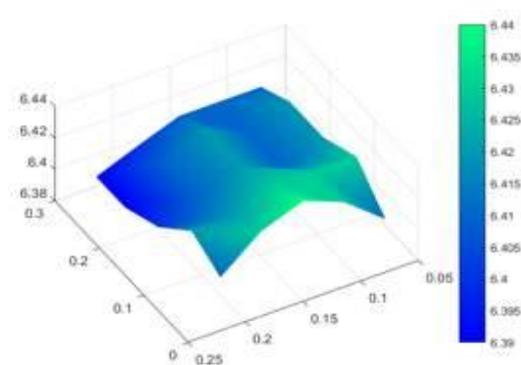
Gráfica 39. Perfil 3D de velocidades para 25Hz.



Gráfica 40. Perfil 3D de velocidades para 30Hz.



Gráfica 41. Perfil 3D de velocidades para 35Hz.



Gráfica 42. Perfil 3D de velocidades para 40Hz.

Como se observa en las gráficas, los valores de velocidad son menores en el orificio A, el más bajo de todos, y además los valores tienden a estabilizarse cuanto más próximos a la pared opuesta a la placa de metal.

3.7 Caracterización mediante P.I.V.

Otra manera de caracterizar la cámara de ensayos es mediante el sistema P.I.V. explicado anteriormente.

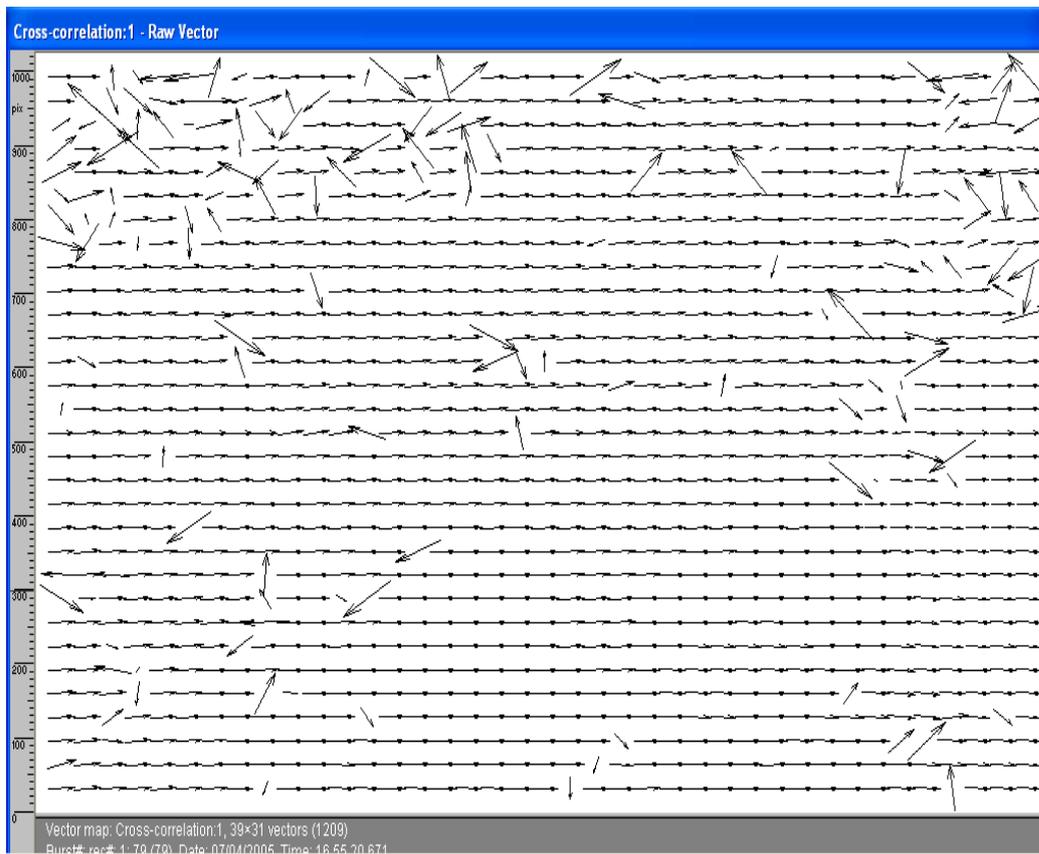
Para obtener resultados fiables a partir de los pares de imágenes tomados, es necesario analizar los datos que proporcionan mediante ciertas operaciones matemáticas. Esto ha sido posible gracias al software FlowManager, para analizar las secuencias de imágenes, y al software Matlab para terminar presentando los resultados obtenidos.

FlowManager

Mediante este programa se obtienen las secuencias de registros y análisis mediante multisección, de una forma idéntica para las 150 adquisiciones de cada set-up. La “Crosscorrelation” y demás operaciones realizadas se han hecho a posteriori.

La secuencia de operaciones llevada a cabo son las siguientes:

- **Crosscorrelation**, según los siguientes parámetros:
 - Área de interrogación (64 x 64) píxeles.
 - Ovelap vertical y horizontal (75%, 75%).
 - Área activa de imagen (Área captada).
 - Nula distancia en píxeles entre la segunda área de interrogación vertical y horizontal.
 - Funciones ventana y filtro nulas, por lo que se presentan algunas irregularidades en la imagen tomada con vectores no válidos (raw vector map).



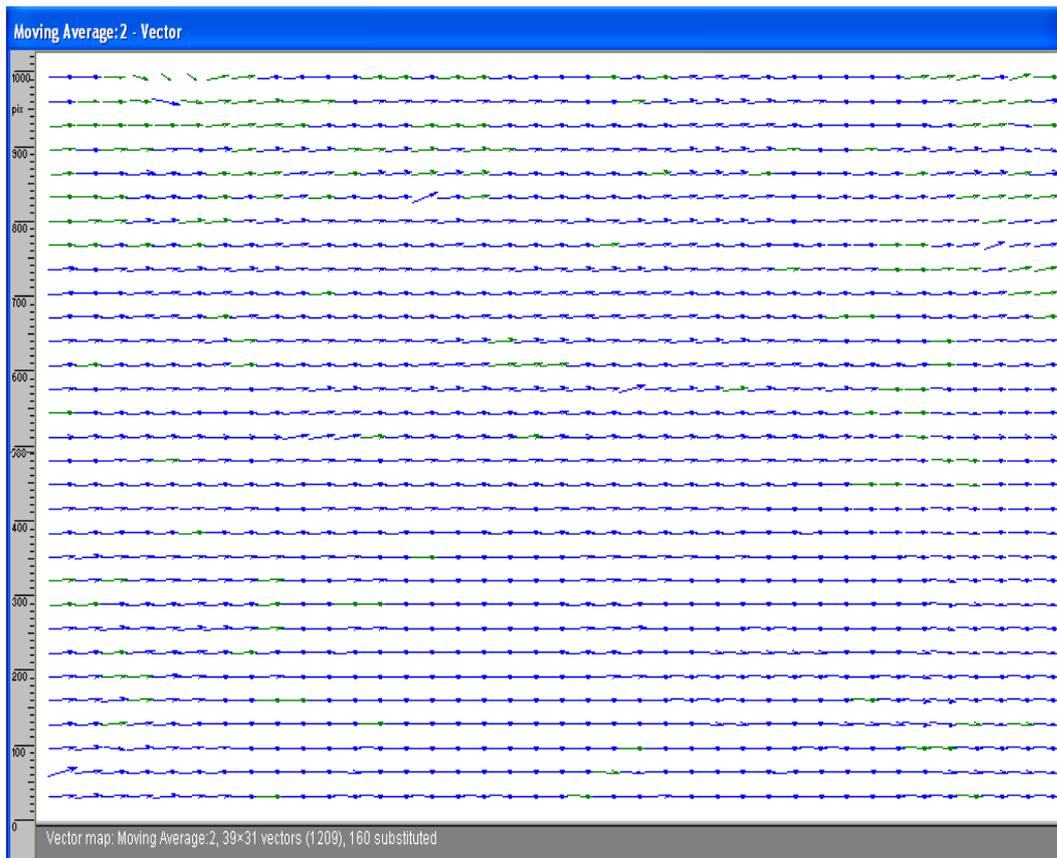
Gráfica 43. Crosscorrelation (raw vector map).

- **Moving Average (validación).** Gracias a que los vectores no válidos se encuentran por separado y no agrupados, podemos uniformizar el campo de

velocidades mediante el Moving Average. Los parámetros utilizados son los siguientes:

- Área de medida (5 x 5) píxeles.
- Factor de aceptación $\alpha = 0.1$.
- 3 iteraciones.
- Sustitución de vectores no válidos.

Una vez aplicado este método la imagen resultante es la siguiente, donde se observan los vectores verdes que sustituyen a los anteriores no válidos.

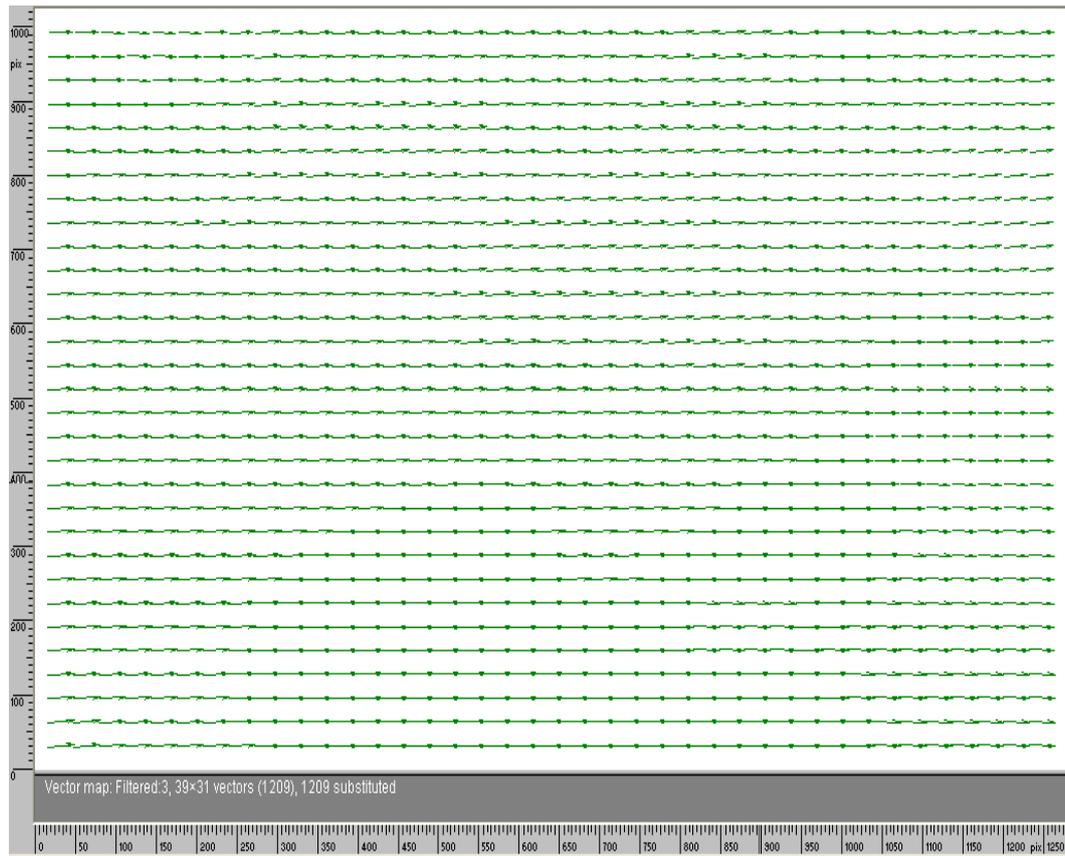


Gráfica 44. Moving Average (vector map).

- **Filtro.**

Por último, se ha aplicado un filtro para eliminar cualquier tipo de ruido y así sustituir cada uno de los vectores por el vector medio de un área circundante.

El único parámetro por fijar es el área media (5 x 5) píxeles.



Gráfica 45. Filtro (vector map).

Terminado el post-procesamiento queda sacar el perfil de velocidades para cada una de las frecuencias. Para ello es necesario la ayuda del *software Matlab* que cogiendo una vertical del gráfico anterior, traza un perfil de velocidades similar al de la **Gráfica** . *Velocidades para las distintas posiciones x_i en el agujero C, a 25 Hz.*

A continuación, se explican los pasos que sigue el software Matlab para llegar a trazar estos perfiles.

Matlab

Los datos extraídos una vez realizado el filtro de los análisis, se almacenan en una base de datos de Matlab. El análisis se ha llevado a cabo para cada uno de los set-ups, con sus 150 pares de imágenes para una posición específica de la cámara. A posteriori se han unido los 4 set-ups de la visión vertical completa de la sección experimental. Finalmente, se ha trazado el campo de velocidades.

Cada una de las carpetas contiene 150 archivos .txt con 4 columnas de datos, las dos primeras definen las coordenadas (x, y) de cada vector, y las dos últimas las componentes horizontal y vertical de cada vector en cada uno de los puntos.

Para el tratamiento de datos de han utilizado 3 programas distintos:

Crea_dati:

Para cada uno de los conjuntos de 150 archivos se almacenas debe ejecutarse este programa, que guarda las coordenadas (x, y) y las componentes horizontales y verticales de cada uno de los puntos que distingue el FlowMap. Estos datos se guardan respectivamente, en las siguientes e matrices del file generado: x, y, ufield y vfield.

Unisci_dati:

A partir de los documentos creados en el programa anterior, se crea otro file de 4 matrices: x, y, u, y v. Cada una de estas nuevas matrices es la unión de 4 matrices, una por cada foto captada por las cámaras.

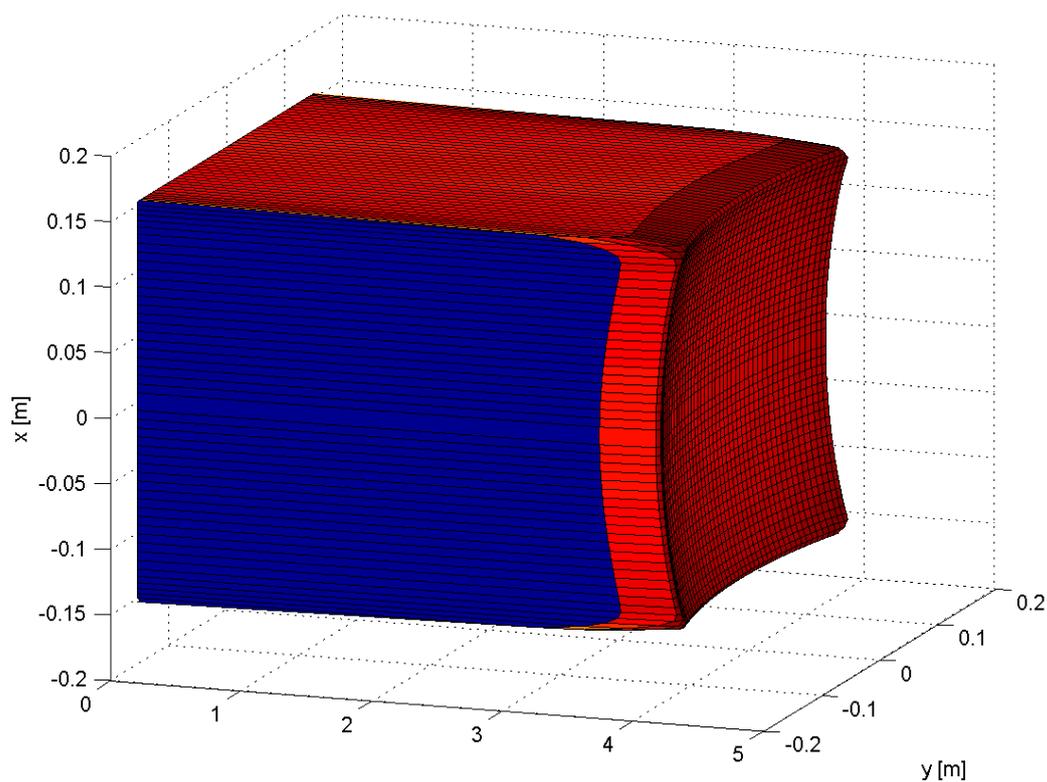
Analisi_foto:

Este programa incluye se divide en tres programas genéricos, que se encargarán de descargar los datos de las carpetas para construir una matriz, unir las tres matrices respectivas de las tres posiciones distintas de las cámaras en una sola matriz, y analizar los datos obtenidos para representar los vectores en el plano.

3.8 Simulación con *Fluent*

La simulación numérica se ha realizado con el software *Fluent*. Para ello se ha reconstruido la geometría tridimensional de la cámara de ensayos, se han impuesto las condiciones de contorno mass-flow-inlet y out-flow, y una velocidad de ingreso de 1,33 m/s, obtenida a partir de la ecuación de conservación de la masa para una velocidad media en la cámara de ensayos de 4 m/s.

La simulación muestra el resultado siguiente: (realizada por Mazzavillani, N., en su tesis, Studio di una galleria del vento).



Gráfica 46. Simulación *Fluent*.

Comparando los resultados de *Fluent* con los 3D obtenidos en el laboratorio, observamos que los 3D no siguen una curva cóncava con velocidades algo inferiores en el centro de la cámara de ensayo, si no que más bien disminuyen algo en los extremos, sobre todo en el lado de la placa de metal. No obstante, las velocidades medias obtenidas son en torno a 4 m/s en ambas experimentaciones, dándole validez a los resultados obtenidos experimentalmente en el laboratorio.

4 ■ FLUJO ALREDEDOR DE UN CILINDRO

Indice:

- 4.1 Resistencia aerodinámica
 - 4.1.1 *Fricción viscosa*
 - 4.1.2 *Resistencia de presión o de forma*
 - 4.1.3 *Resistencia inducida*
 - 4.2 Fenómeno de Turbulencia
 - 4.2.1 *Descripción turbulencia*
 - 4.2.2 *Promedio temporal flujo turbulento*
 - 4.2.3 *Ecuaciones de conservación flujo turbulento*
 - 4.3 Flujo alrededor de un cilindro
 - 4.3.1 *Flujo ideal*
 - 4.3.2 *Flujo real*
 - 4.4 Cálculo Número de Reynolds
 - 4.5 Preparación Medidas / Calibración
 - 4.5.1 *Calibración de las cámaras*
 - 4.5.2 *Modelo de imagen fit (IMF)*
 - 4.6 Medidas
 - 4.6.1 *Medidas PIV standard*
 - 4.6.2 *Medidas Stereo-PIV*
 - 4.6.2.1 *Medidas a 0,8 m/s (5 Hz)*
 - 4.6.2.2 *Medidas a 1,6 m/s (10 Hz)*
 - 4.6.2.3 *Medidas a 2,4 m/s (15 Hz)*
 - 4.6.2.4 *Medidas a 3,2 m/s (20 Hz)*
 - 4.6.3 *Comparación*
-

4.1 Resistencia aerodinámica

Siempre que un cuerpo en movimiento se oponga a un fluido va a sufrir pérdidas de energía a causa del rozamiento de las capas de fluido con el cuerpo. Esto va a frenar a cualquier cuerpo en movimiento dentro de un fluido, pero el grado de disipación de energía va a depender de varios factores: la geometría del cuerpo, la densidad del fluido y la velocidad relativa del cuerpo en el fluido.

A causa de este efecto, este fenómeno va a influir en gran cantidad en el diseño de cuerpos destinados a trabajar en contra de un fluido.

La fuerza ejercida por el fluido en dirección paralela éste sobre un objeto cualquiera se llama fuerza de arrastre, y se define como:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x$$

, en donde

F_x = Fuerza de Arrastre [N]

ρ = Densidad del aire [kg/m³]

V = Velocidad [m/s]

S = Superficie frontal [m²]

C_x = Coeficiente de resistencia [adimensional]

El coeficiente de resistencia/arrastre C_D va a variar en función de la geometría del objeto de estudio.

Shape		Drag Coefficient
Sphere		0.47
Half-sphere		0.42
Cube		1.05
Streamlined Body		0.04
Streamlined Half-body		0.09

Imagen 58. Valores C_D para distintas geometrías.

Además, este coeficiente varía entorno al número de Reynolds, definido como:

$$Re = \frac{v_s L}{\nu}$$

Con ν , viscosidad cinemática del fluido (m²/s), que para el aire se puede considerar $\nu = 1,5 \times 10^{-5}$ (para T y P ambientes), con L (m) la dimensión característica del cuerpo, que en el caso de un vehículo sería su altura. Adimensional.

El número de Reynolds permite caracterizar el movimiento de un fluido, comparando términos convectivos y viscosos, relacionando fuerzas de inercia y viscosas. Si $Re < 1$, dominan las fuerzas viscosas, y si $Re > 1$, las de inercia. También determina el carácter laminar/turbulento de un fluido. Si $Re < 2000$ el flujo es laminar, y si $Re > 4000$, turbulento. Entre ambos valores el flujo se encuentra en transición.

En la siguiente figura se puede ver como C_D decrece mientras sea laminar, hasta pasar a turbulento donde se mantiene prácticamente constante.

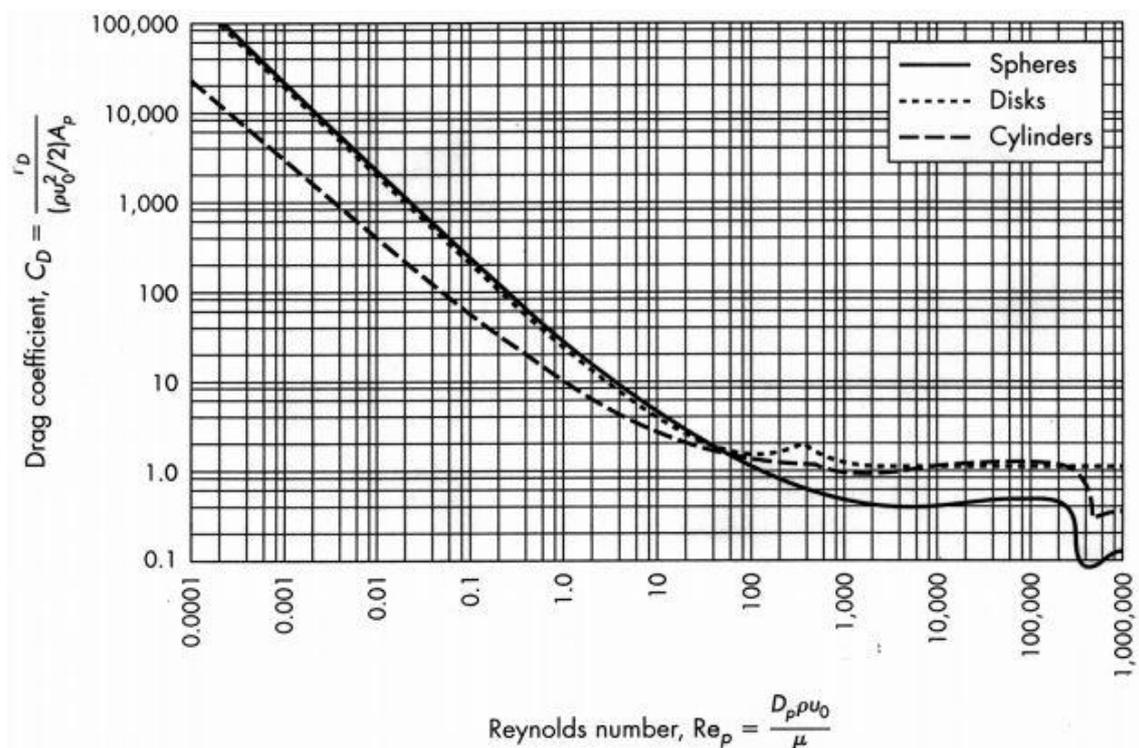


Imagen 59. C_D en función de Re .

La resistencia aerodinámica que sufre un objeto dentro del flujo de un fluido viene determinada por los siguientes fenómenos físicos:

1. Fricción viscosa
2. Resistencia de forma
3. Resistencia inducida

4.1.1 Fricción viscosa

La fricción viscosa o arrastre de fricción superficial, es la acción de frenado causada por el roce de las moléculas del fluido con el cuerpo, que fluyen de manera tangencial a éste.

La mejor manera de entender este fenómeno es utilizando el concepto anteriormente explicado de la capa límite.

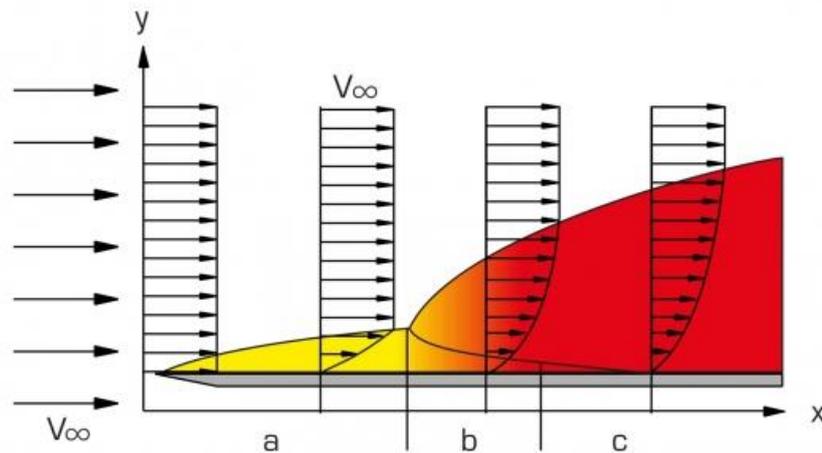


Imagen 60. Capa límite. Flujo laminar (amarillo). Flujo turbulento (rojo). Pto. Transición.

Como se observa en la imagen, el espesor de la capa límite es mayor para un flujo turbulento, por lo que la fuerza de arrastre ejercida sobre el cuerpo será mayor. La fuerza de fricción provocada a lo largo de la superficie del cuerpo se define como:

$$D_{\text{Fricción}} = \int t_{ij} n_j t_i dS$$

con t_{ij} (N/m^2) tensor de esfuerzos de Cauchy, t_i vector tangencial a la superficie y paralelo a la dirección del fluido y n_j perpendicular a la superficie.

Una vez definida esta fuerza ya podemos definir el citado Coeficiente de arrastre C_D .

$$C_F = \frac{D_{\text{Fricción}}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A}$$

con U_{∞} velocidad del flujo, A área frontal del objeto y D la fuerza de fricción que sufre el cuerpo.

4.1.2 Resistencia de presión o de forma

Debido su forma o geometría, alrededor de un cuerpo sometido bajo el campo de un fluido, se generan dos regiones con presiones distintas que provocan una resistencia al avance. Una zona de remaso, con presiones altas, en la zona frontal del objeto y otra zona posterior de presiones bajas, donde se desprende la corriente.

Este desprendimiento de capa límite se debe a la pérdida de velocidad del flujo tangencial a la superficie del cuerpo y recirculación de éste.

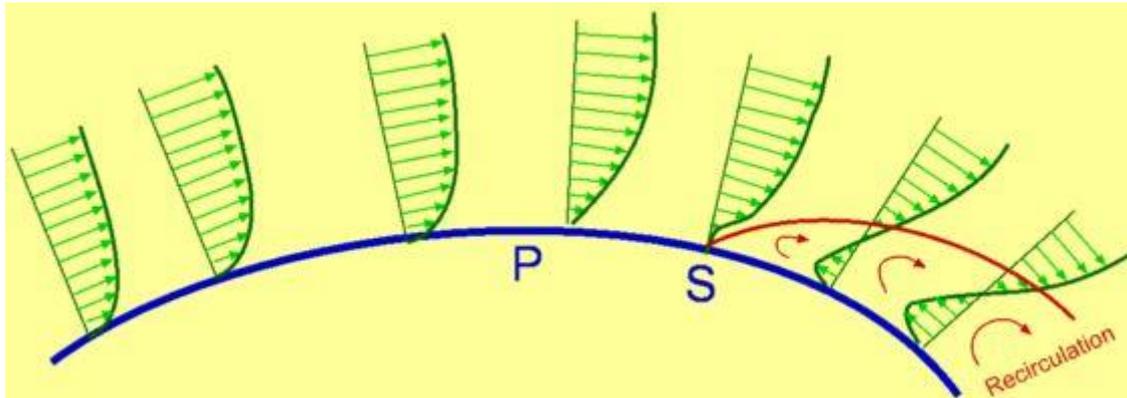


Imagen 61. Recirculación capa límite.

En la zona de desprendimiento la presión del fluido es menor que la del fluido no perturbado y se crea la llamada “zona de aspiración” que frena el avance del objeto.

Las fuerzas de arrastre que crea este fenómeno se define como:

$$D_{\text{Presión}} = (p - p_{\infty}) dS$$

Donde p_{∞} (Pa) es la presión del fluido sin perturbar y S (m^2) la superficie del objeto.

Una vez definida esta fuerza ya podemos definir el Coeficiente de forma C_p .

$$C_p = \frac{D_{\text{Presión}}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A}$$

Una vez definidos ambos coeficientes aerodinámicos, la resistencia del perfil queda definida por la resistencia de fricción y de presión, dando lugar a un coeficiente aerodinámico total C_D , definido como:

$$C_D = C_p + C_f$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A}$$

La contribución de ambos tipos de fuerzas depende por lo tanto de la geometría del cuerpo y de su espesor. Para el caso de una placa plana con espesor nulo, la resistencia total va a estar definida solamente con la de fricción, y para el caso de un cilindro circular, la resistencia va a estar prácticamente definida por la presión.

4.1.3 Resistencia inducida

Esta fuerza es debida a la sustentación del cuerpo en el seno de un fluido, y está constituida por los vórtices generados en éste.

Este concepto ha sido muy estudiado en el campo de la aerodinámica, ya que es en el ala de los aeroplanos donde éste fenómeno se tiene más en cuenta.

Explicaremos lo que ocurre en las alas de un avión para entender este concepto. En la parte inferior de éstas, el aire se aleja del cuerpo del avión, y en la parte superior se acerca a éste. Al encontrarse en la punta del ala estos flujos, se crean vórtices que se oponen a la fuerza de empuje provocando una resistencia al avanzamiento.



Imagen 62 . Vórtices generados por un avión.

La resistencia inducida se tiene en cuenta con el coeficiente de sustentación definido como:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A}$$

con L fuerza perpendicular al ala.

4.2 Fenómeno de Turbulencia

4.2.1 Descripción turbulencia

Como es sabido, la naturaleza tiende al desorden, y la circulación de flujos no se libra. Esta tendencia al desorden para los fluidos se denomina turbulencia.

La turbulencia o flujo turbulento se origina cuando un flujo laminar pierde sus características, y las partículas del fluido empiezan a comportarse de manera aleatoria y fluctuante. Este fenómeno se produce para fluidos con velocidades muy altas o con fuerzas inerciales mucho mayores que las viscosas, para números de Reynolds muy elevados, $Re > 4000$, donde las capas tangenciales de fluido que siguen la superficie del cuerpo empiezan a mezclarse y cambian aleatoriamente con el tiempo.

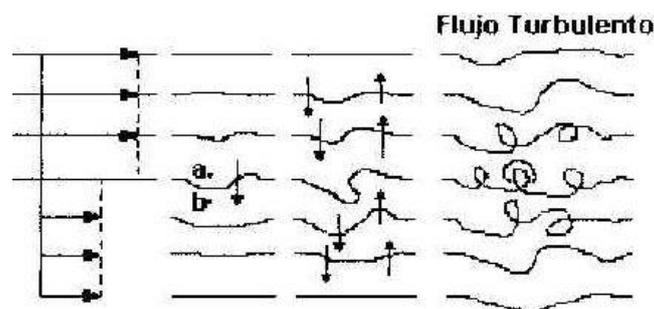


Imagen 63. Aparición flujo turbulento.

La aparición de turbulencias va conjunta con la aparición de vórtices o remolinos, y la expansión de estos se explica mediante la escala de Kolmogorov (1922), basándose en la propuesta de Richardson (1922), que enuncia que la energía se transfiere en cascada de las grandes escalas hacia las más pequeñas, donde se disipa.

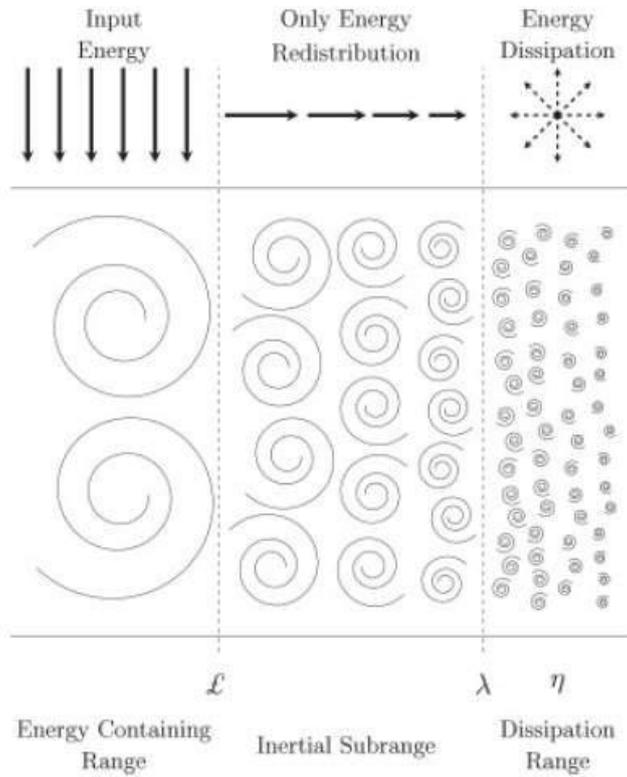


Imagen 64. Cascada turbulenta.

Las turbulencias se caracterizan por presentar una naturaleza fluctuante pseudo-aleatoria, ya que tanto la velocidad como la presión fluctúan cerca de un valor medio de una cierta manera característica, no aleatoriamente 100%.

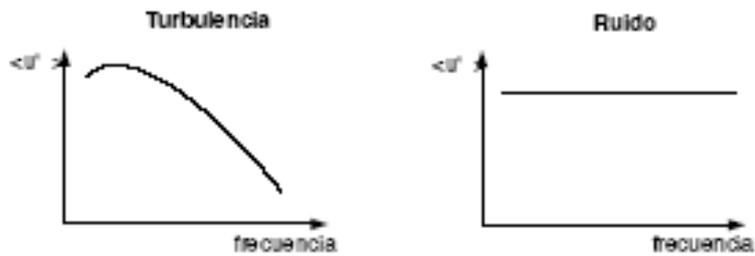


Imagen 65. Naturaleza pseudo-aleatoria de una turbulencia.

4.2.2 Promedio temporal flujo turbulento

Para el estudio del fenómeno de la turbulencia, disponemos de la herramienta estadística Promedio temporal, que sostiene que cualquier variable puede representarse mediante su valor medio en el tiempo.

$$\bar{f} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \quad f = \bar{f} + f', \quad \text{siendo } f \text{ una variable cualquiera.}$$

Una forma de representar este valor medio es mediante la descomposición de Reynolds. Con esta descomposición vamos a poder representar, por un lado, una componente estacionaria del flujo, y por otro una fluctuante.

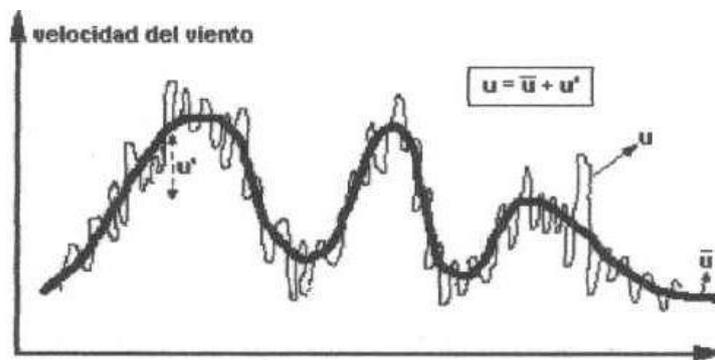


Imagen 66. Descomposición de Reynolds.

La velocidad instantánea queda por lo tanto representada como:

$$u(t) = \bar{u} + u'(t)$$

con, \bar{u} velocidad media y $u'(t)$, componente fluctuante.

4.2.3 Ecuaciones de conservación flujo turbulento

Conservación de la masa

La ecuación general de la conservación de la masa para un flujo incompresible es la siguiente:

$$\nabla \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Para el caso particular del flujo turbulento, las variables se descomponen como:

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \end{aligned} \quad (2)$$

Aplicando este caso a la ecuación 1, y usando la operación promedio resulta:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Afirmando así que las fluctuaciones de velocidad cumplen la conservación de la masa.

Conservación del momento

Igual que en la conservación de la masa, utilizaremos la descomposición en componente fluctuante y media de la presión y velocidad, pero en este caso para la ecuación de Navier Stokes.

Tras la elección del uso de la componente x por simplicidad, el desarrollo de los productos, la aplicación de un promedio temporal y la aplicación de la ecuación de la conservación de la masa, la ecuación de conservación del momento queda como:

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial}{\partial x} (\overline{u^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'v'}) \right) \quad (4)$$

Si de además se obtiene la conservación del momento en la dirección:

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'^2}) \right)$$

Se obtiene un tensor de esfuerzos turbulentos:

$$\Sigma_t = -\rho \nabla \overline{u'_i u'_j} = \rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix}$$

Esfuerzos que no dependen de la naturaleza del fluido, como los esfuerzos viscosos, si no del tipo de flujo.

Para poder resolver el sistema se necesitarán nuevas ecuaciones debido a la aparición de nuevas incógnitas, de ahí la gran dificultad para lograrlo.

4.3 Flujo alrededor de un cilindro

A lo largo de la historia, se ha estudiado muchas veces como afectan las fuerzas de la aerodinámica a los objetos cilíndricos, debido a la facilidad que presentan a la hora de estudiarlos en un laboratorio, y a que nos permiten estudiar estas fuerzas de una manera más sencilla.

4.3.1 Flujo ideal

Los primeros estudios que se llevaron a cabo consideraron que el efecto de la viscosidad del aire era despreciable, ya que se consideraba ideal e incompresible. Además, defendían que no existía dependencia con las propiedades físicas del fluido ni con el número de Reynolds.

Como ejemplo, d'Alembert enunció que los aviones no podían volar, ya que considerando que no se generan vórtices, la fuerza de empuje generada en las alas del avión es nula. La imagen siguiente representa lo que defendía d'Alembert, una resistencia aerodinámica total nula debido a la simetría del campo del fluido.

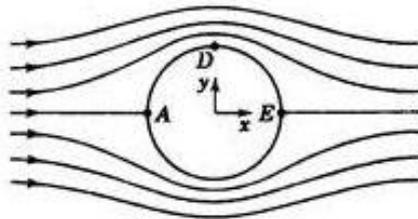


Imagen 67. Cilindro bajo efectos fluido ideal.

Según estos experimentos el coeficiente de presión C_P quedaba de la siguiente forma:

$$C_P = \frac{P_S - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} = 1 - 4\sin^2 \theta .$$

4.3.2 Flujo real

El error en lo enunciado en el apartado anterior está en que en realidad el flujo no es ideal e incompresible, más bien todo lo contrario, los efectos de viscosidad y el número de Reynolds son necesarios para explicar qué es lo que pasa realmente con el flujo al chocar con la superficie de un cilindro.

La evolución del flujo con el número de Reynolds es la mostrada en la imagen siguiente:

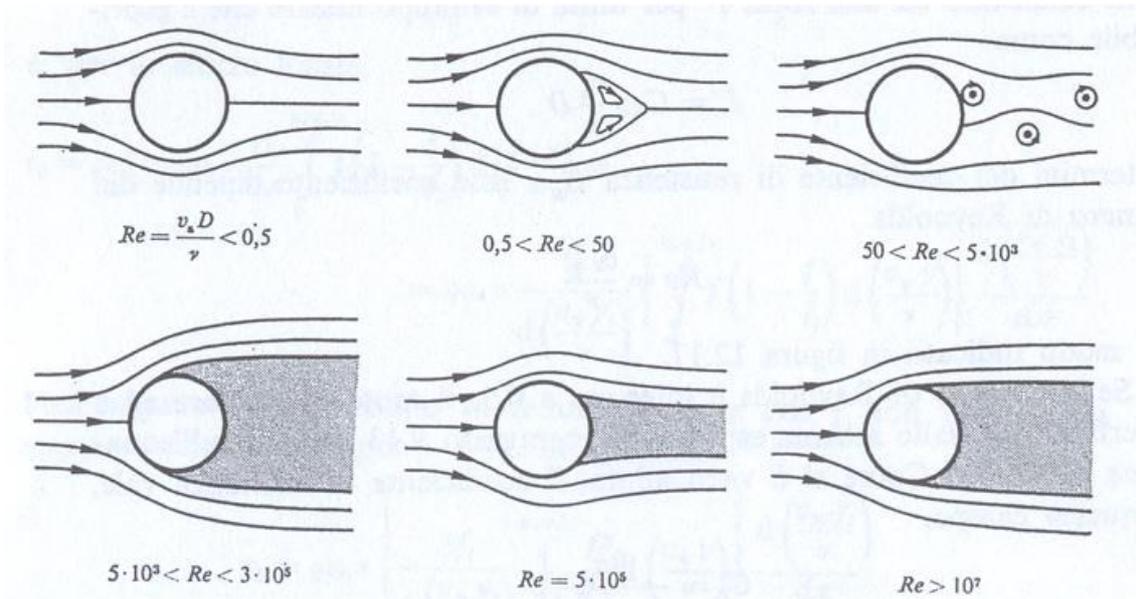


Imagen 68. Flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico en función de Re .

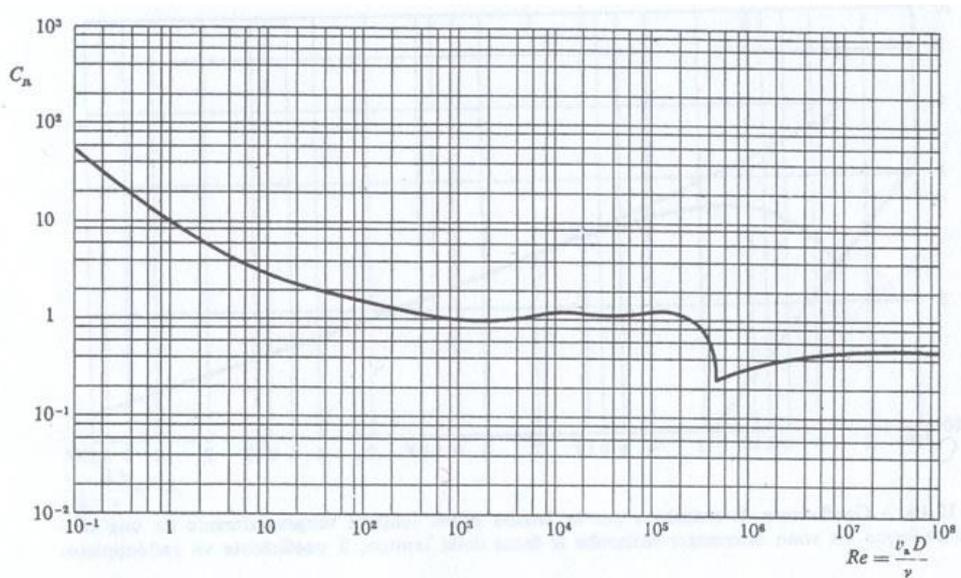


Imagen 69. C_R en función de Re sobre un cilindro.

- **$Re < 0,5$:** Resistencia aerodinámica debida a fuerzas viscosas. La corriente no se desprende.
- **$0,5 < Re < 50$:** Aparecen los primeros vórtices en la parte posterior del cilindro, debido a que la corriente empieza a desprenderse.
- **$50 < Re < 5000$:** Los vórtices aumentan en número y se desprenden alternativamente. En este intervalo se pasa de un fluido prácticamente laminar a uno turbulento.

- **5000 < Re < 350000:** La estela se convierte en simétrica y turbulenta provocando que la resistencia se deba principalmente a los torbellinos turbulentos.
- **350000 < Re < 500000:** La capa límite se convierte en turbulenta reduciendo el espesor de la estela.
- **Re > 107:** El espesor de la estela se mantiene constante a la par que se alarga.

4.4 Cálculo Número de Reynolds

Expresado el número de Reynolds de la siguiente forma:

$$R_e = \frac{\rho u D}{m}$$

Asumimos que el fluido de trabajo tiene las mismas características que el aire en condiciones estándar: $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (densidad), $m = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa*s)}$ (viscosidad dinámica). La dimensión D del cilindro con el que se hicieron las medidas es $D = 2,5 \cdot 10^{-2}$ y las velocidades son las calculadas con el tubo de Pitot.

Por tanto, el número de Reynolds para cada una las velocidades impuestas en la experimentación es:

VELOCIDAD (m/s)	NÚMERO DE REYNOLDS
0,8	$1,35 \cdot 10^2$
1,6	$2,7 \cdot 10^3$
2,4	$4,05 \cdot 10^3$
3,2	$5,4 \cdot 10^3$

Para la primera velocidad el flujo es laminar, al ser menor de 2100. Para la segunda velocidad el flujo está en estado de transición a turbulento, y ya es en la tercera y cuarta cuando el flujo pasa a ser turbulento en su totalidad ($R_e > 4000$).

4.5 Preparación Medidas / Calibración

4.5.1 Calibración de las cámaras

Para todas las medidas que se han realizado a partir de este punto, ha sido necesario calibrar y enfocar las cámaras, ya que el software FlowMap precisa saber cuál es la posición del área encuadrada dentro de la sección de prueba con respecto a un sistema de referencia determinado. Esto es lo que permite la comparación entre todos los outputs obtenidos con las respectivas modificaciones de parámetros.

La calibración ha sido realizada con la ayuda de una hoja blanca cuadrada, de dimensiones conocidas, con puntos negros equidistantes en su interior (*immagine bersaglio, target*). La hoja se ha colocado perpendicular al suelo, con la ayuda de un soporte de metal que permitía fijarla. La posición de ésta se ha determinado con la ayuda de una hoja cuadriculada colocada en el suelo de la cámara de ensayos cubriéndolo por completo. Por último, se han enfocado los puntos negros con las dos cámaras fotográficas y sea fijado que el haz de luz laser caiga sobre la línea longitudinal central de la cámara de ensayos.

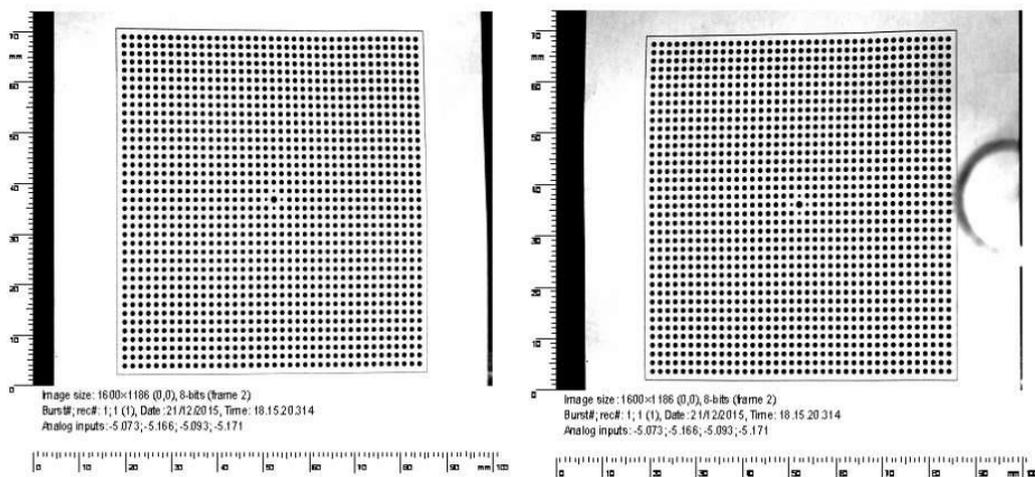


Imagen 70. Imagen captada por las cámaras en la calibración.

La calibración se ha llevado a cabo para dos profundidades distintas, $z = 0$ mm y $z = 10$ mm.

4.5.2 Modelo de imagen fit (IMF)

Una vez obtenidas las imágenes para las dos profundidades dichas en el apartado anterior, se han emparejado con el fin de mapear la imagen. Con el uso de una transformación lineal directa (direct linear transformation DLT), se han traducido las tres dimensiones del espacio en un plano. Como salida de esta transformación se obtiene una cuadrícula de color verde con un punto rojo en el centro de ésta, que estará más cerca del centro geométrico cuanto mejor se haya hecho la calibración.

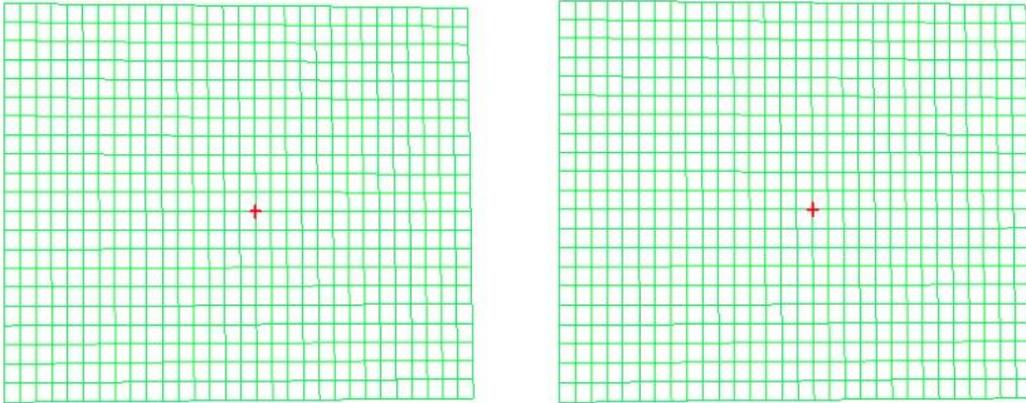


Imagen 71. Cuadrículas DLT para ambas profundidades.

4.6 Medidas

4.6.1 Medidas PIV standard

Este método solo tiene en cuenta dos componentes (2C) para la velocidad en el plano (2D) con la ayuda de una sola cámara fotográfica, por lo que muchas partículas se escapan del plano del haz de luz sin llegar a ser captadas dos veces, a falta de su componente ortogonal. Este proceso se ha explicado con mayor detalle en los apartados de *instrumentos de medida* y de *Caracterización mediante P.I.V.*.

Las medidas se han realizado en el plano $Z=20$ cm, posicionando la cámara a 60 cm de la cámara de ensayos. Para esta posición, la cámara toma imágenes de dimensiones $135 \times 108 \text{ mm}^2$, captando para cada una de ellas tres zonas: el flujo inalterado por el efecto del cilindro, el flujo en torno al cilindro y las estelas que crea éste aguas abajo.

Una vez tomadas las medidas se ha procedido a un análisis y tratamiento de datos previamente explicados en los apartados de *instrumentos de medida* y de *Caracterización mediante P.I.V.*. Como se explica en este último, para la representación gráfica de los campos de velocidades medias, se ha llevado a cabo un post-análisis con Matlab.

A continuación, se muestra para cada una de las frecuencias: **5 Hz, 10 Hz, 15 Hz y 20 Hz**, un mapa medio de velocidades, un gráfico de nivel y un campo fluctuante.

Los campos medios de velocidades muestran la pérdida de las fluctuaciones del flujo, y los mapas fluctuantes muestran los vórtices generados. Estos últimos se han sacado para un instante determinado, a partir la resta de los módulos de los medios y del módulo de un campo de velocidad instantánea.

Frecuencia del ventilador 5 Hz

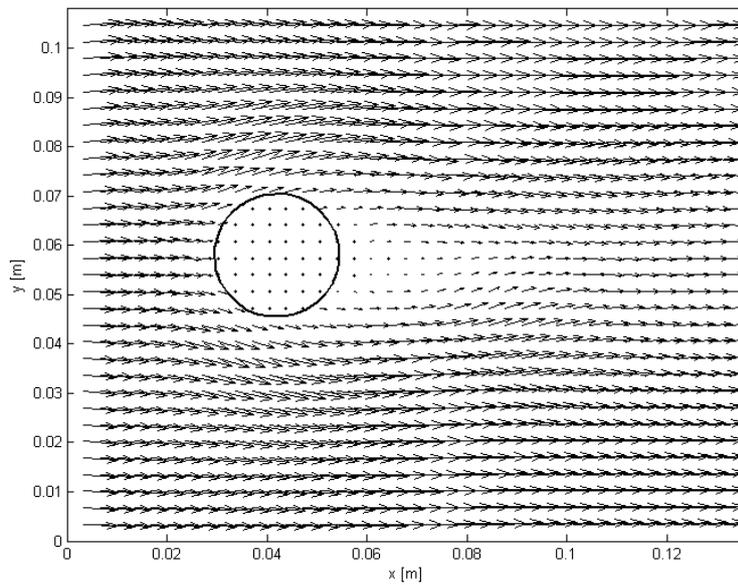


Imagen 72. Mapa medio de velocidades a 5Hz.

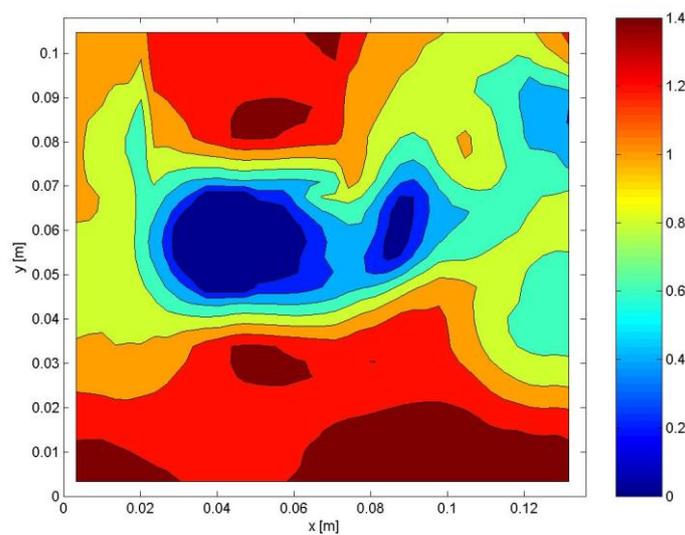


Imagen 73. Gráfico de nivel a 5Hz.

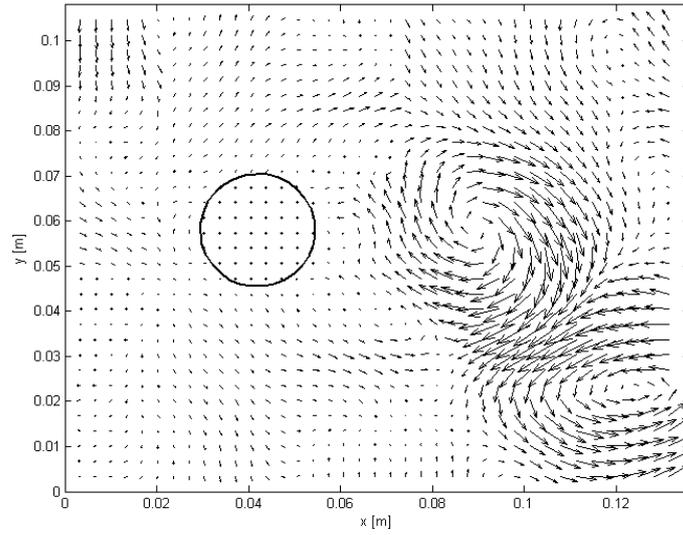


Imagen 74. Campo fluctuante a 5Hz.

Frecuencia del ventilador 10 Hz

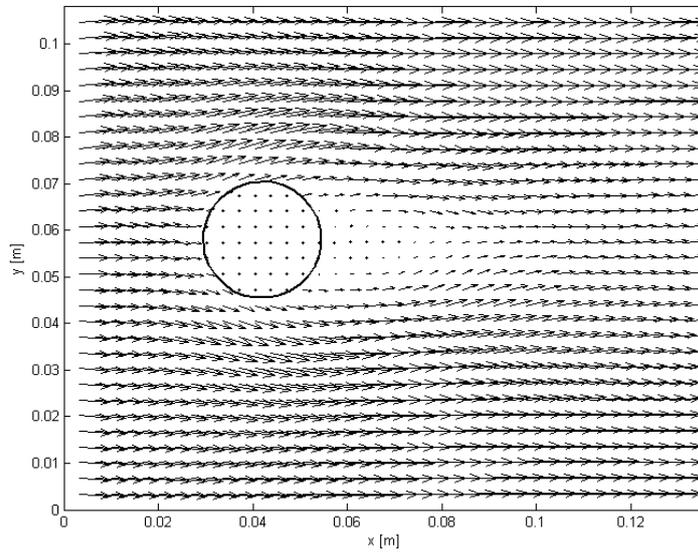


Imagen 75. Mapa medio de velocidades a 10Hz.

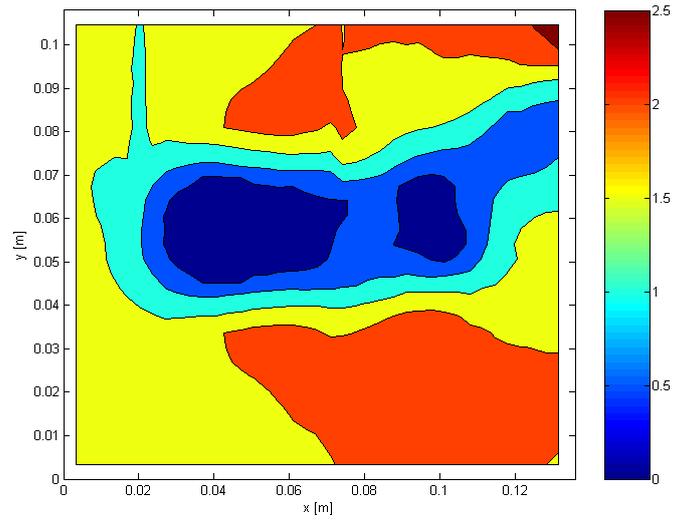


Imagen 76. *Gráfico de nivel a 10Hz.*

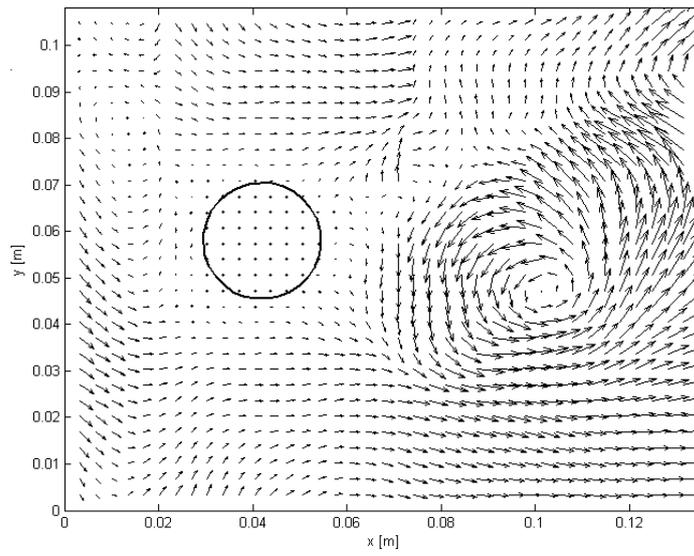


Imagen 77. *Campo fluctuante a 10Hz.*

Frecuencia del ventilador 15 Hz

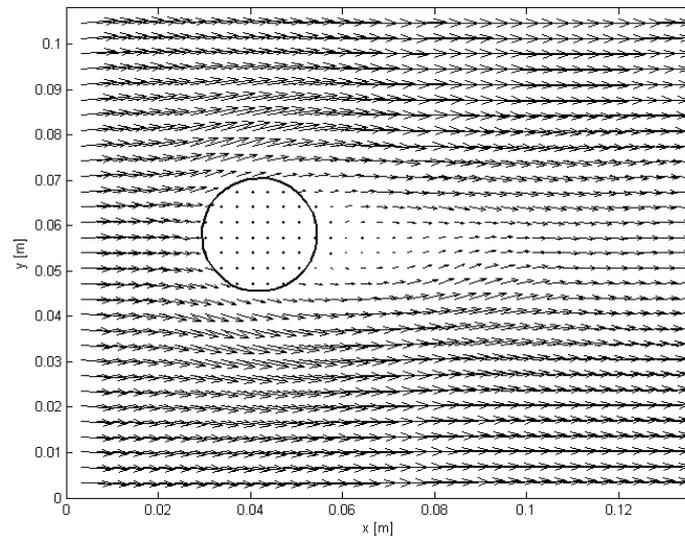


Imagen 78. Mapa medio de velocidades a 15Hz.

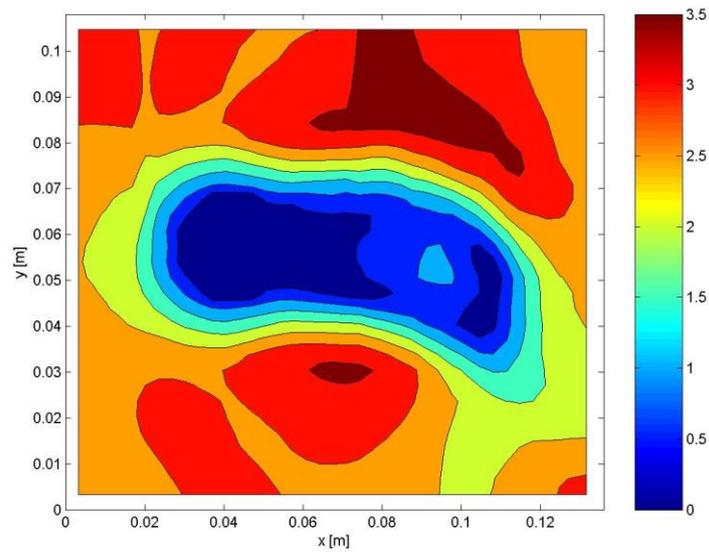


Imagen 79. Gráfico de nivel a 15Hz.

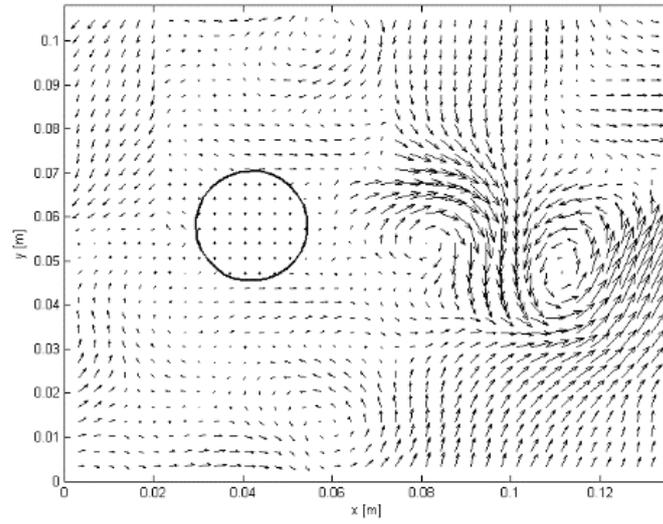


Imagen 80. *Campo fluctuante a 15Hz.*

Frecuencia del ventilador 20 Hz

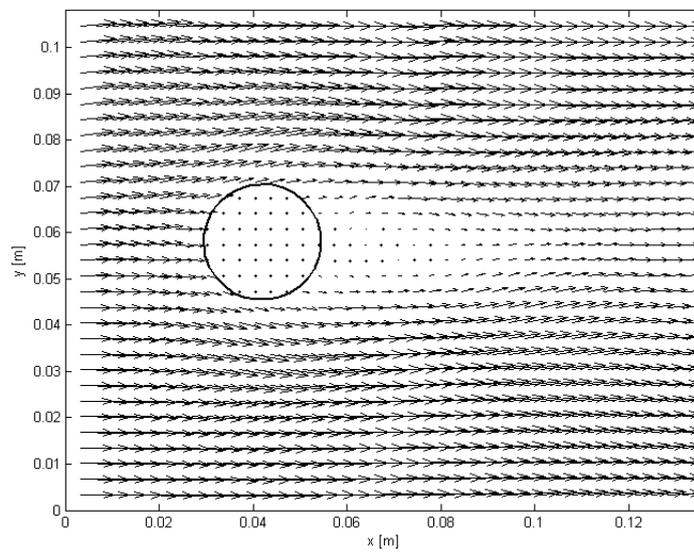


Imagen 81. *Mapa medio de velocidades a 20Hz.*

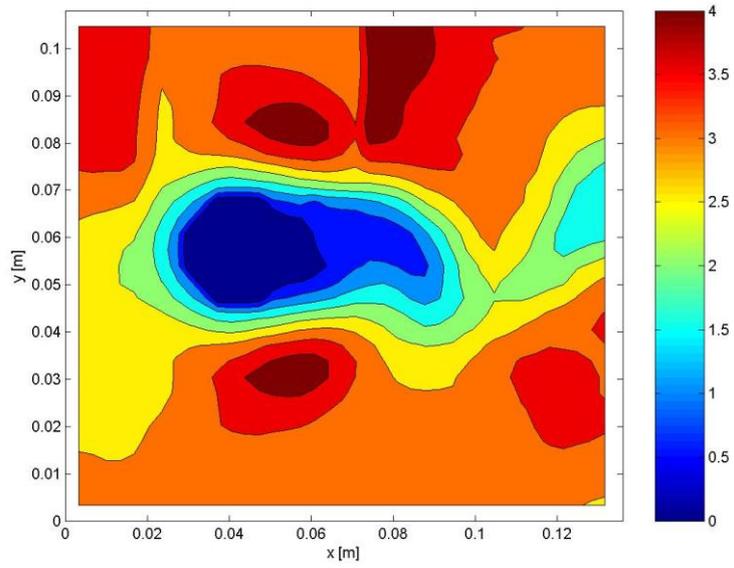


Imagen 82. Gráfico de nivel a 20Hz.

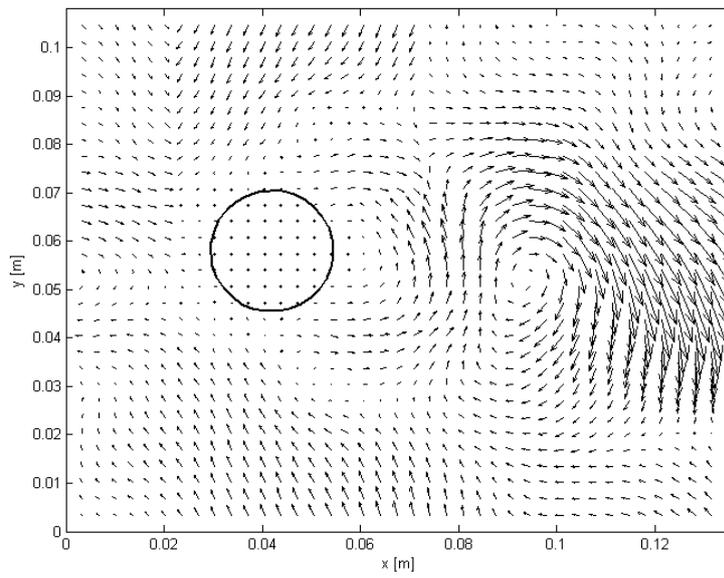


Imagen 83. Campo fluctuante a 20Hz.

4.6.2 Medidas Stereo-PIV

Esta técnica sí que tiene en cuenta las tres componentes de la velocidad (3C) en el plano (2D), y son necesarias dos cámaras fotográficas, como se ha explicado en el apartado de *instrumentos de medida*. Además, necesita de un post-procesamiento de imágenes para identificar correctamente los vórtices generados en el plano del cilindro.

Como ya se ha explicado anteriormente, a causa de la rotura del ventilador, las velocidades medias con las que se han obtenido los siguientes resultados han sido las obtenidas sin el tubo extractor de gases de escape.

0,8 m/s (5 Hz), 1,6 m/s (10 Hz), 2,4 m/s (15 Hz) y 3,2 m/s (20 Hz).

Para cada experimento, una vez captados los fotogramas cada 100 ms, se ha realizado un postproceso que varía en función de la velocidad de la prueba. Esto es debido a que en las velocidades altas el flujo se vuelve más turbulento, y los vectores velocidad anómalos crecen en número, por lo que para las velocidades bajas de **0,8 m/s** y **1,6 m/s** basta con un filtro medio móvil, y para las velocidades altas de **2,4 m/s** y **3,2 m/s** es necesario un proceso de validación de rango de velocidad y enmascaramiento.

Para cada una de las velocidades se mostrará:

- imágenes captadas por las cámaras A y B
- cross-correlation
- mapa vectorial después del filtro medio móvil (*Moving Average*)
- mapa vectorial después del enmascaramiento (si es necesario)
- mapa vectorial después de la validación de rango de velocidad (si es necesario)
- mapa vectorial después del último filtro medio móvil (*Moving Average*)
- mapa vectorial 3D
- gráficos de tendencia de velocidades

4.6.2.1 Medidas a 0,8 m/s (5 Hz)

Las dos **primeras fotografías** que se tomaron fueron las siguientes:

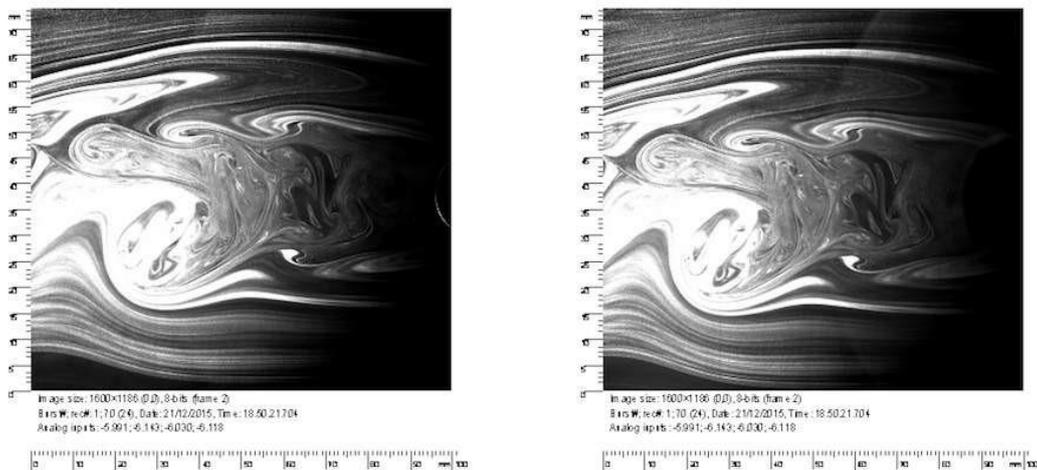


Imagen 84. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 0,8 m/s.

Al tratarse de velocidades bajas los únicos procesos que se han aplicado han sido el de *cross-correlation* y un *Moving Average*.

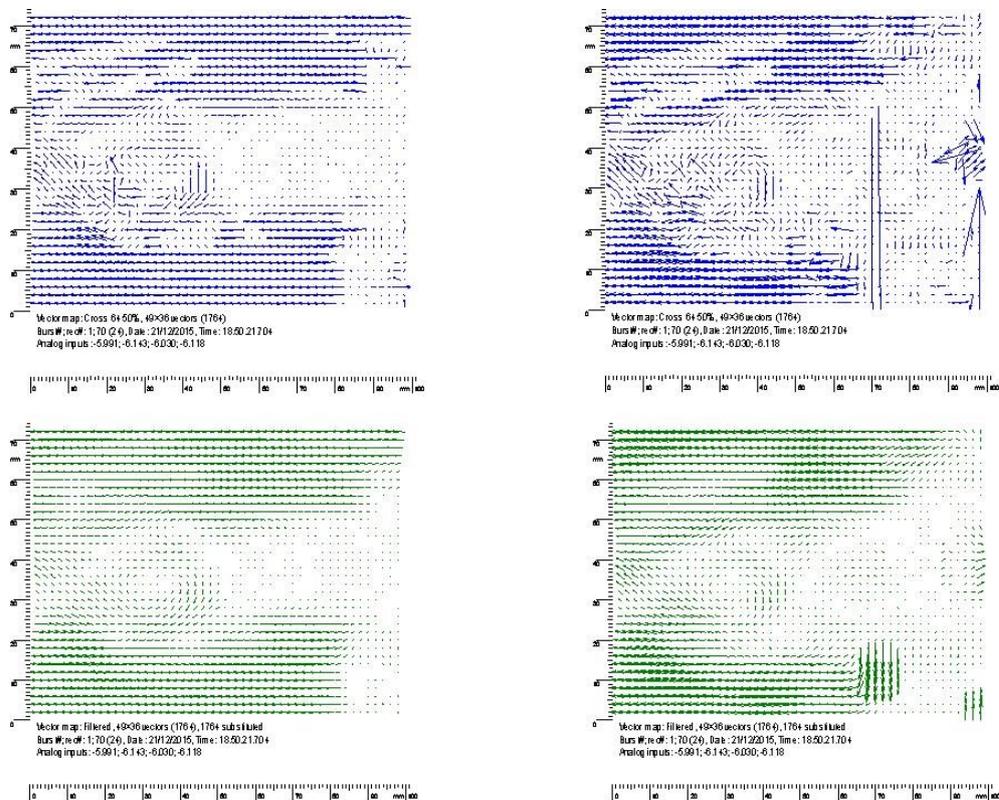


Imagen 85. Cross-correlation y Moving Average de A (iz.) y B (der.).

El siguiente paso ha sido superponer los campos vectoriales obtenidos sobre las imágenes tomadas por las cámaras, para así poder distinguir los campos turbulentos y los vórtices de flujo, prestando especial atención en estos últimos.

Por último, con la ayuda de los colores para dar valores a la componente z del campo, se han obtenido los campos 3D, procesándolos también estos y aplicando otro Moving Average para detallar los vórtices.

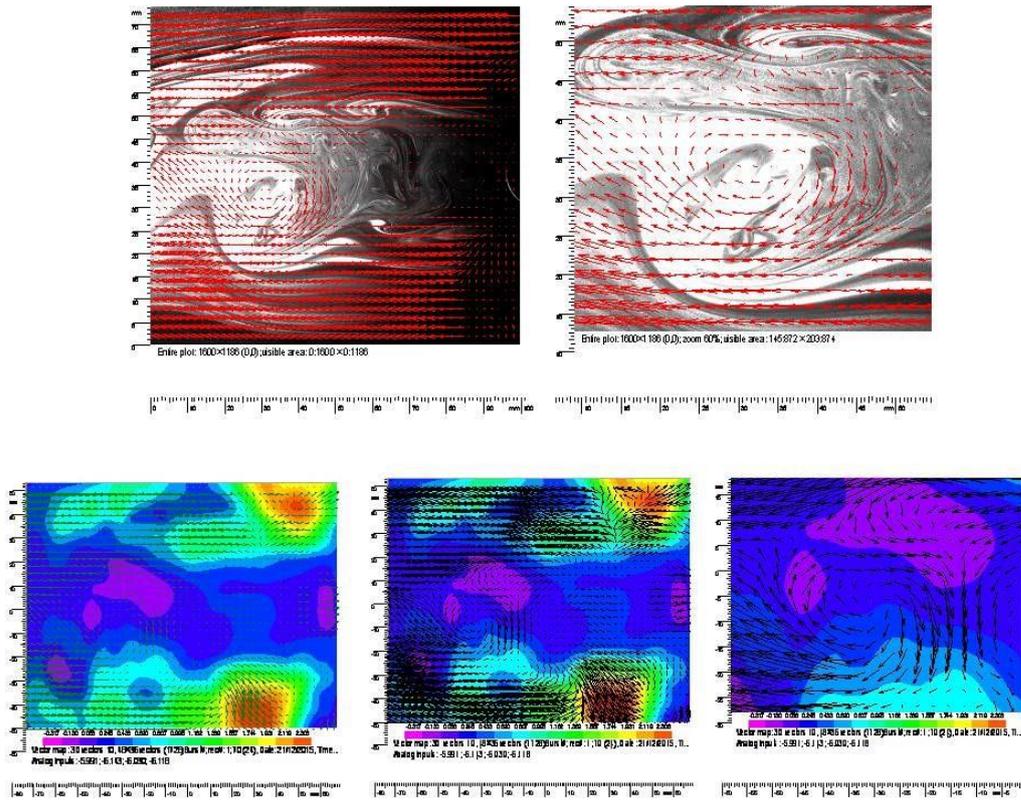


Imagen 86. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D (iz.), 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

Hasta posteriori aviso, las siguientes imágenes que se exponen, tanto de 0,8 m/s como de 1,6 m/s han sido expuestas a los mismos procesos explicados para las primeras tomas de 0,8 m/s.

Segundas medidas 0,8 m/s:

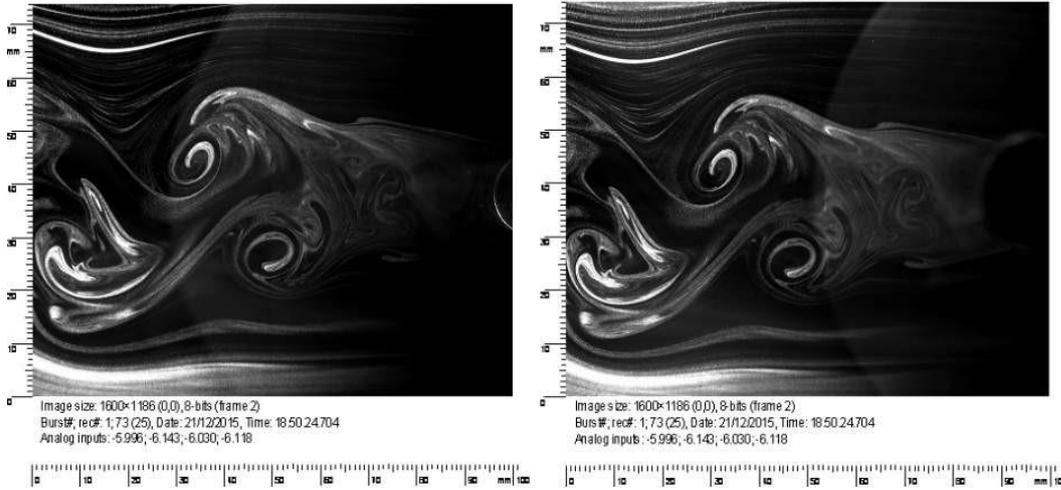


Imagen 87. Segundas fotografías de las cámaras A y B, a 0,8 m/s.

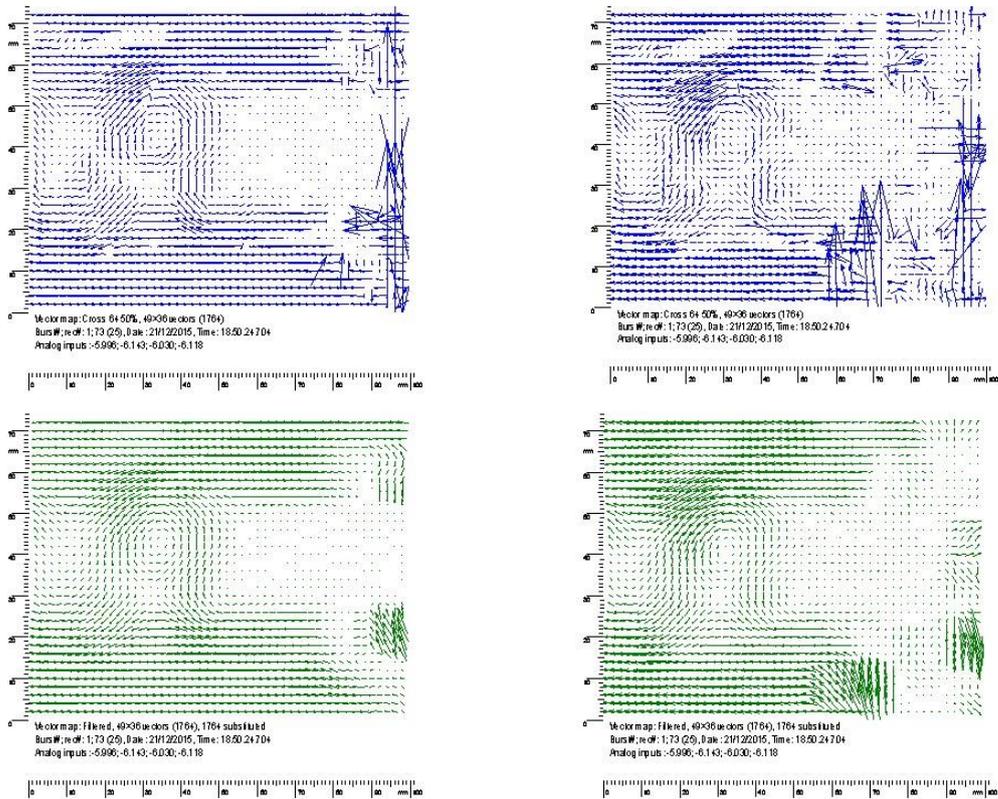


Imagen 88. Cross-correlation y Moving Average de A (iz.) y B (der.).

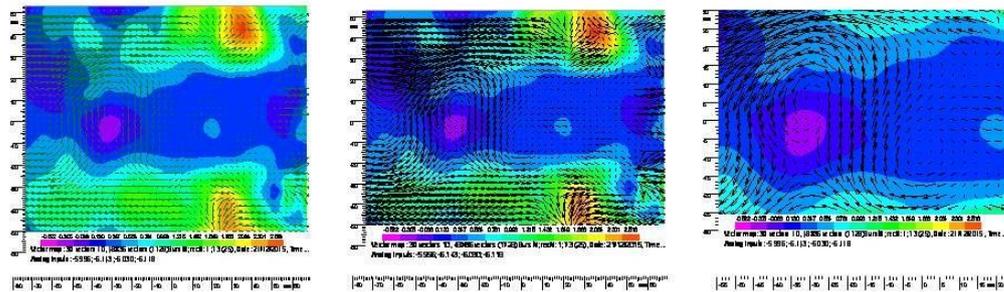
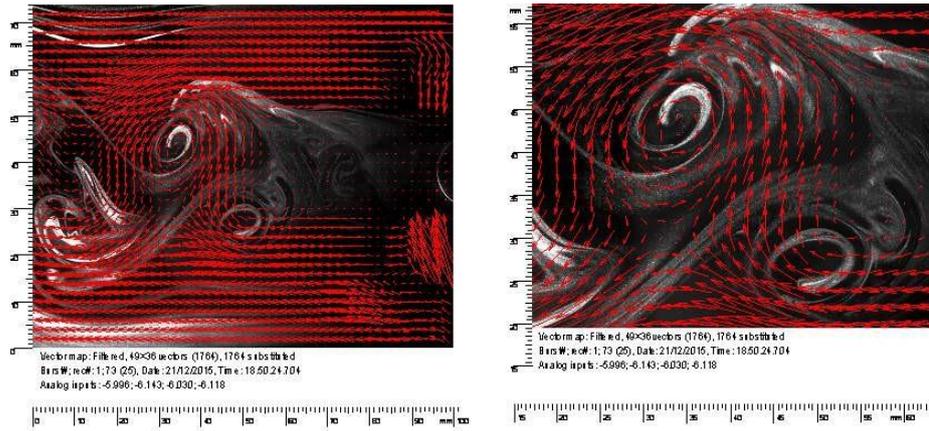


Imagen 89. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D (iz.), 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

Terceras medidas 0,8 m/s:

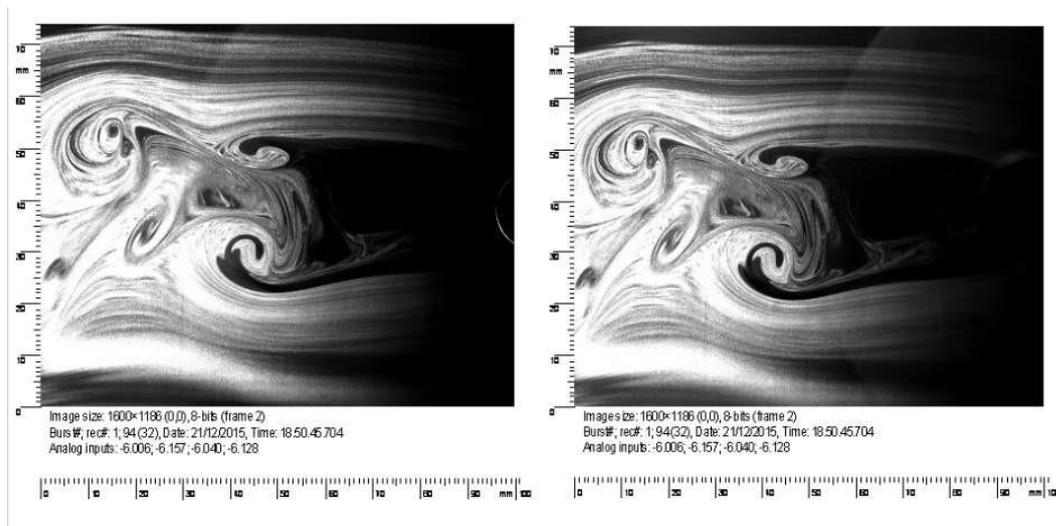


Imagen 90. Terceras fotografías de las cámaras A y B, a 0,8 m/s.

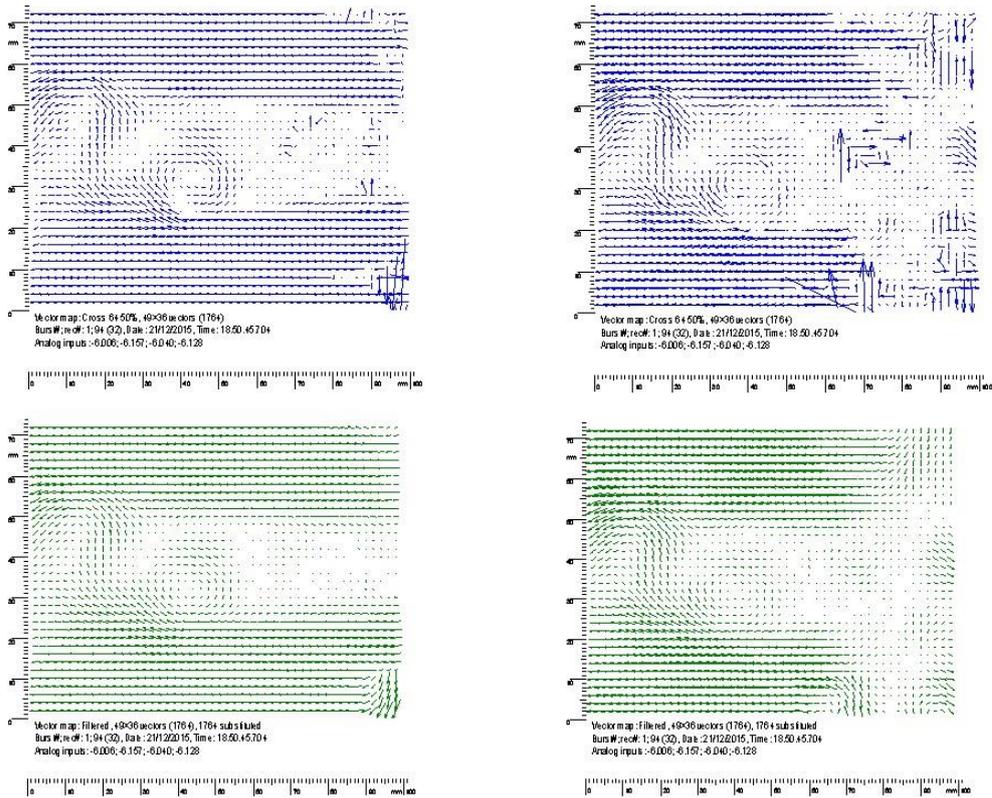


Imagen 91. Cross-correlation y Moving Average de A (iz.) y B (der.).

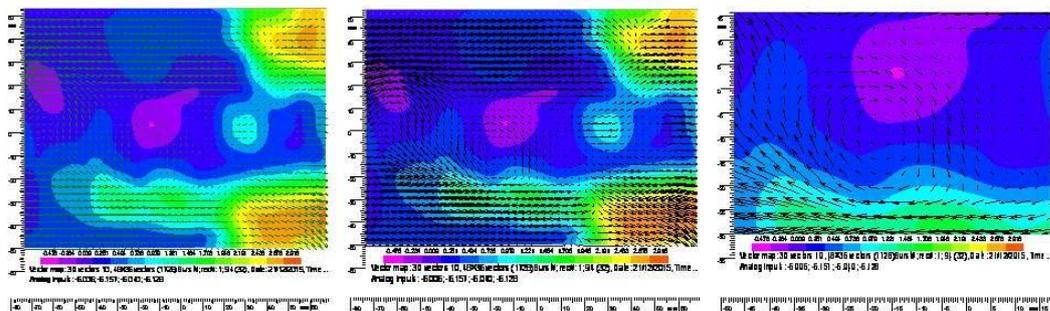
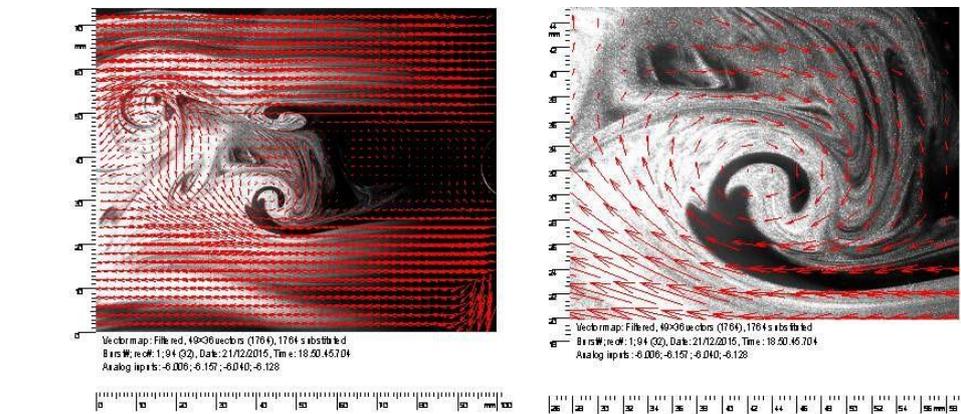


Imagen 92. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D (iz.), 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

4.6.2.2 Medidas a 1,6 m/s (10 Hz)

Primeras medidas 1,6 m/s:

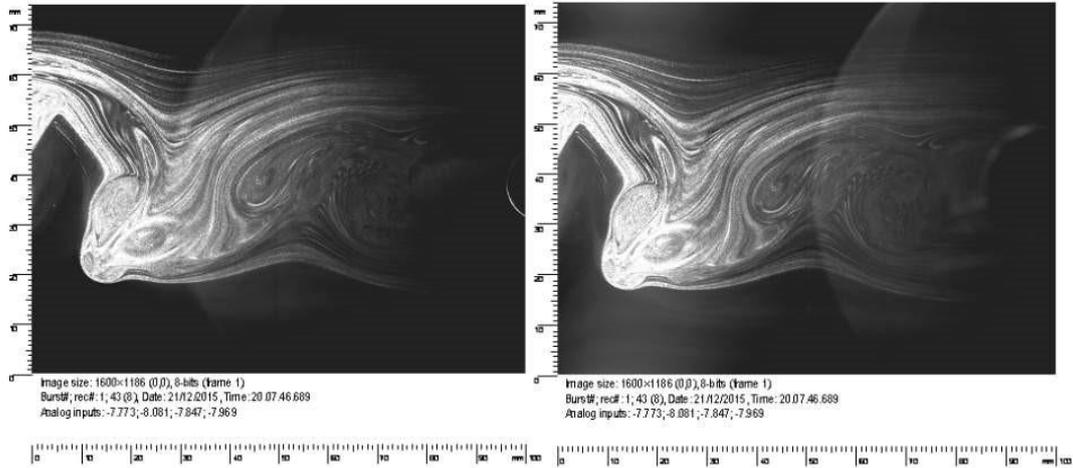


Imagen 93. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 1,6 m/s.

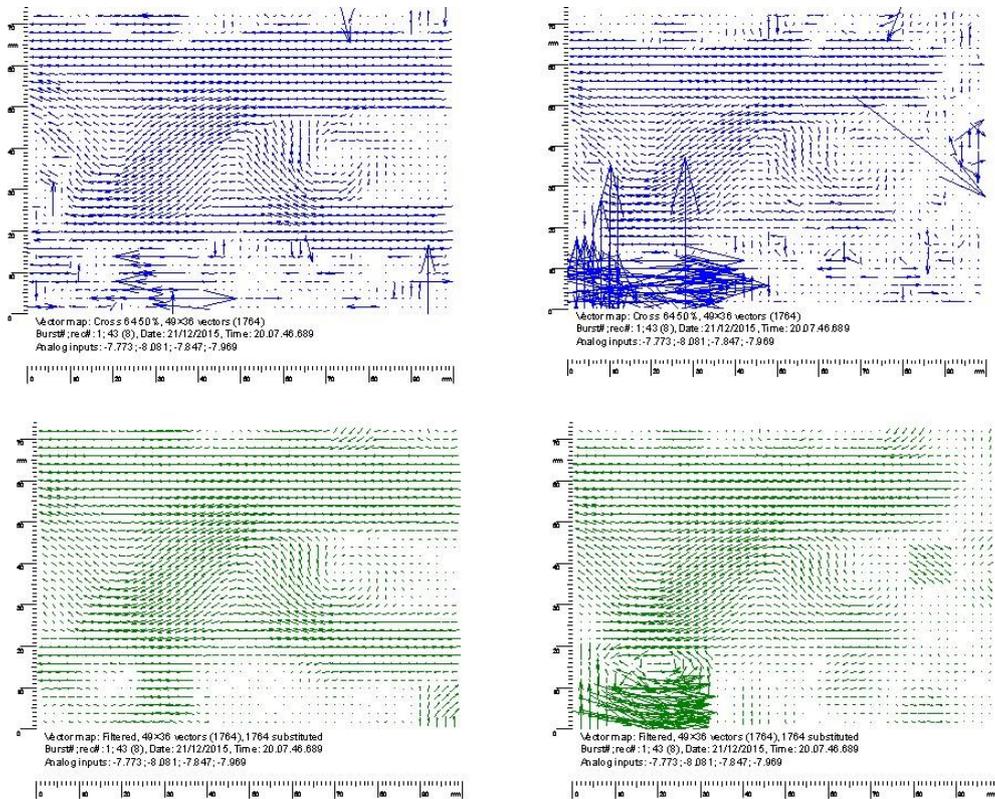


Imagen 94. Cross-correlation y Moving Average de A (iz.) y B (der.).

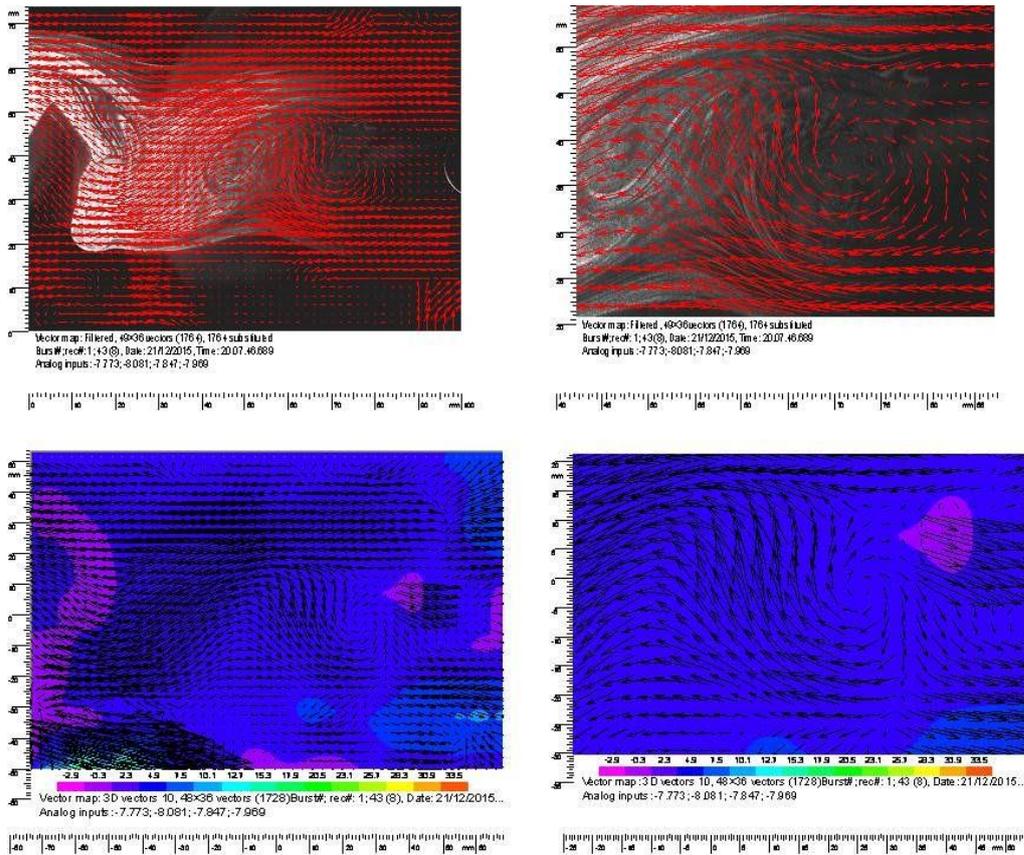


Imagen 95. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle de vórtice en 3D.

Segundas medidas 1,6 m/s:

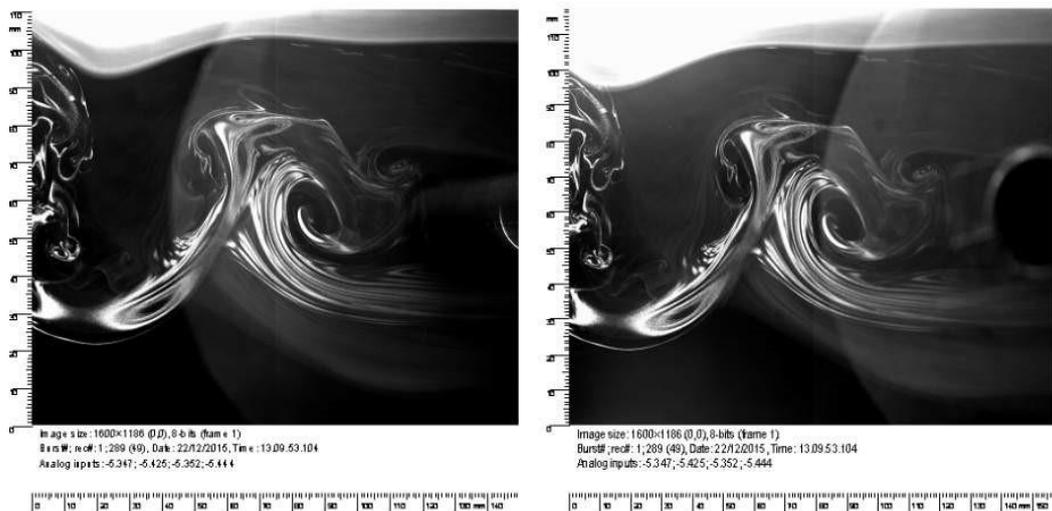


Imagen 96. Segundas fotografías de las cámaras A y B, a 1,6 m/s.

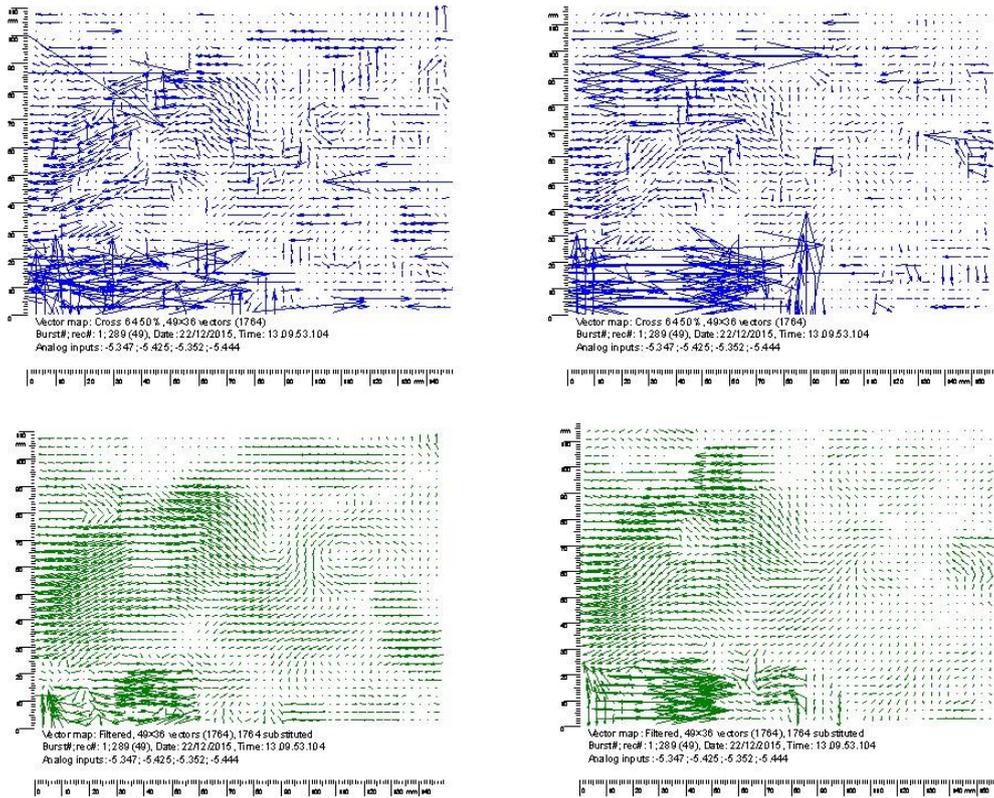


Imagen 97. Cross-correlation y Moving Average de A (iz.) y B (der.).

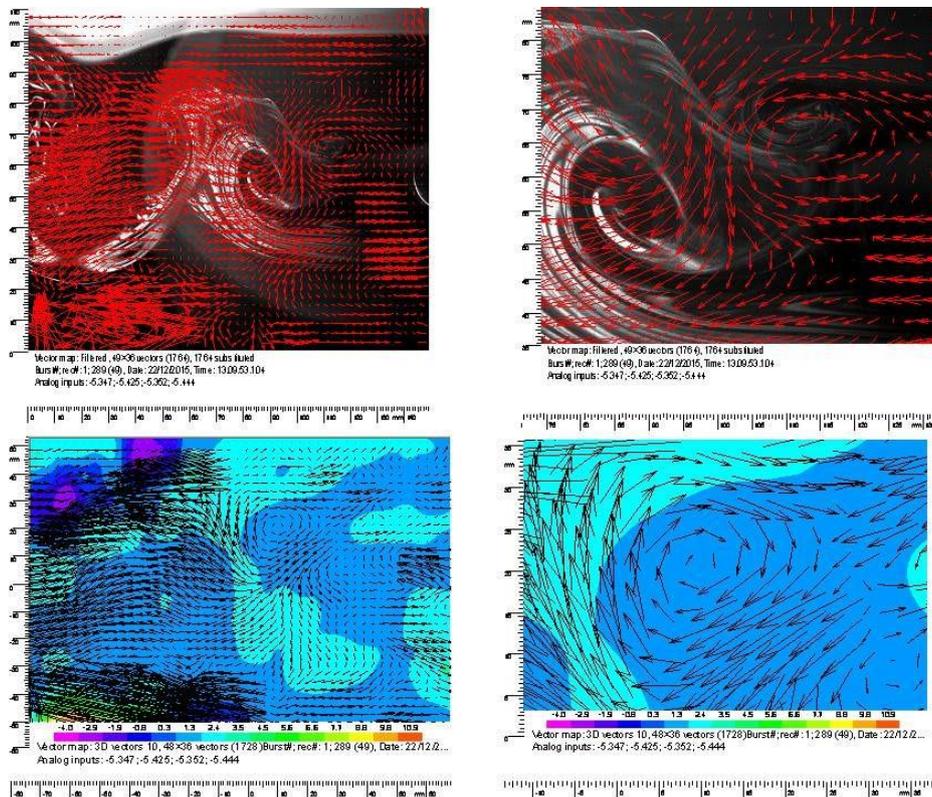


Imagen 98. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle de vórtice en 3D.

Terceras medidas 1,6 m/s:

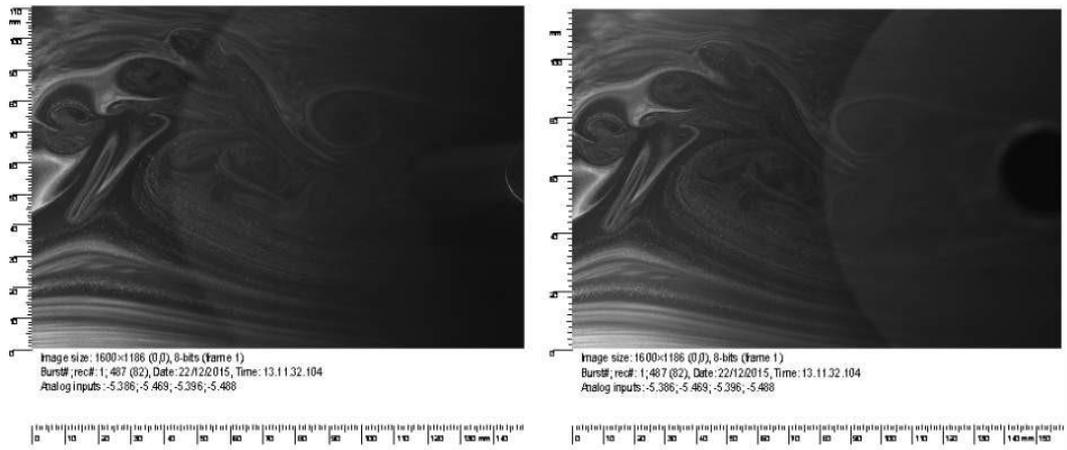


Imagen 99. Terceras fotografías de las cámaras A y B, a 1,6 m/s.

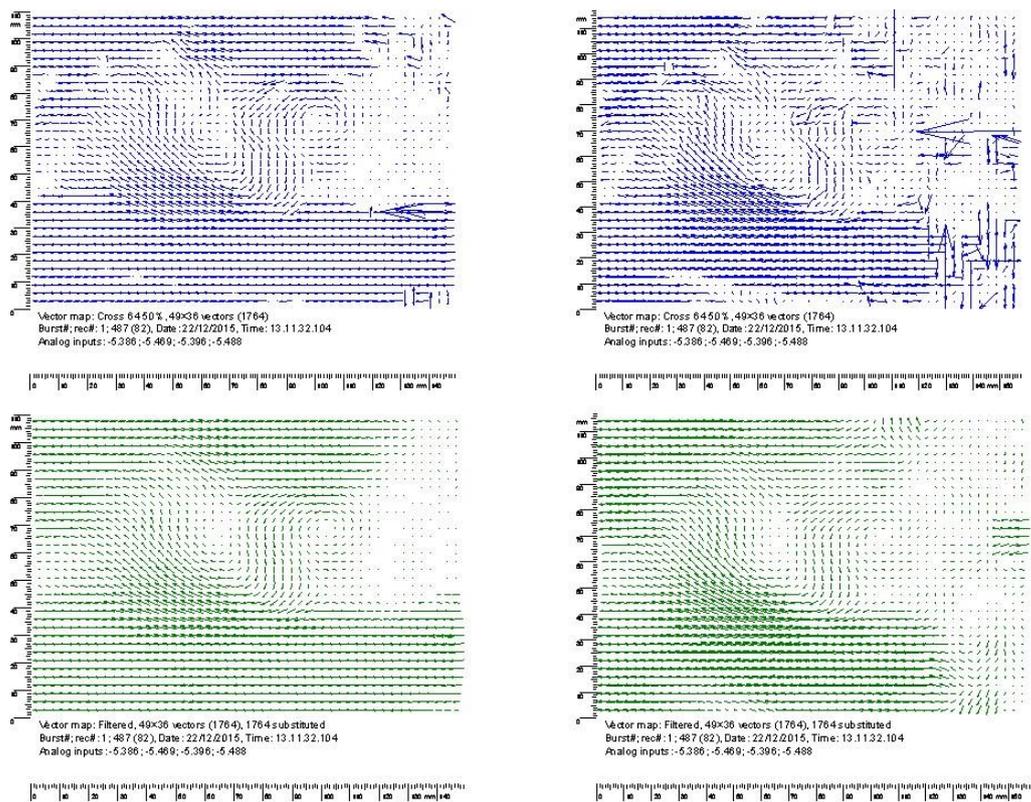


Imagen 100. Cross-correlation y Moving Average de A (iz.) y B (der.).

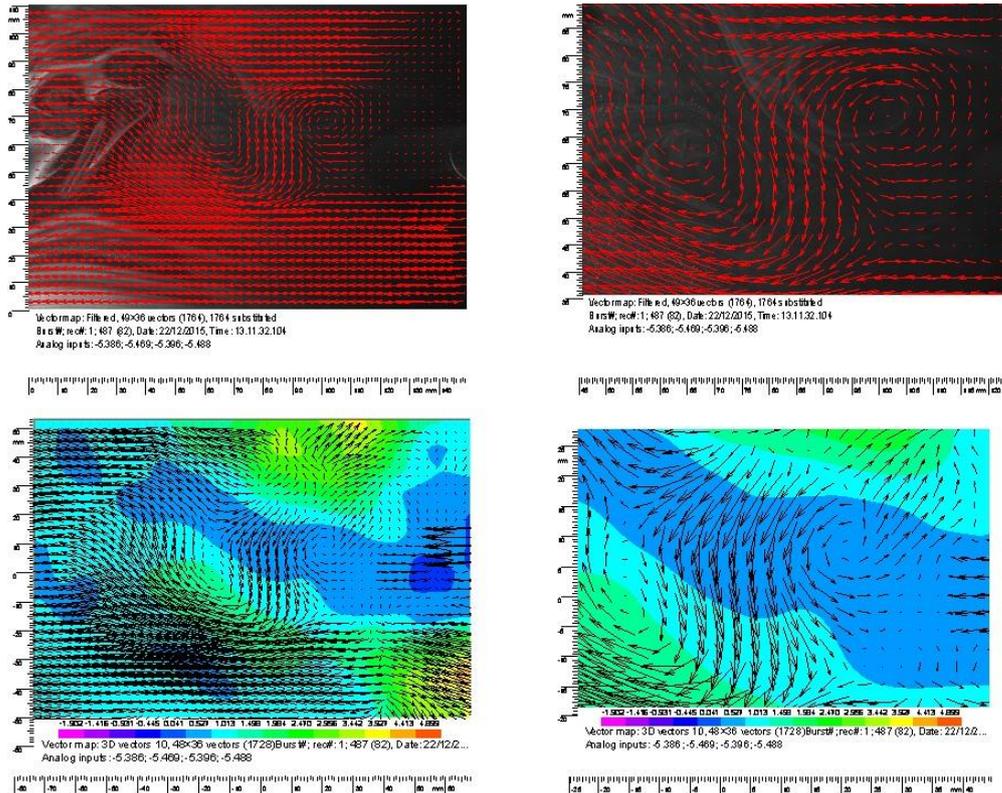


Imagen 101. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

4.6.2.3 Medidas a 2,4 m/s (15 Hz)

Como se ha indicado anteriormente, para las velocidades altas de 2,4 m/s y 3,2 m/s ha sido necesario un postproceso más exhaustivo debido a la alta velocidad de las partículas y mayor dificultad de captar los vórtices con las cámaras. Este postproceso consiste en añadir a la cross-correlation y al Moving Average un enmascarado y una validación de rango de velocidad. Los vectores en rojo mostrados en las imágenes tras el Moving Average han sido descartados por la validación de rango de velocidad, y en los mapas 3D finales ya no aparecen.

Primeras medidas 2,4 m/s:

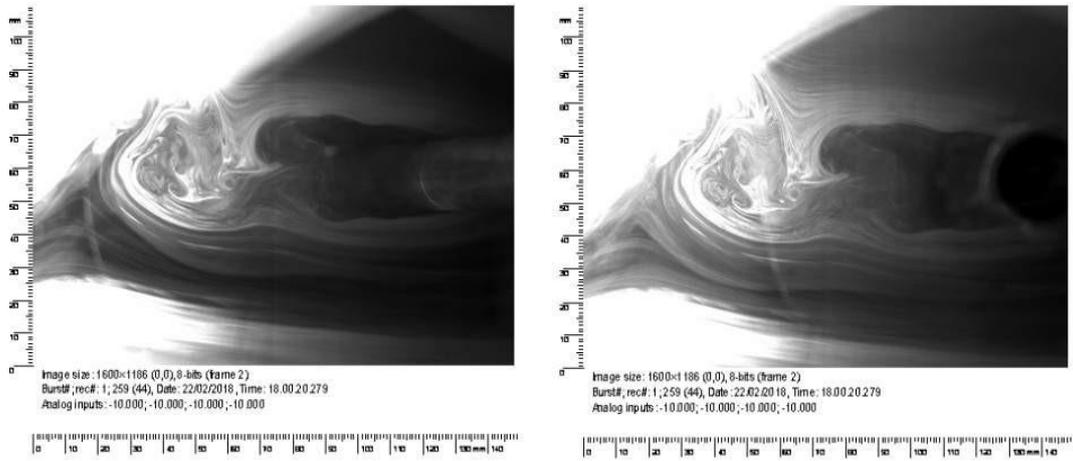


Imagen 102. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 2,4 m/s.

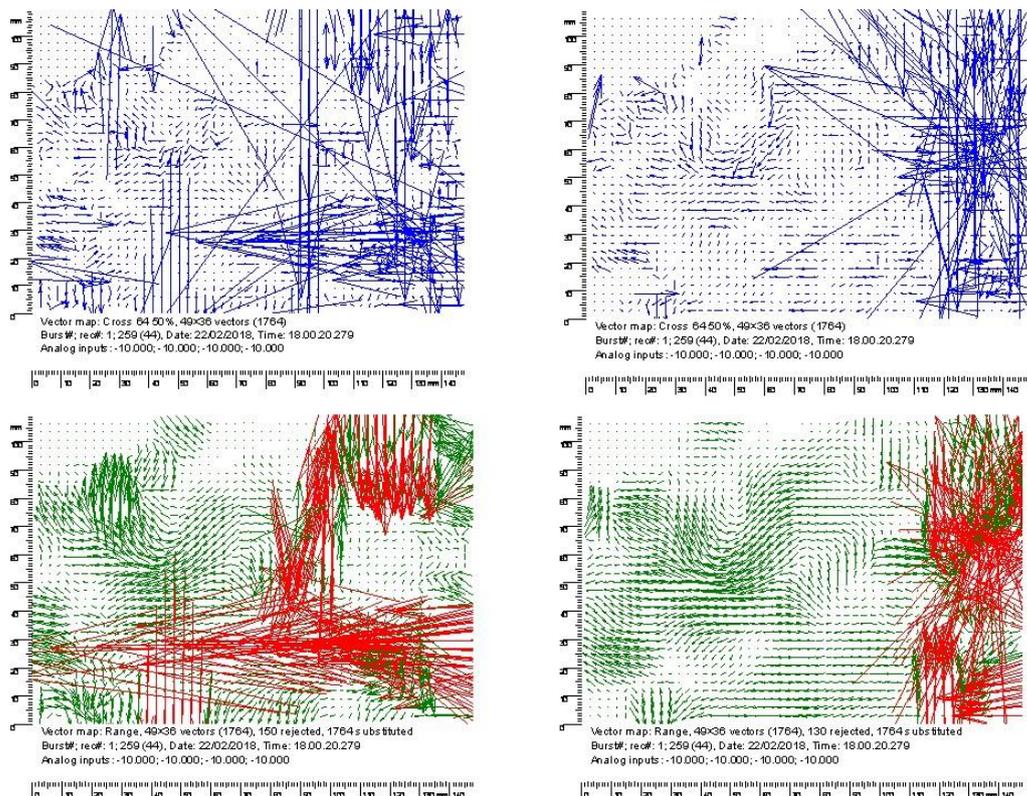


Imagen 103. Cross-correlation y Moving Average tras una validación de rango de velocidad de A (iz.) y B (der.).

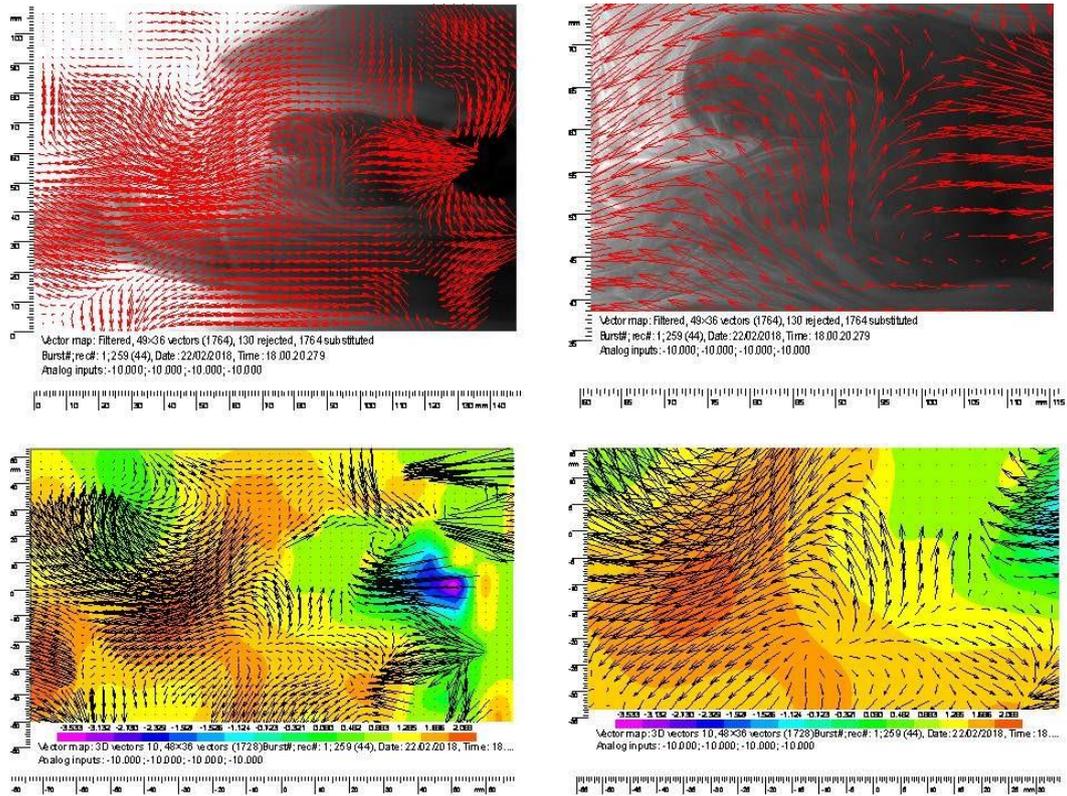


Imagen 104. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

Segundas medidas 2,4 m/s:

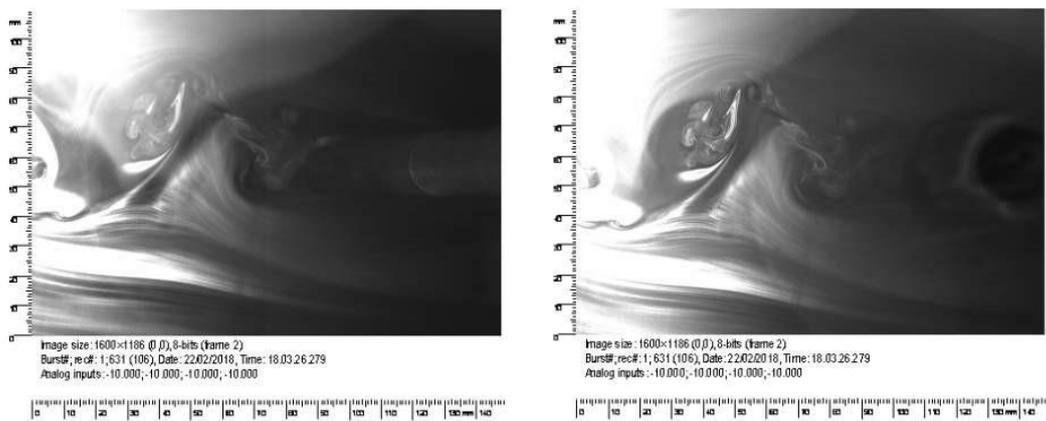


Imagen 105. Segundas fotografías de las cámaras A y B, a 2,4 m/s.

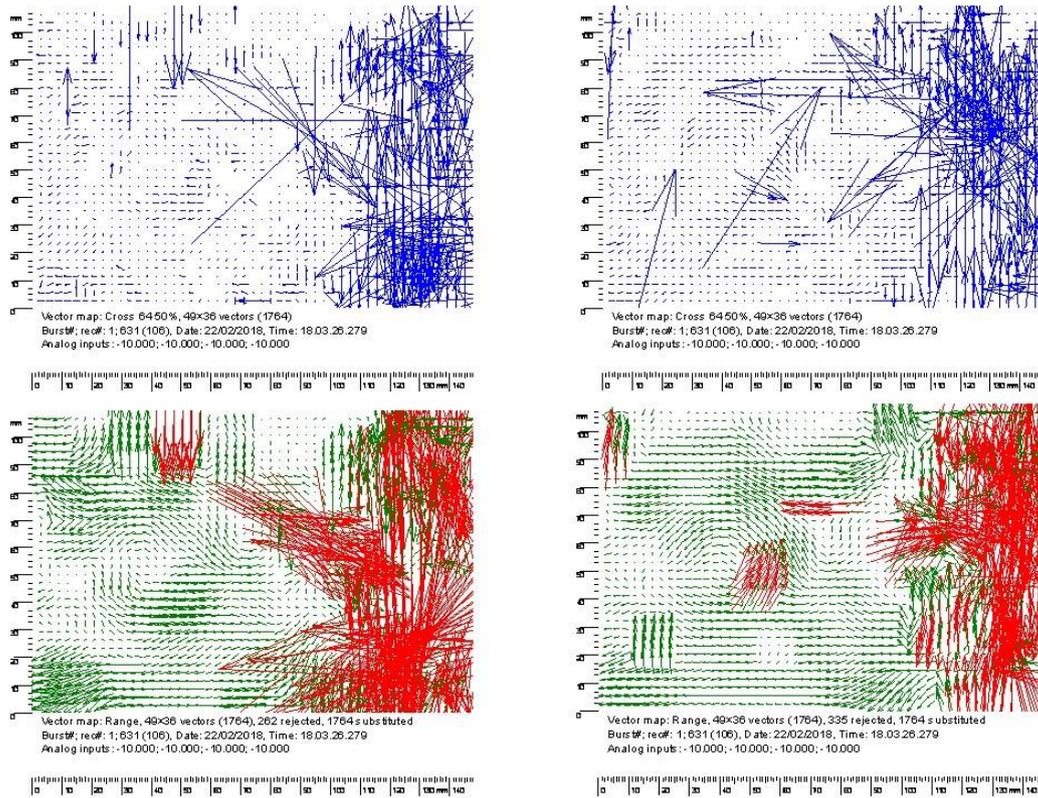


Imagen 106. Cross-correlation y Moving Average tras una validación de rango de velocidad de A (iz.) y B (der.).

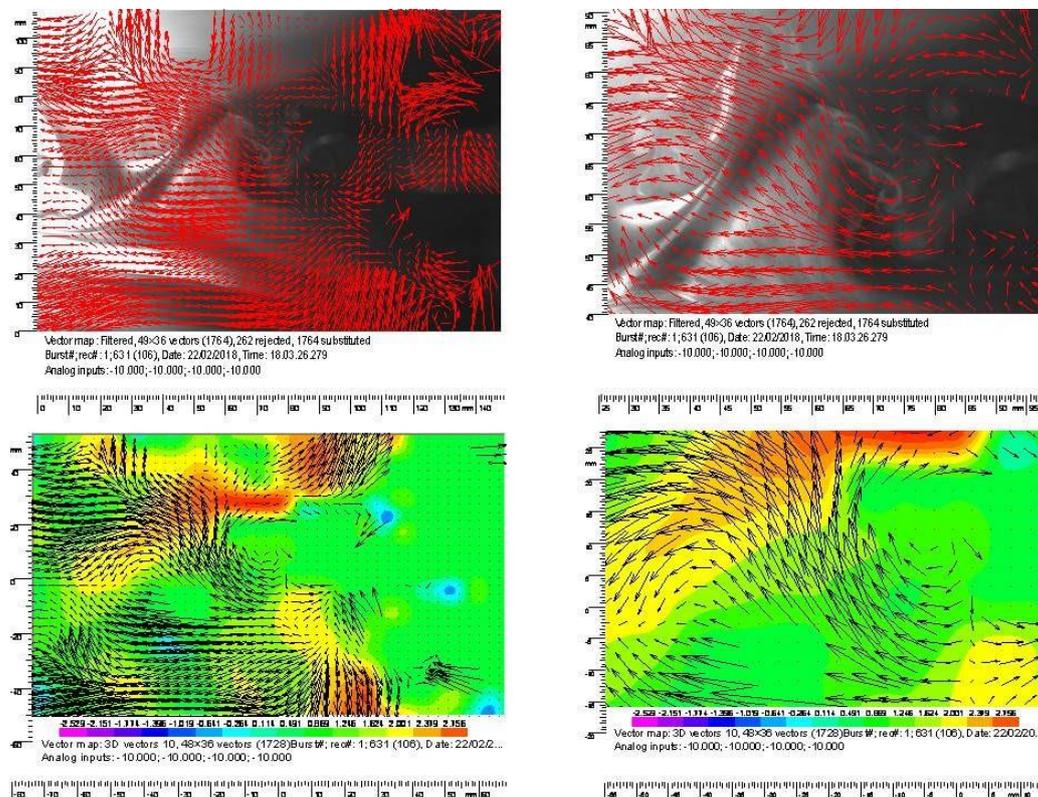


Imagen 107. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

Terceras medidas 2,4 m/s:

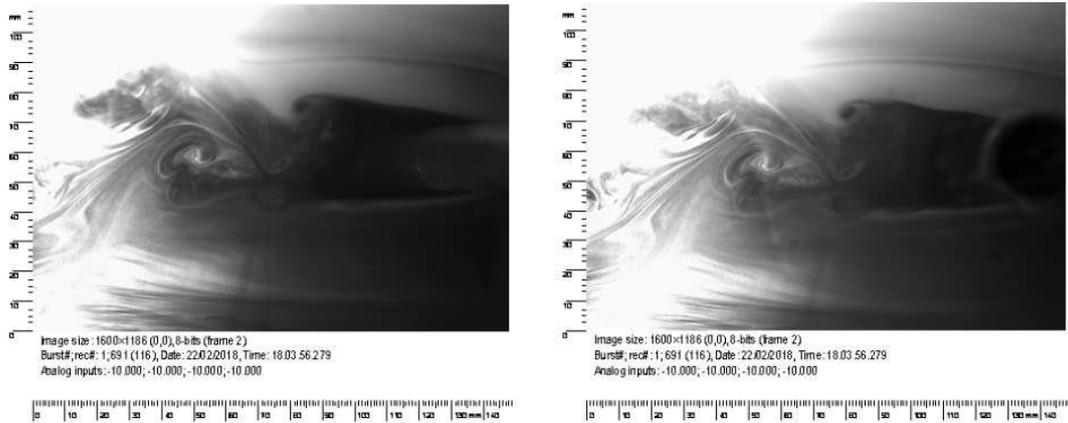


Imagen 108. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 2,4 m/s.

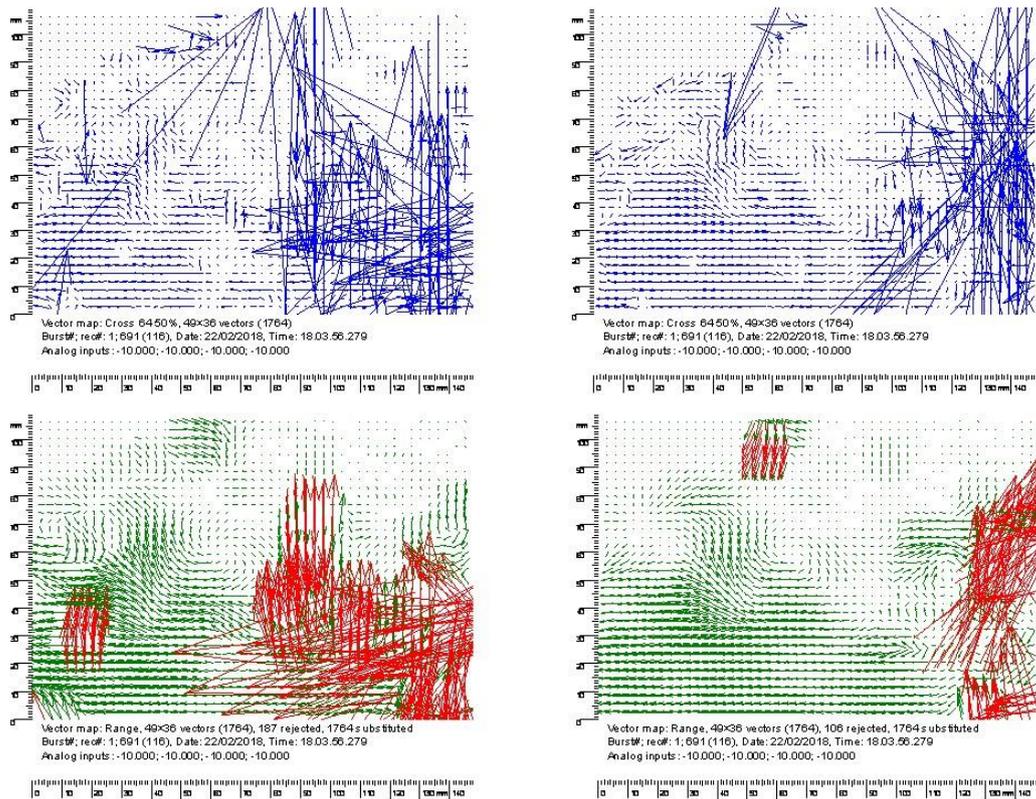


Imagen 109. Cross-correlation y Moving Average tras una validación de rango de velocidad de A (iz.) y B (der.).

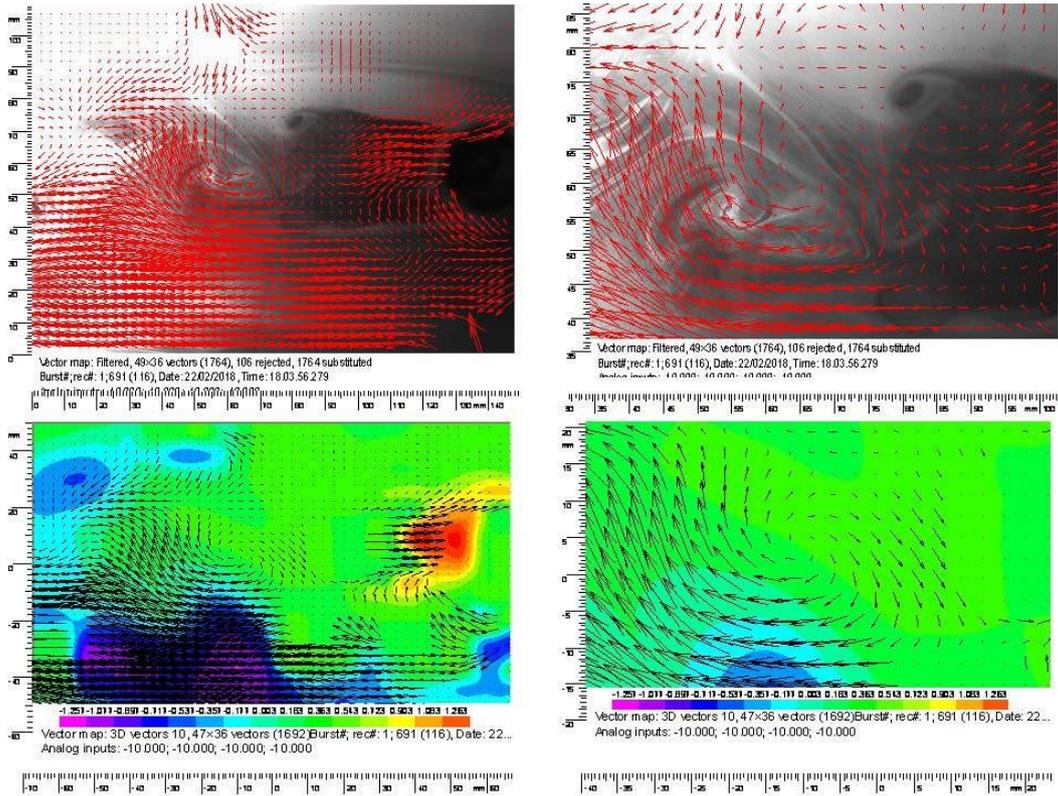


Imagen 110. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

4.6.2.4 Medidas a 3,2 m/s (20 Hz)

Primeras medidas 3,2 m/s:

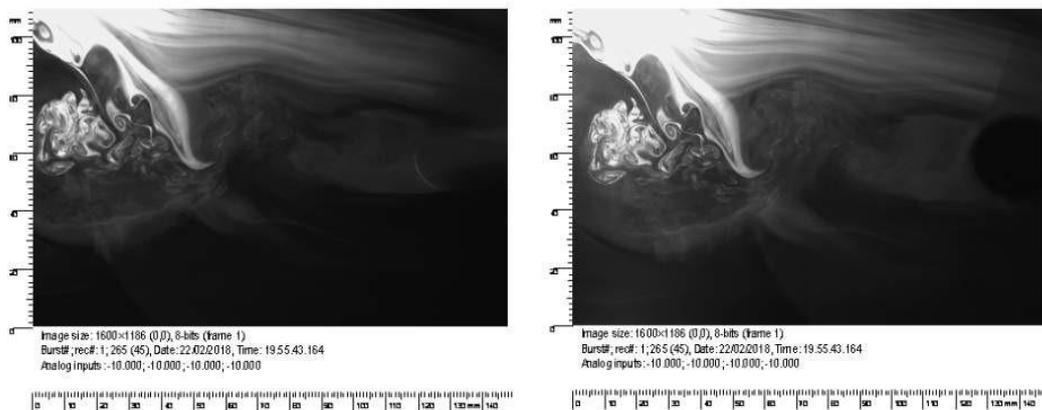


Imagen 111. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 3,2 m/s.

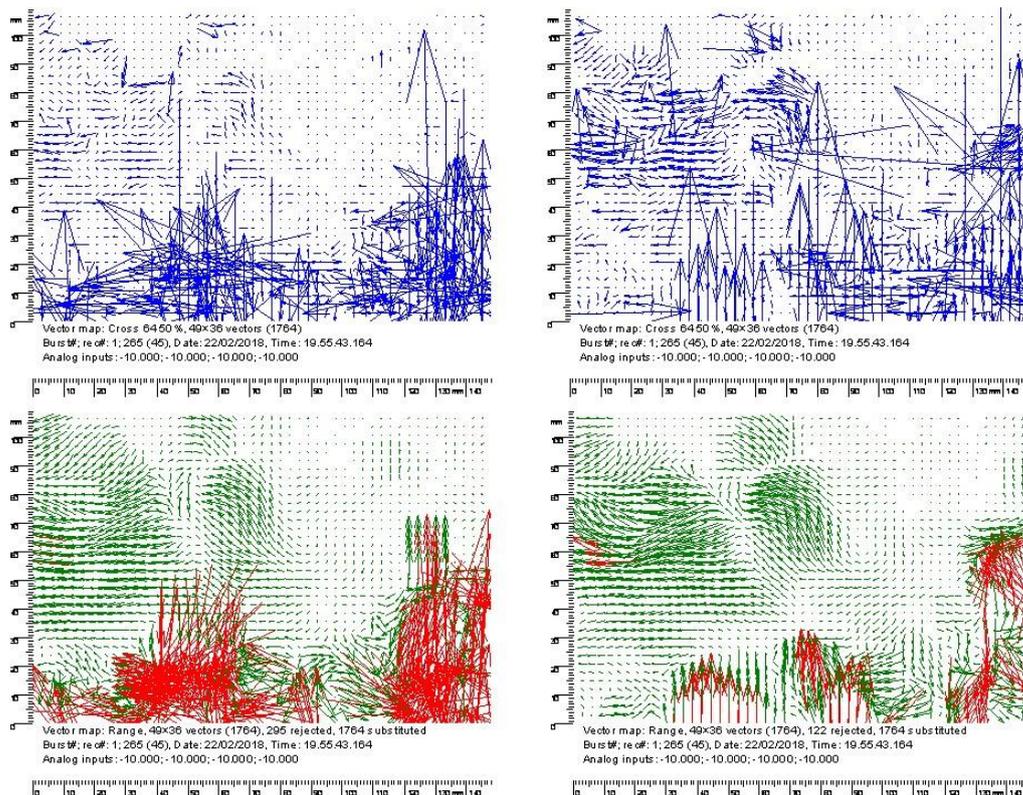


Imagen 112. Cross-correlation y Moving Average tras una validación de rango de velocidad de A (iz.) y B (der.).

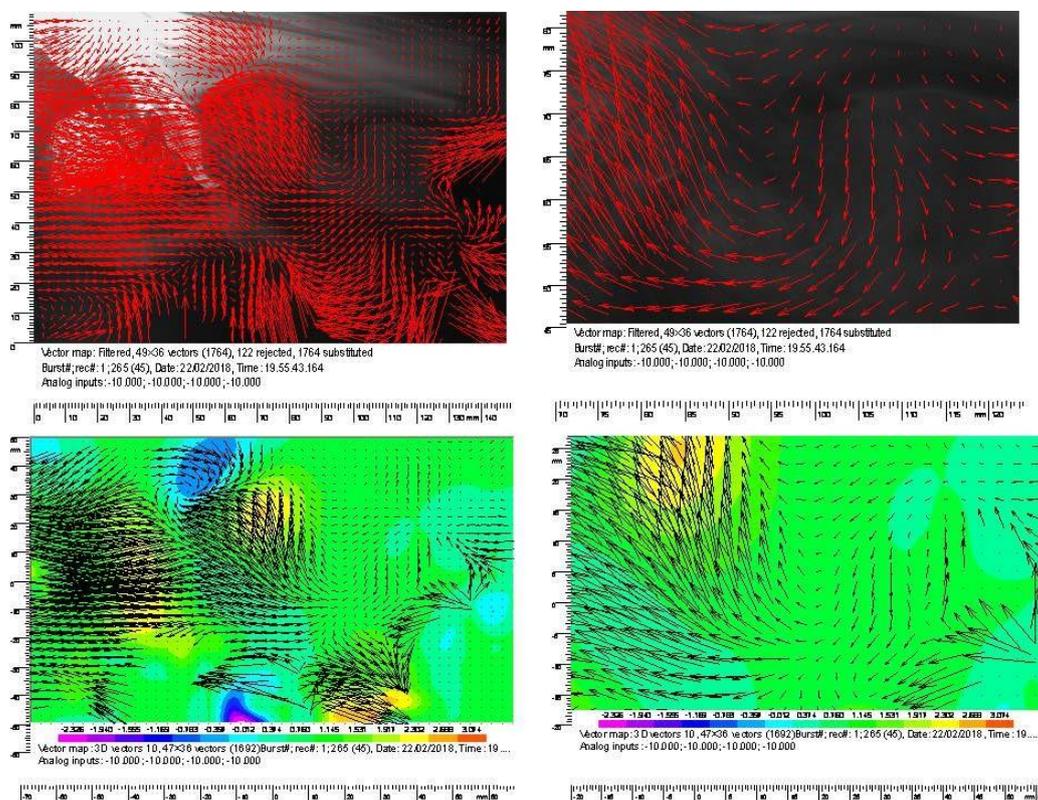


Imagen 113. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

Segundas medidas 3,2 m/s:

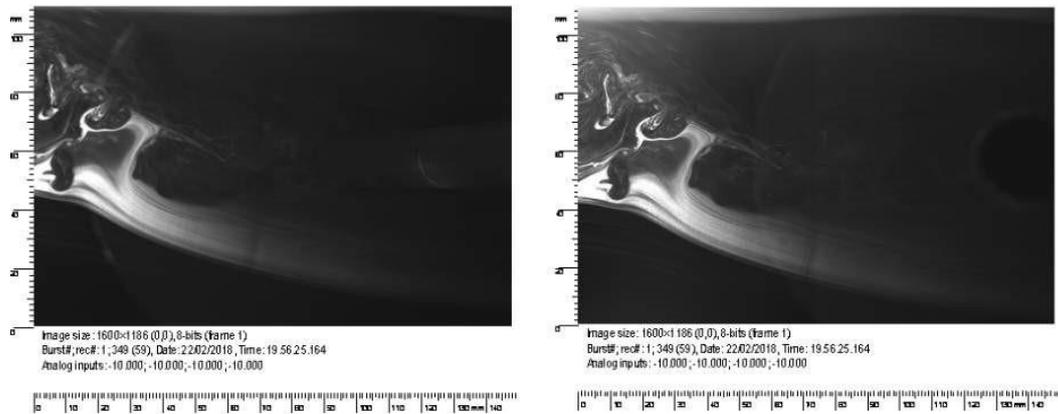


Imagen 114. Segundas fotografías de las cámaras A y B, a 2,4 m/s.

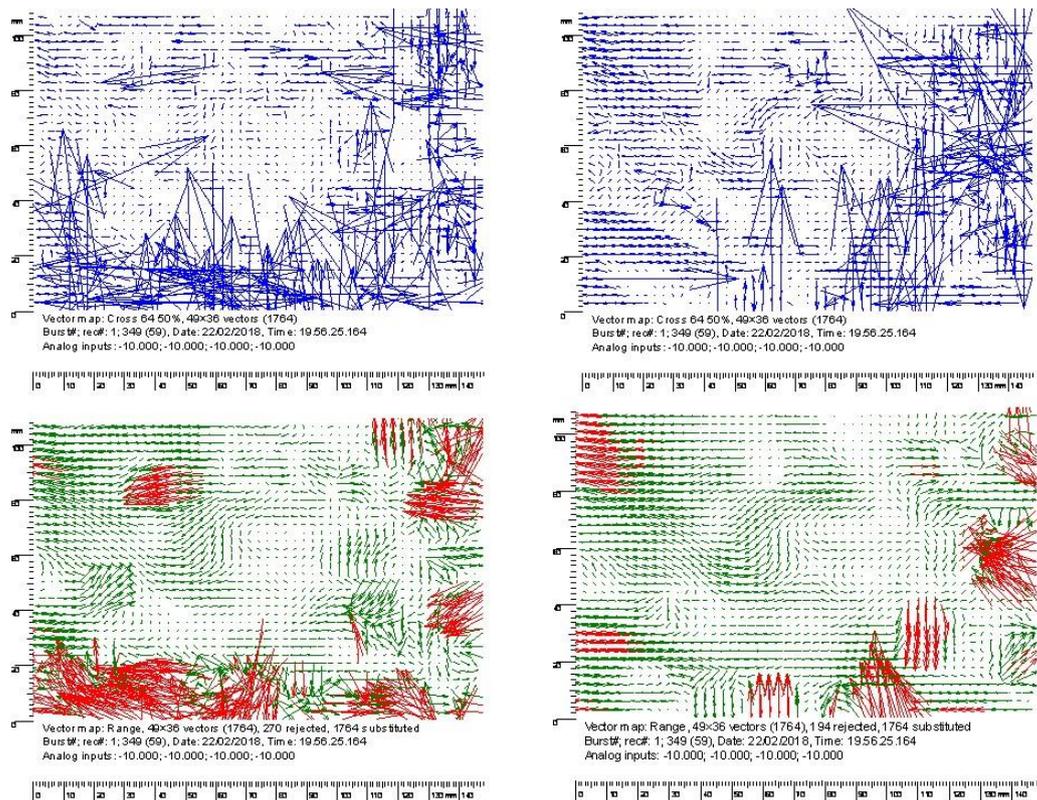


Imagen 115. Cross-correlation y Moving Average tras una validación de rango de velocidad de A (iz.) y B (der.).

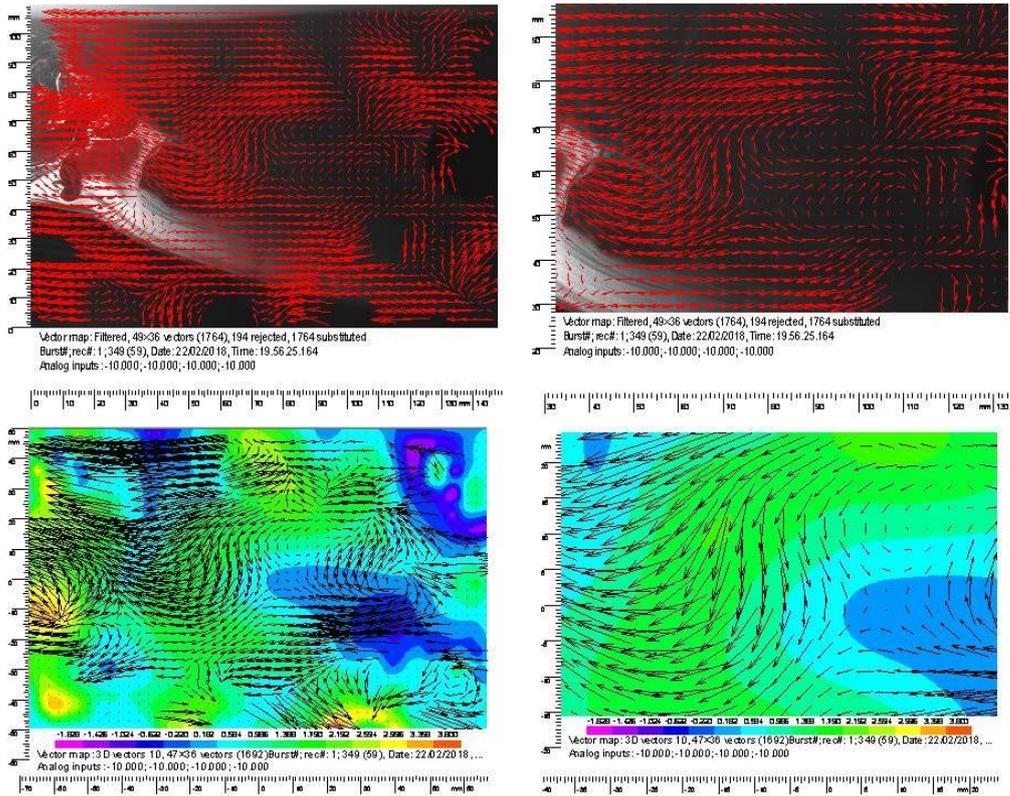


Imagen 116. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

Terceras medidas 3,2 m/s:

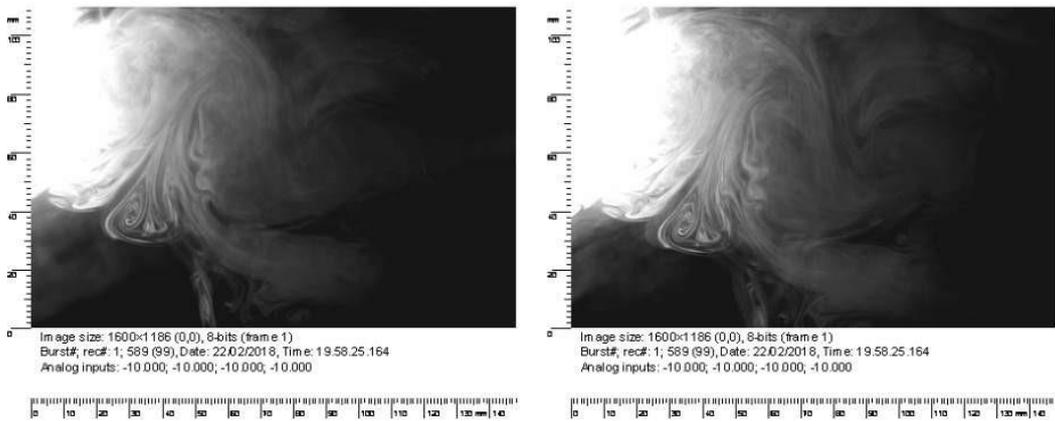


Imagen 117. Terceras fotografías de las cámaras A y B, a 2,4 m/s.

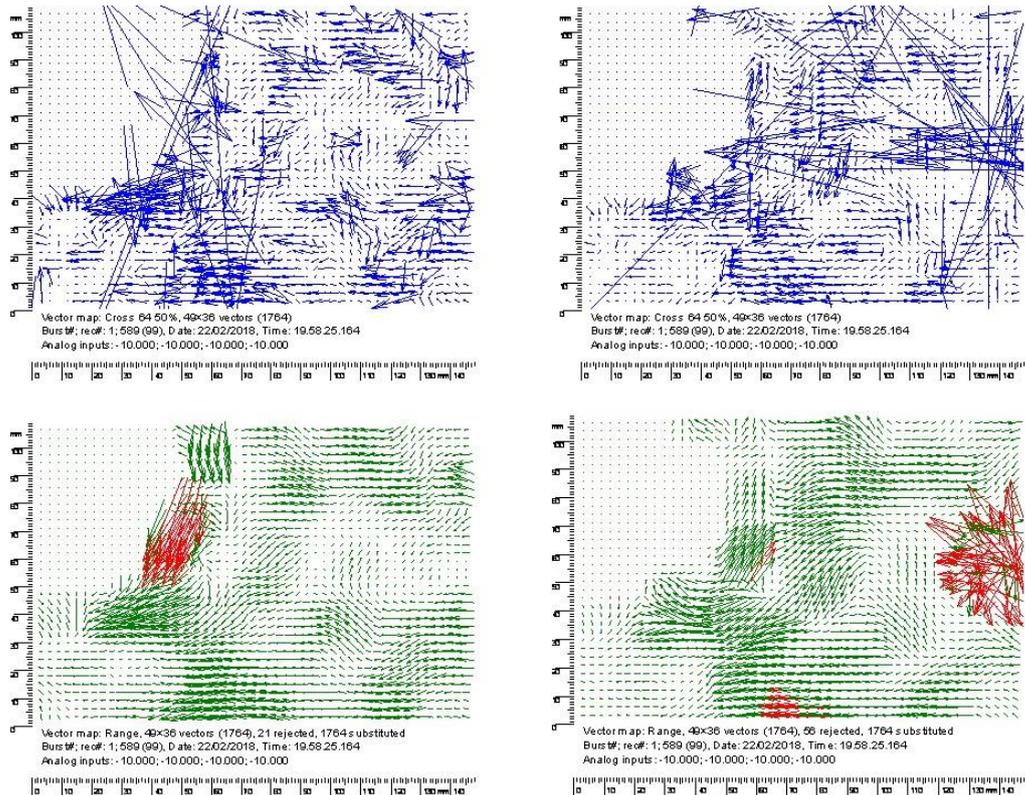


Imagen 118. Cross-correlation y Moving Average tras una validación de rango de velocidad de A (iz.) y B (der.).

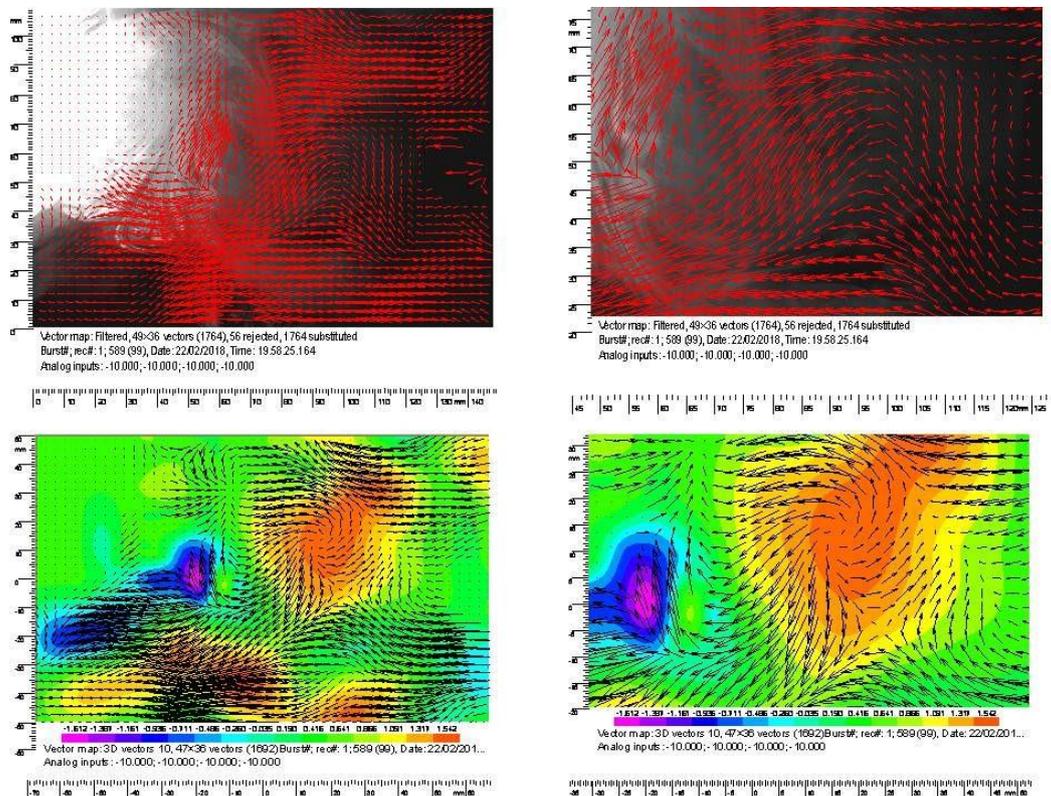


Imagen 119. (arriba) superposición de imágenes (iz.) y detalle de vórtice (der.). (bajo) 3D postprocesado y detalle del vórtice en 3D.

4.6.3 Comparación

Los resultados esperados para ambos métodos deberían ser los mismos, no obstante, debido a la consideración o no de la componente z de los vectores velocidad, se observan algunas distinciones.

Los resultados obtenidos del *PIV-standard* muestran entre uno y dos vórtices generados muy identificables a simple vista. Además, se puede observar como a medida que aumenta la velocidad media del flujo, éste admite un carácter más turbulento provocando un estrechamiento de la estela.

En cambio, los resultados obtenidos del *Stereo-PIV* captan mejor la cantidad de vórtices generados gracias a que sí que tienen en cuenta la componente z de los vectores. Se observa que el número de vórtices aumenta a medida que aumenta la velocidad del flujo con la turbulencia de éste. No obstante, con este aumento se pierde calidad de definición de los vórtices ya que como se ha explicado anteriormente, es más difícil captar los vectores velocidad por parte de las cámaras fotográficas, a pesar el mayor exhaustivo post-procesamiento que se lleva a cabo para las velocidades mayores.

5. FLUJO ALREDEDOR DE UN COCHE SOLAR

Indice:

5.1 Coche solar

5.1.1 *Funcionamiento*

5.1.2 *Honda "Dream" '96*

5.2 Aspectos generales aerodinámica en los vehículos.

5.3 Emilia4

5.3.1 *Dimensiones*

5.3.2 *Maqueta laboratorio*

5.4 Cálculo Número de Reynolds

5.5 Medidas

5.5.1 *Medidas a 0,8 m/s (5 Hz)*

5.5.2 *Medidas a 1,6 m/s (10 Hz)*

5.5.3 *Medidas a 2,4 m/s (15 Hz)*

5.5.4 *Medidas a 3,2 m/s (20 Hz)*

5.1 Coche solar.

Un coche solar es aquél que obtiene energía de paneles solares instalados en su carrocería. Funcionan como los coches eléctricos, comparten motor, la diferencia es de donde se extrae la energía de cada uno.

El principal problema que presentan es la escasa autonomía debido a la poca eficiencia de las placas solares, pero se están estudiando mucho para conseguir ponerlos en el mercado a medio plazo. Para mejorar su autonomía, los aspectos más estudiados son:

- Diseño orientado a disminuir su resistencia aerodinámica
- Fabricación con materiales de bajo peso

5.1.1 Funcionamiento

Gracias a los paneles solares instalados en la carrocería, se absorbe energía solar que se transforma en energía eléctrica, almacenable en baterías, o que va directamente al motor. Esta energía eléctrica es de la que se alimenta el motor eléctrico.

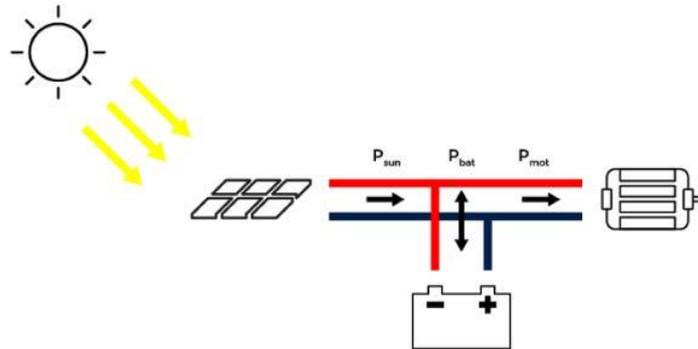


Imagen 120. Esquema funcionamiento coche solar.

El principal problema es la baja eficiencia que presentan las placas solares, 26% hoy en día, y el bajo potencial energético que presentan por unidad de masa respecto a los coches gasolina.

Por otro lado, contamos con la dependencia del sol para el recargo de las baterías, cosa que varía mucho dependiendo del país o la zona.

A pesar de ser una idea muy atractiva, no parece una opción eficiente y viable. De momento las mejores aplicaciones solares en los automóviles son la utilización de éstas como sistemas de energía complementarios, para alimentar sistemas como climatizadores, las luces o multimedia.

5.1.2 Honda "Dream" '96

El Honda Dream del 96 ganó el *World Solar Challenge* el 20 de noviembre de 1993. 3000 km de carrera australiana, desde Darwin a Adelaida, con velocidad media de 84,96 km/h y máxima de 125 km/h, en un tiempo de 35 horas y 38 minutos... todo esto costó 4,5 millones de libras. El éxito de su victoria fue en gracias a dos factores:

- Motor eléctrico de bajas revoluciones en el cubo de la rueda trasera.
- El sistema aerodinámico con diseño en forma de atún.
- Forma curva permitiéndole captar rayos de sol por la mañana y por la tarde.
- Sistema motriz de tres ruedas incorporadas en la estructura general.

Lograr algo así no fue nada fácil, numerosos estudios e investigaciones para mejorar el rendimiento del coche en todos sus aspectos. En cuanto al aerodinámico se hicieron muchos prototipos que se sometieron a distintas pruebas aerodinámicas dando los siguientes resultados:

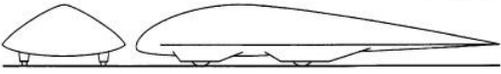
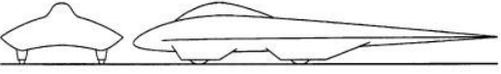
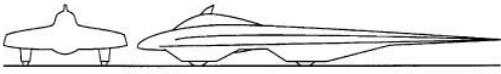
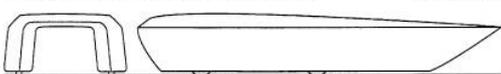
	Basic shapes	$C_D \times A$
A	The four-wheel, modified '93 Dream  $A = 1.064 \text{ m}^2$	0.126
B	The laminar flow airfoil image type 1  $A = 0.952 \text{ m}^2$	0.108
C	The laminar flow airfoil image type 2  $A = 0.947 \text{ m}^2$	0.119
D	The type focusing on generated output  $A = 1.095 \text{ m}^2$	0.185

Tabla 10. Estudio aerodinámico Honda Dream.

El objetivo era reducir todo lo posible el área frontal del vehículo y el coeficiente C_D para conseguir la menor resistencia aerodinámica. Por ello se eligió el modelo B, que tras otras modificaciones adicionales consiguió reducirse la resistencia a 0,101.

Una de estas modificaciones fue el estrechamiento de la cola, que anteriormente les daba miedo porque se disminuía el área de paneles solares posterior, pero al realizarla se mejoró su rendimiento global.

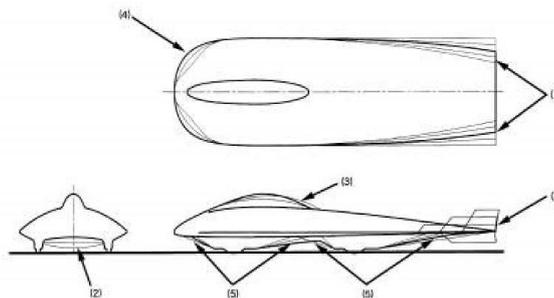


Imagen 121. Modificaciones modelo B.



Imagen 122. Honda Dream '93.



Imagen 123. Honda Dream '96.

5.2 Aspectos generales aerodinámica en los vehículos.

Uno de los principales objetivos del ser humano en las últimas décadas ha sido mejorar el rendimiento de los vehículos, y una forma de lograrlo es reduciendo la resistencia aerodinámica a la que se someten.

Esto se ha estudiado mucho más a fondo en los vehículos de competición, en concreto en la F1, donde la aerodinámica va a hacer que logren mayores velocidades punta, mejor toma de curvas y que no salgan volando despegándose del suelo.

La mejor manera de estudiar este aspecto es mediante la maquetización de los vehículos, siempre con el factor de escala adecuado para poder estudiarlos en laboratorios adaptados.

Los factores que condicionan el arrastre aerodinámico en los vehículos son los mismo que los citados anteriormente para el caso de un cilindro y de los aviones. Sin embargo, la resistencia inducida afecta a los vehículos en ciertos lugares creando vórtices que conviene aclarar.

En el caso de los vehículos cabe estudiar este fenómeno en los picos locales que presentan. Por ejemplo, la corriente que circula por el lateral de un coche choca con la que descende de la ventana trasera, generando vórtices en las extremidades. Además de en otros puntos que se muestran en la siguiente imagen:

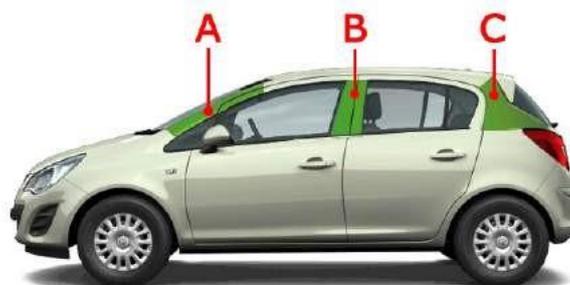


Imagen 124. Canalizaciones verticales a tener en cuenta la resistencia inducida.

Los vórtices en el punto C provocan una disminución de la presión retrasando la separación de la vena fluida, a causa de la elevada energía cinética que presentan.

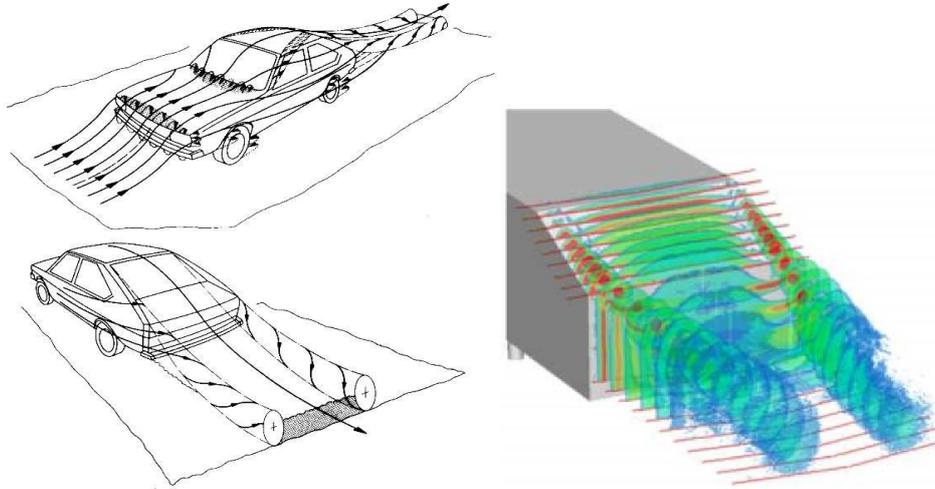


Imagen 125. Vórtices generados en el punto C.

5.3 Emilia4

El Emilia 4 es el coche que se ha estudiado en esta tesis, y que participará en el *American Solar Challenge*, en la categoría *Crucero*, el mes de Julio de 2018. Se estima que alcance los 110 km/h consumiendo la energía de un secador de pelo.



Imagen 126. Emilia4.

Algunas de las características técnicas que presenta son:

- Peso de aproximadamente 200 kg
- Autonomía de 200 km
- Velocidad máxima: 110 km/h
- 4 asientos
- Estructura de fibra de carbono

Las siguientes imágenes muestran algunos procesos y fases de laminación de carbono para la fabricación de algunas de las piezas que componen al Emilia4:



Imagen 127. Laminación de un círculo (iz.). Curación de éste (der.).



Imagen 128. Rodadura de las puertas (iz.). Resultado puertas tras curación (der.).

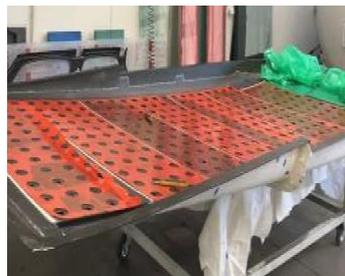


Imagen 129. Laminación del tejado (iz. y med.) Curación de éste (der.).



Imagen 130. *Chasis (iz.) Recubrimiento del chasis (der.).*



Imagen 131. *Estructura Emilia4.*

5.3.1 Dimensiones

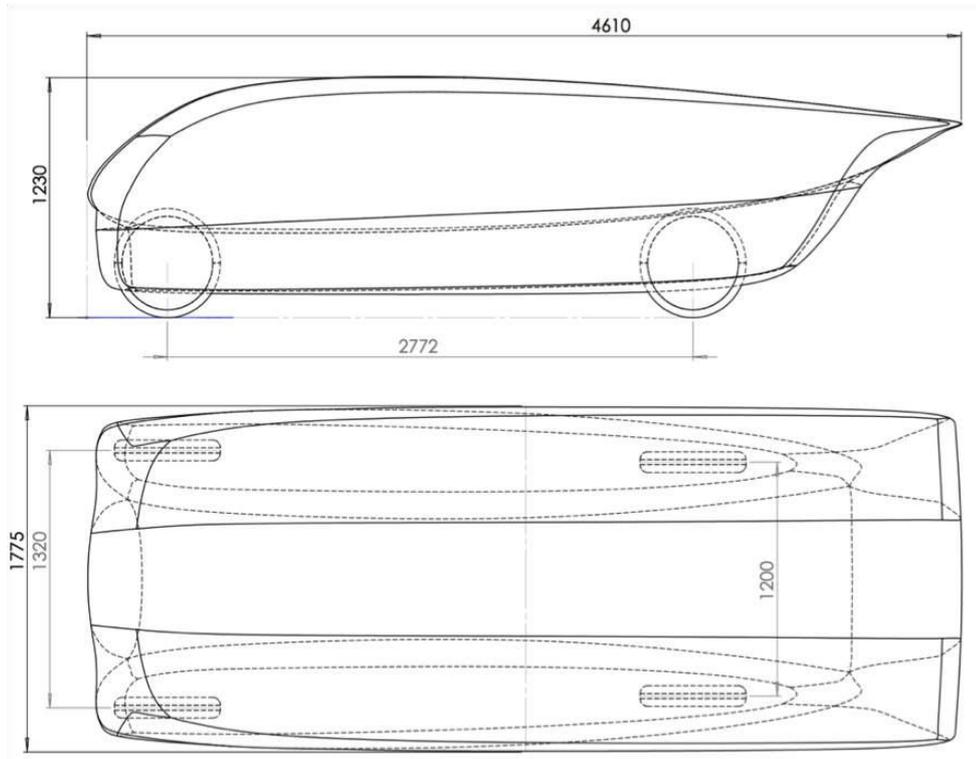


Imagen 132. Vista frontal y horizontal con dimensiones en mm.

Uno de los aspectos más estudiados para mejorar el rendimiento del Emilia4 es su resistencia aerodinámica. A diferencia del Honda Dream '96, el techo es casi plano, buscando más una disminución de los efectos aerodinámicos que una mejor captación de rayos de sol. Además, el vehículo no contiene bordes afilados, sobre todo en el frente, para evitar formaciones turbulentas y separaciones de capa límite. También destacar la forma de perfil de ala buscando una baja presión descendente. Por último, las ruedas están parcialmente contenidas en el chasis, disminuyendo así la resistencia aerodinámica que éstas pueden presentar.

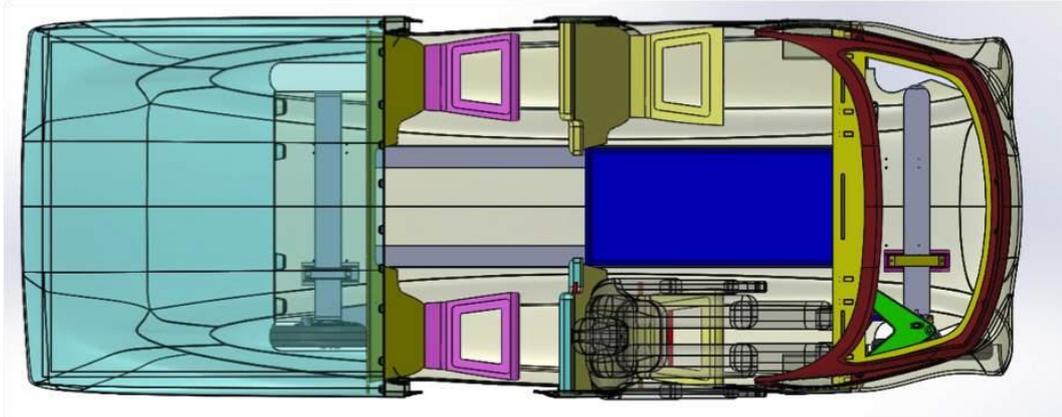


Imagen 133. *Diseño CAD Emilia4, vista horizontal.*

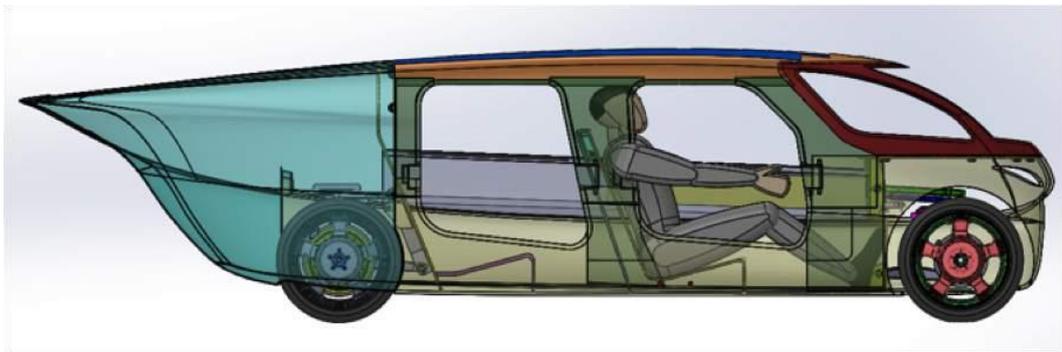


Imagen 134. *Diseño CAD Emilia4, vista frontal.*

5.3.2 Maqueta laboratorio

La manera de estudiar el Emilia4 en el laboratorio ha sido mediante una maqueta a escala 1:18, obtenida mediante impresión 3D, y eliminación de imperfecciones en la impresión. Antes de proceder a los ensayos, se ha pintado de negro mate para evitar reflejos provocados por la luz láser.

La disposición de la máquina dentro de la cámara de ensayos para una correcta experimentación era con el coche dispuesto en el suelo de la cámara, de manera que coincidiera la línea central del vehículo con el plano de la hoja luminosa, y los lados paralelos a las paredes de la cámara.



Imagen 135. Maqueta Emilia4 utilizado para la toma de medidas.

5.4 Cálculo Número de Reynolds

Expresado el número de Reynolds de la siguiente forma:

$$R_e = \frac{\rho u D}{m}$$

Asumimos que el fluido de trabajo tiene las mismas características que el aire en condiciones estándar: $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (densidad), $m = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa*s)}$ (viscosidad dinámica). La dimensión D es el ancho del modelo del Emilia4 con el que se hicieron las medidas, $D = 0,1 \text{ m}$ y las velocidades son las calculadas con el tubo de Pitot.

Por tanto, el número de Reynolds para cada una de estas velocidades es igual a:

VELOCIDAD (m/s)	NÚMERO DE REYNOLDS
0,8	$5,41 \cdot 10^3$
1,6	$1,1 \cdot 10^4$
2,4	$1,62 \cdot 10^4$
3,2	$2,16 \cdot 10^4$

En este experimento el fluido es turbulento para todas las velocidades con las que se trabaja en el laboratorio.

Comparando con los números de Reynolds calculados para el experimento del cilindro, observamos que para el coche son mucho mayores. Esto quiere decir que los flujos son más turbulentos en parte por la componente z de los vectores velocidad. Es por ello la dificultad que presentan a la hora de obtener resultados mediante la técnica estéreo-PIV.

5.5 Medidas

Las medidas calculadas en el laboratorio para el Emilia4 se han obtenido para las velocidades medias calculadas sin el tubo extractor de gases de escape.

0,8 m/s (5 Hz), **1,6 m/s** (10 Hz), **2,4 m/s** (15 Hz) y **3,2 m/s** (20 Hz).

Una vez captados los fotogramas cada 100 ms se han podido extraer las conclusiones, no obstante, comparando con las medidas anteriores del cilindro, en el Emilia4 son mucho más difíciles de analizar, debido a su geometría y el fenómeno de la generación de vórtices en el punto C explicado anteriormente.

A diferencia del cilindro, la componente z de los vectores velocidad extraídos va a ser de vital importancia. Esto se debe a la interferencia de las corrientes de flujo que circulan por los laterales del coche con la corriente que circula por el techo. Esta interferencia es más común a velocidades bajas, cuando el número de Reynolds es más bajo, ya que los vórtices de cola todavía no están completamente desarrollados.

El proceso de adquisición de imágenes es el mismo que se ha explicado en el caso del cilindro, no obstante, como el sistema PIV utilizado ha sido el *estéreo-PIV*, la mayor dificultad de toma de medidas ha sido en la parte de la cola del coche, donde la componente z del vector velocidad es muy variable. Por esta razón, no se han llevado a cabo operaciones de post-procesamiento. El objetivo final en el caso del Emilia4 es un análisis cualitativo, no cuantitativo, comparando los resultados obtenidos con los que ya están en la literatura.

Lo esperado era identificar un vórtice doble que se crea en la zona debajo de la cola del coche.

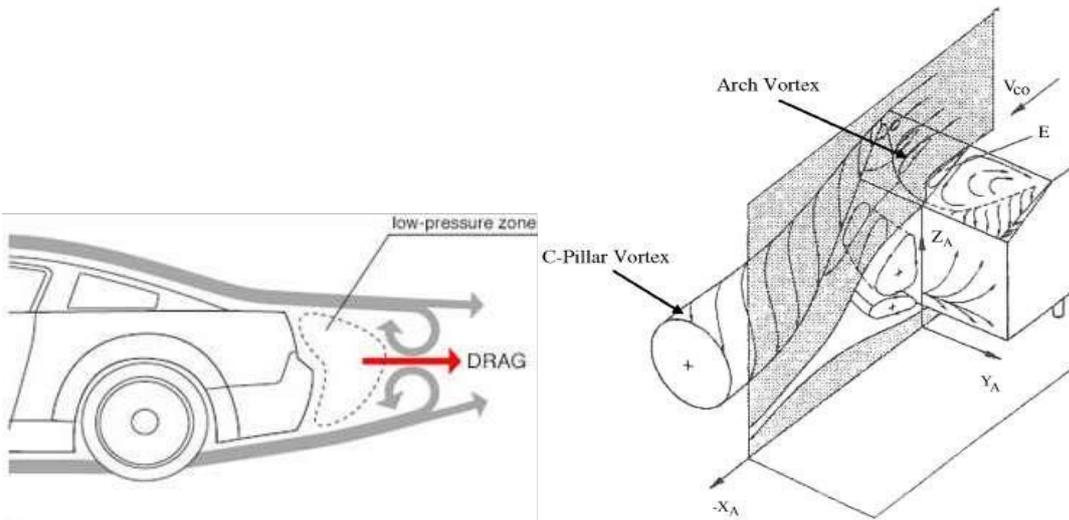


Imagen 136. Vórtices de cola. Caso ideal (iz.). Caso real ,existencia punto C (der.).

5.5.1 Medidas a 0,8 m/s (5 Hz)

Las dos **primeras fotografías** que se tomaron fueron las siguientes:

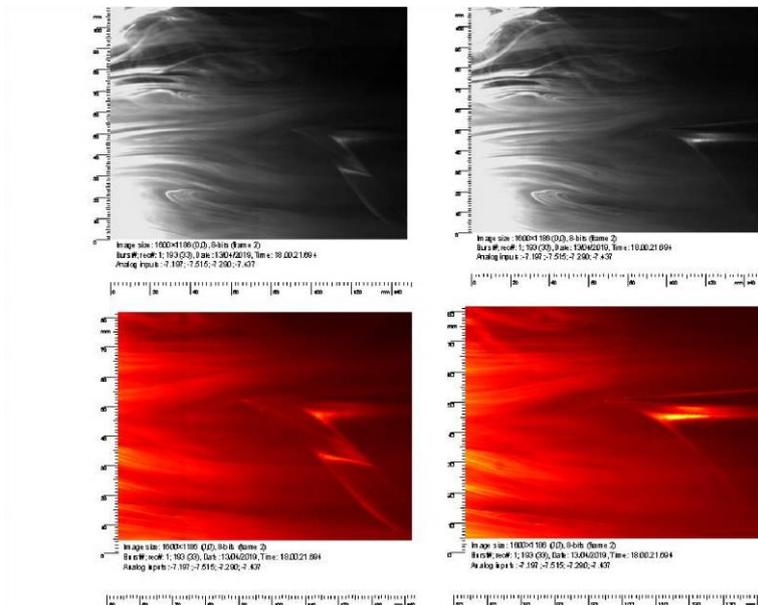


Imagen 137. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 0,8 m/s.

Segundas medidas 0,8 m/s:

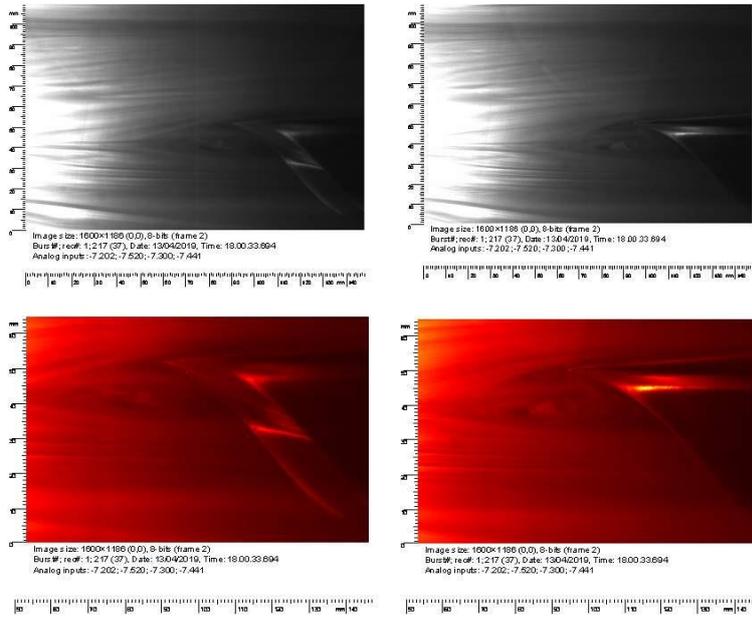


Imagen 138. Segundas fotografías de las cámaras A y B, a 0,8 m/s.

Terceras medidas 0,8 m/s

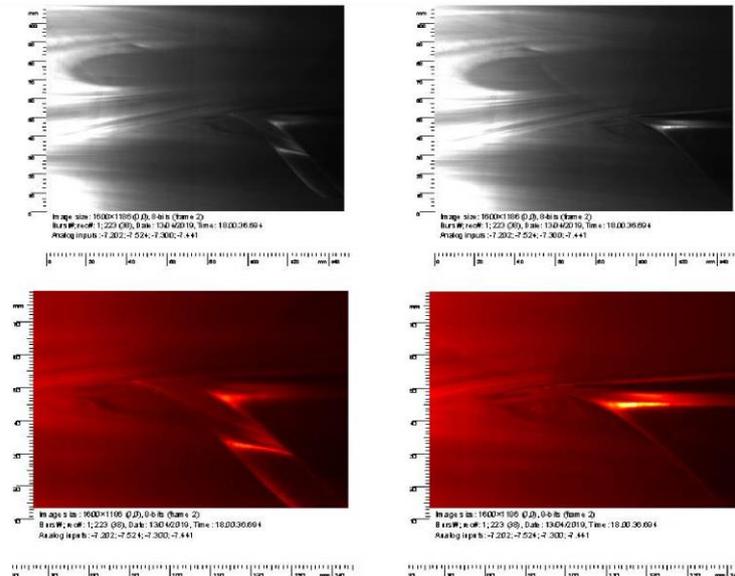


Imagen 139. Terceras fotografías de las cámaras A y B, a 0,8 m/s.

En todas las imágenes se observa los dos vórtices detrás de la cola que esperábamos.

5.5.2 Medidas a 1,6 m/s (10 Hz)

Primeras medidas 1,6 m/s:

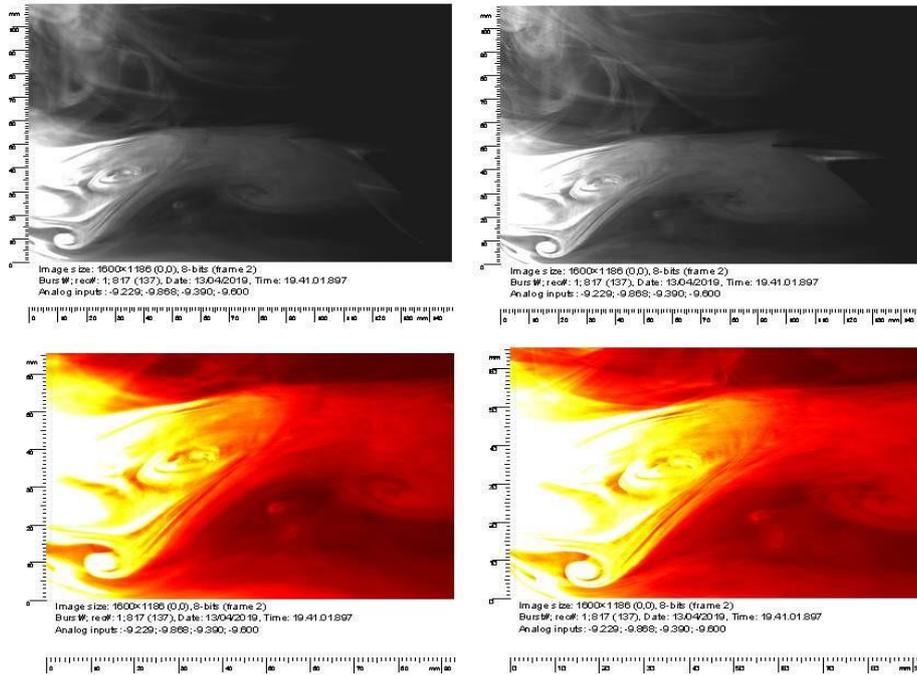


Imagen 140. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 1,6 m/s.

Segundas medidas 1,6 m/s:

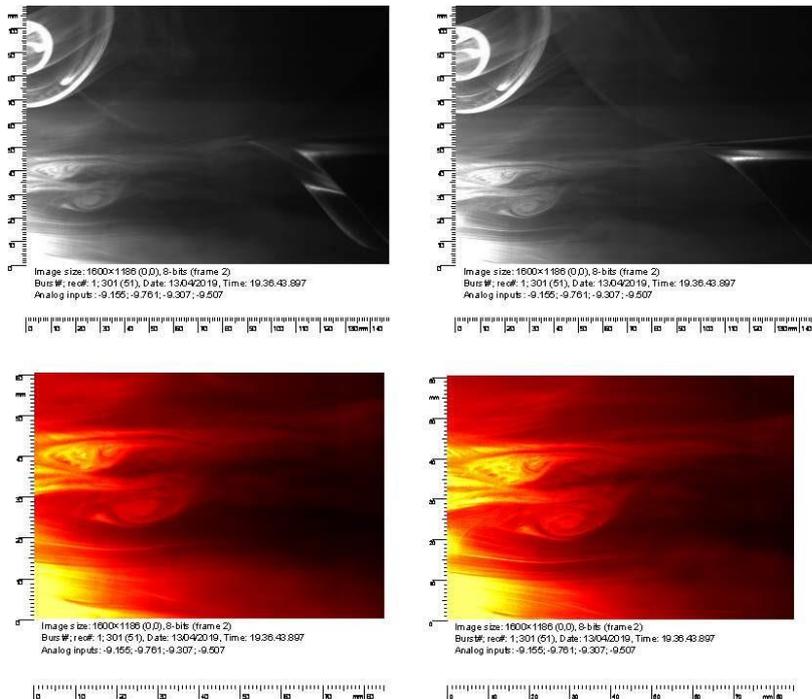


Imagen 141. Segundas fotografías de las cámaras A y B, a 1,6 m/s.

Terceras medidas 1,6 m/s

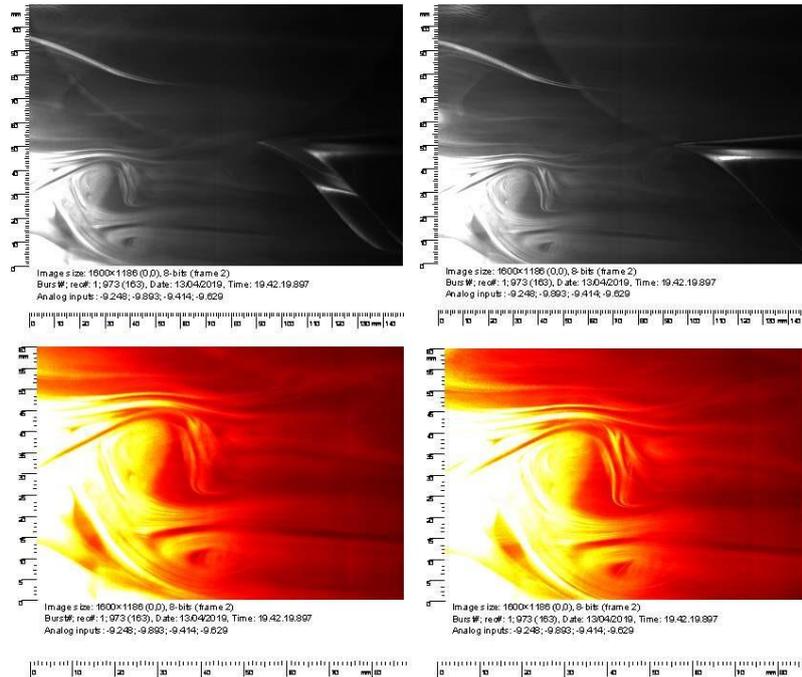


Imagen 142. Terceras fotografías de las cámaras A y B, a 1,6 m/s.

En estas velocidades mayores se aprecia como los vórtices ya no se forman justo debajo de la cola, si no más alejados de ésta. Este fenómeno difiere de la realidad ya que en nuestro experimento no se ha tenido en cuenta el efecto suelo en movimiento.

Esto se podría haber logrado utilizando una alfombrilla en movimiento debajo de la maqueta o con rodillos giratorios.

En las primeras imágenes se observa bastante bien lo comentado, ya que se forma un tercer vórtice a una distancia menos alejada de la cola.

5.5.3 Medidas a 2,4 m/s (15 Hz)

Primeras medidas 2,4 m/s:

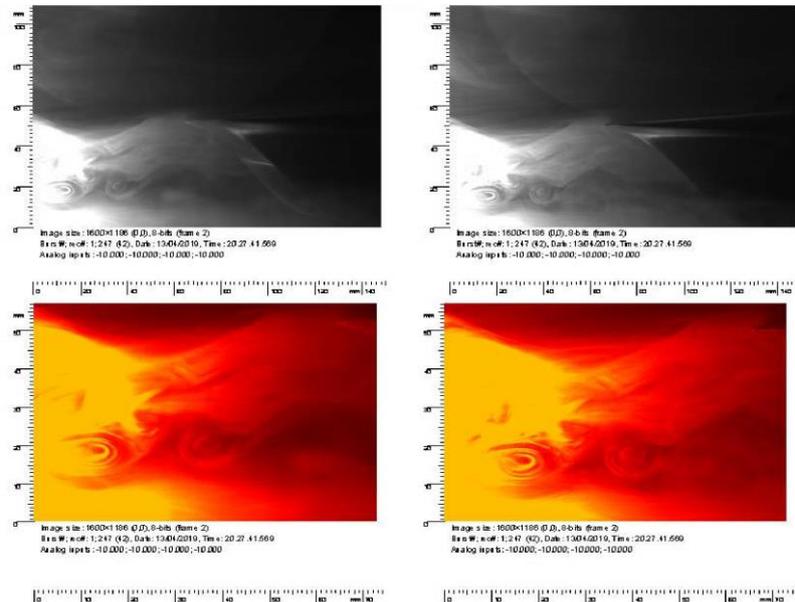


Imagen 143. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 2,4 m/s.

Segundas medidas 2,4 m/s:

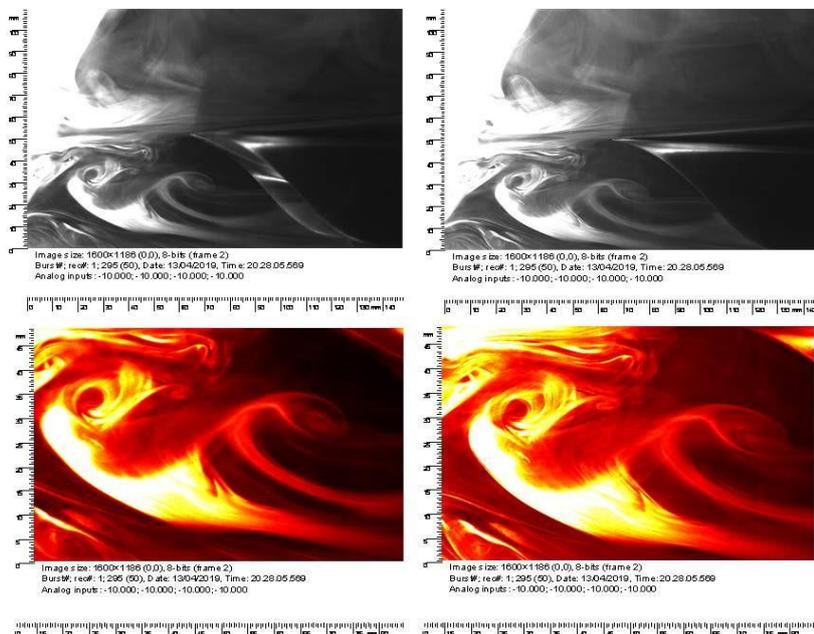


Imagen 144. Segundas fotografías de las cámaras A y B, a 2,4 m/s.

Terceras medidas 2,4 m/s

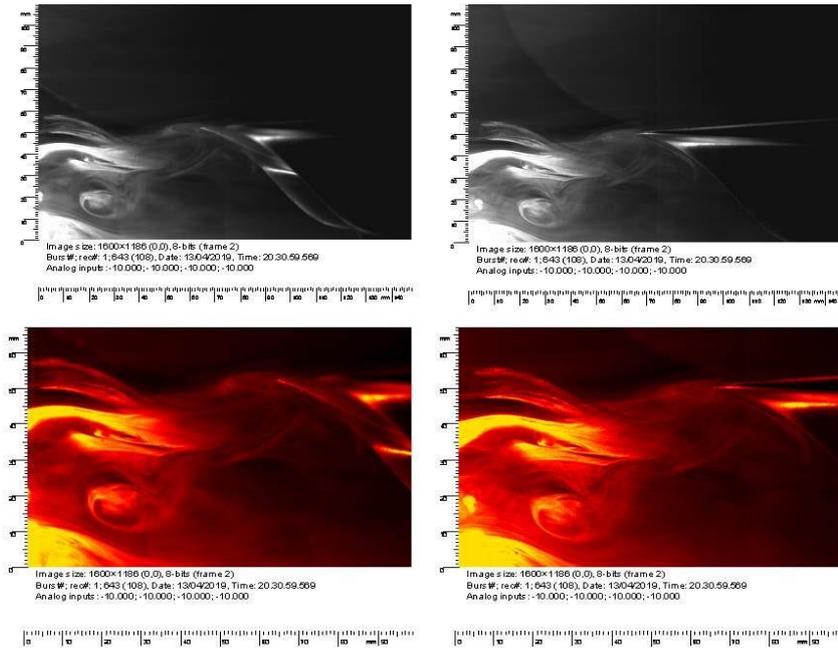


Imagen 145. Terceras fotografías de las cámaras A y B, a 2,4 m/s.

5.5.4 Medidas a 3,2 m/s (20 Hz)

Primeras medidas 3,2 m/s:

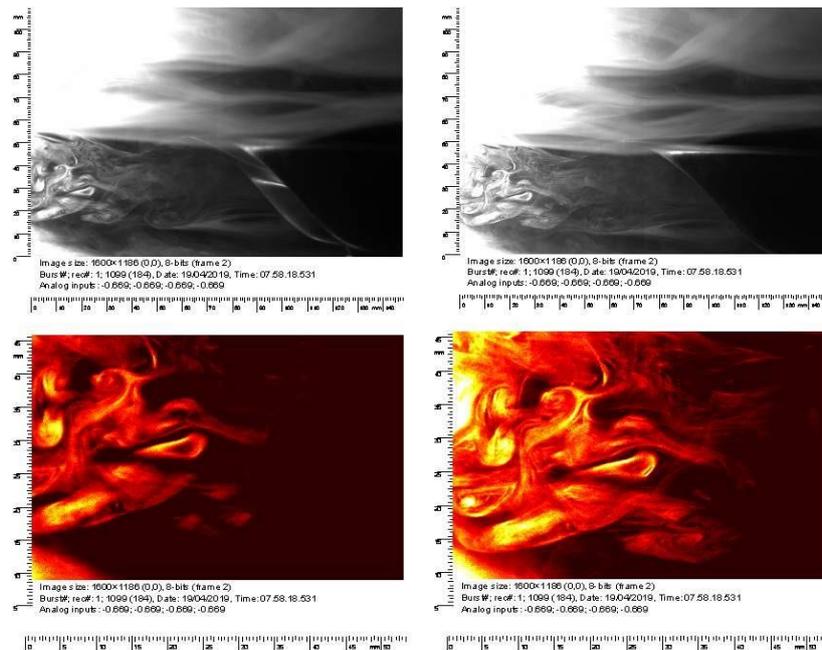


Imagen 146. Primeras fotografías de las cámaras A y B, a 3,2m/s.

Segundas medidas 3,2 m/s:

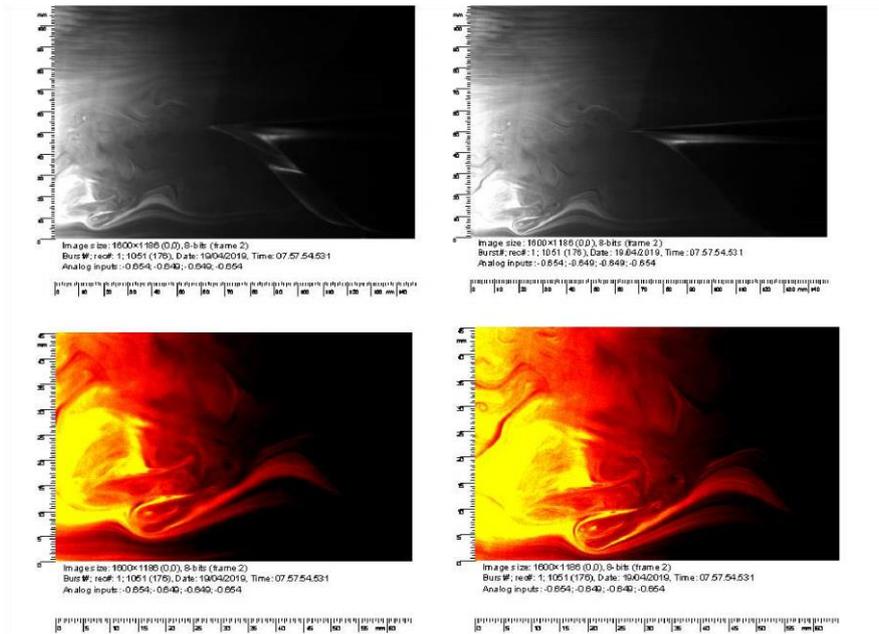


Imagen 147. Segundas fotografías de las cámaras A y B, a 3,2 m/s.

Terceras medidas 3,2 m/s

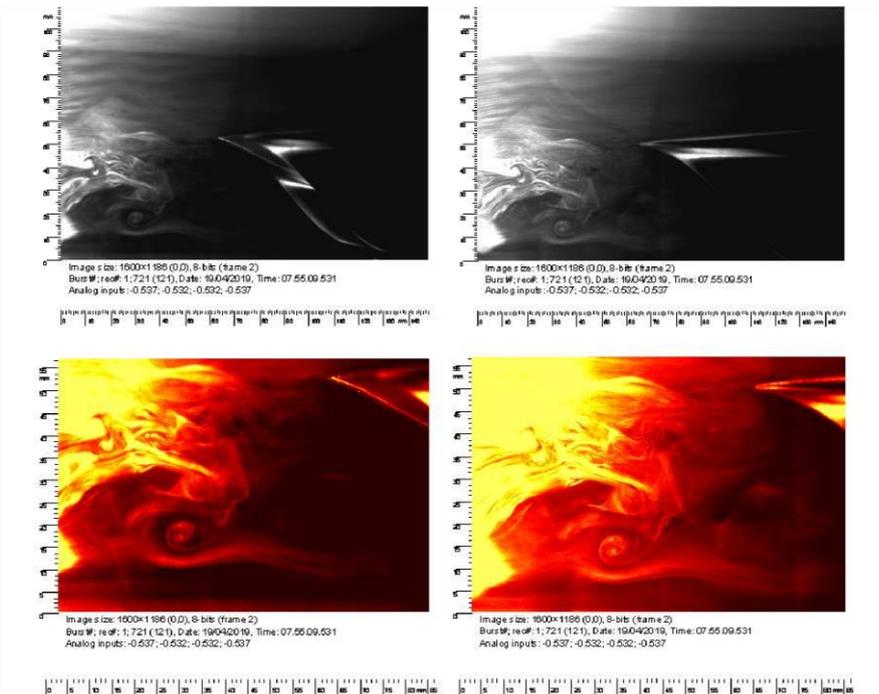


Imagen 148. Terceras fotografías de las cámaras A y B, a 3,2 m/s.

En estas velocidades ya más elevadas se puede observar como el flujo es cada vez más turbulento, formando más vórtices y comportandose de manera caótica en la zona de la cola en adelante, alejándose de ella. Si tomáramos medidas para velocidades mayores, seguiría ocurriendo lo mismo pero de manera más acentuada.

CONCLUSIÓN

Caracterizado el tubo de viento, se han podido sacar muchas conclusiones como las que se explican a continuación, algunas de ellas esperadas y otras que surgieron a medida que se avanza con la experimentación.

La primera conclusión que se observó fue la uniformidad que caracteriza al perfil de velocidades de la cámara de ensayos, aumentando las velocidades de forma proporcional a las frecuencias.

Mediante la experimentación con el PIV se demostró que el carácter turbulento del flujo y por tanto el número de vórtices, aumentan conforme a la velocidad del flujo. De hecho, para las velocidades mayores de 2,4 y 3,2 m/s el análisis y post-procesamiento de los resultados tubo que ser mayor debido a la poca claridad de estos.

En el caso del experimento del Emilia4 si que se obtuvo los resultados esperados, con la aparición de vórtices en la cola del coche, no obstante, hubo algunas variantes respecto a lo esperado. Al ser tan turbulento el aire en este caso, el post-procesamiento fue más difícil y solo se pudieron obtener resultados cualitativos, debido al presente impacto de la componente z en los vectores velocidad. Por otra parte, nuestra maqueta estaba fija al suelo sin ningún tipo de movimiento de éste, por lo que los vórtices esperados justo debajo de la cola solo se observaron para la velocidad de 0,8 m/s, para las demás los vórtices se alejaron de ésta conforme aumentaba la velocidad, hasta el punto de aparecer un mayor número de vórtices a lo esperado tras sobrepasar los 3,2 m/s.

Comentar también que al tratarse de un tubo de viento que trabaja a velocidades bajas, los números de Reynolds con los que se ha trabajado han sido pequeños si los comparamos con los de un caso real, sobre todo en el caso del Emilia4.

Debido al carácter experimental que presenta esta tesis, se ha podido apreciar el error humano y de los instrumentos de medida a pesar de trabajar con mucha precisión. Además, las condiciones del entorno siempre van a influir en los resultados de nuestros experimentos, por mucho que aislemos la cámara de ensayos. Sobre todo, teniendo en cuenta que el tubo de viento del D.I.N. es de ciclo abierto, por lo que las condiciones del aire exterior absorbido van a influir en gran medida.

Como ejemplo numérico, a la hora de medir con el tubo de Pitot la velocidad del flujo de aire, para una misma frecuencia la velocidad siempre variaba en algunos decimales. Es por ello por lo que tuvieron que tomarse una gran cantidad de medidas para que la velocidad media final fuera lo más representativa posible.

Como ya se ha dicho, el error no siempre es humano, y en esta tesis el mayor de ellos fue inevitable. En fase de toma de medidas, el motor eléctrico que acciona el ventilador se rompió y no hubo forma ni de arreglarlo ni tiempo para comprar otro, por lo que no pudieron tomarse todas las deseadas. No obstante, con las ya tomadas era más que suficiente para caracterizar el tubo, por lo que al fin y al cabo no fue un problema tan grave y pudo terminarse la tesis con los datos que ya disponíamos.

Otro inconveniente no tan determinante fue a la hora de demostrar la existencia de la capa límite, ya que el tubo de Pitot del que se disponía, por razones de espacio, no permitía tomar medidas a menos de 2 mm de la pared vertical. Sin embargo, pudo demostrarse con claridad la existencia de ésta y su espesor a pesar de las limitaciones espaciales impuestas.

A pesar de las dificultades que se han presentado, o de la obtención de algunos datos no esperados, los resultados obtenidos se adaptan bien al tubo de viento y a las condiciones de trabajo con las que se operó.

BIBLIOGRAFÍA

Caratterizzazione sperimentale delle strutture vorticose generate in coda ad un'auto solare. Tesi di Laurea di Morena Falcone, Università di Bologna, 2018.

Master tesis of Elena García Universidad de Sevilla.

<http://juandelacuerva.blogspot.com/2008/03/capa-lmite.html> Juan de la Cuerva. Aeronáutica con sentido del humor. Capa límite.

<https://www.formulaf1.es/30773/que-es-la-boca-del-ferrari-f138/> Ion Emparan. ¿Qué es la "boca" del Ferrari F138?

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/data-concepts/what-is-the-standard-deviation/> Soporte de Minitab. ¿Qué es la desviación estándar?

<https://www.youtube.com/watch?v=FNm1XEMeDDM> Francisco Villalobos Robles. Curso Excel Función DESVEST

<https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/resistencia-aerodinamica-definicion-significado/gmx-niv15-con195384.htm> Resistencia aerodinámica-Definición-Significado

<http://ich1102g18.blogspot.com/2007/05/comportamiento-aerodinmico-de-un-mvil.html>

Grupo 18. Comportamiento aerodinámico de un móvil, bicicleta, que se desplaza en el aire.

<http://www.vetpraxis.net/2014/11/13/articulo-flujo-sanguineo-en-los-vasos-y-camaras-cardiacas-soplos-cardiacos/> Vetpraxis. Flujo sanguíneo en los vasos y cámaras cardíacas: soplos cardíacos.

<https://www.textoscientificos.com/fisica/fluidos/numero-de-reynolds> Aplicación del análisis dimensional: El número de Reynolds.

[Ecuación de Stokes para el flujo alrededor de una partícula.pdf](#) Ley de Stokes.

<https://www.gunt.de/es/productos/estudio-de-la-capa-limite-con-tubo-de-pitot/070.17024/hm170-24/glct-1:pa-150:pr-785> Equipos para la educación en ingeniería. Estudio de la capa límite con tubo de Pitot.

https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_aerodin%C3%A1mica Resistencia aerodinámica.

<https://aerocomando.blogspot.com/2015/08/resistencia-inducida.html> Meteorología aeronáutica y conocimientos generales de aviación.

https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_inducida Resistencia inducida

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/conceptosbasicosmfluidos/flujoturbulento/flujoturbulento.html> Flujo turbulento

<https://francis.naukas.com/2017/08/23/se-observa-la-cascada-hacia-la-turbulencia/> La ciencia de la mula. Se observa la cascada hacia la turbulencia de Kolmogorov.

<https://imperiodelaciencia.wordpress.com/2012/05/02/porque-los-aviones-no-vuelan-la-paradoja-de-dalembert/> Imperio de la ciencia. Porque los aviones no vuelan: la paradoja de d'Alembert.

<http://www.usroasterie.com/la-historia-del-anemometro.html> Usroasterie. La historia del anemómetro.

http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80 Infoagro. Anemómetro.

<https://filanaval.blogspot.com/2012/10/leonardo-da-vinci-anemometro.html> Blogspot. Leonardo da Vinci (Anemómetro).

<http://www.sabelotodo.org/aparatos/anemometro.html> Los anemómetros.

<http://aparatostecnicos.blogspot.com/2014/04/anemometro-de-cazoletas.html> Anemómetro de cazoletas.

<http://www.directindustry.es/prod/tecpel-co-ltd/product-35126-215904.html> Direct Industry. Anemómetro de hilo caliente.

https://it.wikipedia.org/wiki/Laser_Doppler Doppler láser.

<https://www.digitalimagecorrelation.com/en/techniques/ldv-pdi/> LaVision. Laser Doppler Velocimetry.

<http://canal.etsin.upm.es/archives/2299/sistema-de-velocimetria-de-particulas-piv-particle-image-velocimetry/> Canal de ensayos hidrodinámicos CEHINAV. Sistema de velocimetría de partículas (PIV).

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~sakakiba/fish-e.html> Stereo PIV study of flow around a live swimminf fish.

<http://quecamarareflex.com/como-funciona-el-sensor-de-una-camara-digital/> Cómo funciona el sensor de una cámara digital.

<https://tecvolucion.com/que-son-los-coches-solares-y-como-funcionan/> Tecvolución. Qué son los coches solares y como funcionan.

<http://www.hondadreams.es/2017/08/30/cuando-honda-compitio-y-gano-gracias-a-la-energia-del-sol/> Honda Dreams. Cuando Honda compitió y ganó, gracias a la energía del sol.

<http://www.hondaoldies.de/Korbmacher-Archiv/Honda/Prototypen/Dream/dream1.htm> Dream.

<http://pcworld.com.mx/Dispositivos-a-base-de-energia-solar/> PCWorld. Dispositivos a base de energía solar.

<https://www.tomshw.it/emilia-4-auto-solare-italiana-consuma-come-phon-95007> tom's HARDWARE. Emilia 4, l'auto solare italiana che consuma come un phon.

<https://magazine.unibo.it/archivio/2018/06/12/emilia-4-lauto-solare-a-quattro-posti-nata-alluniversita-di-bologna> UNIBO MAGAZINE. Emilia 4, l'auto solare a Quattro posti nata all'Università di Bologna.

<https://www.hurricanefactory.com/madrid/es/news/more/la-historia-del-tunel-de-viento>

Hurricane Factory. La historia del túnel de viento.

<http://www.tuneldevientomadrid.com/historia-de-los-tuneles-de-viento> Túnel de viento

Madrid.

<https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/01/el-motor-reaccion.html> Great bustard's

flight. El motor a reacción.

https://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_viento Wikipedia. Túnel de viento.

<https://www.cec.uchile.cl/~rohernan/tunel/node1.html> CEC. Uchile. Antecedentes.

<http://diariodeltriatlon.es/not/7008/sebastian-kienle-trabaja-en-el-tunel-del-viento-de-mercedes-para-lsquo-volar-rsquo-en-el-ironman-de-hawaii> Diario del Triatlón.

Diario del Triatlón.

<https://greatbustardsflight.blogspot.com/2016/07/creadores-de-viento-i.html> Great bustard's

flight. Creadores de viento.

<http://www.que-formula1.com/index.php/articulos-tecnicos/tunel-de-viento-aerodinamica-y-formula-1-2/> Túnel de viento, aerodinámica y Fórmula 1.

Túnel de viento, aerodinámica y Fórmula 1.