



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN FLUJO TURBULENTO EN TÚNEL DE VIENTO PARA LA RECREACIÓN DE LAS CONDICIONES EN NUBES CÁLIDAS

Autor: Ricardo Jordán de Urries Fontanellas

Tutor: Francisco Javier Rodríguez Rodríguez

Leganés, diciembre de 2011

Título: Caracterización experimental de un flujo turbulento en túnel de viento para la recreación de las condiciones en nubes cálidas

Autor: Ricardo Jordán de Urries Fontanellas

Director: Francisco Javier Rodríguez Rodríguez
Alberto Aliseda

EL TRIBUNAL

Presidente: Jorge Arrieta Sanagustín

Vocal: Lucia Blanco Cano

Secretario: Pablo Martínez – Legazpi Aguiló

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 22 de diciembre de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Con mis estudios, aquí concluye también uno de los ciclos más importantes a lo largo de mi vida, por lo que no puedo otra cosa más que sentir agradecimiento hacia toda la gente que me ha apoyado y acompañado a lo largo de esta etapa.

Comenzando por las personas que han hecho posible este proyecto, mi más sincero agradecimiento a Alberto Aliseda, mi tutor en *University of Washington*, por haberme ofrecido la oportunidad de vivir esta experiencia tan enriquecedora no sólo en lo académico sino, sobre todo, en lo personal. A mi tutor de proyecto en la Universidad Carlos III, Javier Rodríguez por sus sabios consejos. Y cómo no, a mi compañero y amigo de aventuras y desventuras en Seattle, Colin, gracias por tu excepcional acogimiento, tu ayuda y por ser como eres. Thanks bud!

Tampoco puedo olvidarme de mis incansables amigos con los que he compartido esta experiencia universitaria, llena de innumerables horas de clase, laboratorio, trabajos y, cómo no, de cafetería. Gracias a Nacho, Víctor y David por hacer de ella una incalculable cantidad de buenos recuerdos (incluyendo los que, en su momento, pudieran parecer no tan buenos) y por demostrarme que, además de un título universitario, he conseguido unos amigos de verdad.

Finalmente, gracias a “ella” por su cariño y comprensión. Y sobre todo, aunque sé que ya lo saben, tengo que expresar mi infinita gratitud, a mi familia, por su apoyo incondicional y por la maravillosa vida que me han regalado. Gracias.

Resumen

El presente Proyecto Fin de Carrera se ha llevado a cabo en la *University of Washington* como parte de un programa de investigación global que trata de explicar el rápido crecimiento de las gotas observado en las nubes cálidas cuando se forman las precipitaciones y el papel que juega la turbulencia en este fenómeno.

Concretamente, en la presente memoria se muestra el estudio que se ha realizado para la caracterización experimental de un flujo turbulento en un túnel de viento y confirmar así que se ajusta a una serie de parámetros definidos previamente con el objetivo de reproducir las condiciones de contorno que se suceden en este tipo de nubes cumulus en la atmósfera.

Para este propósito, se recogerán datos de la velocidad del aire con tecnología anemométrica hotwire en diferentes puntos de la sección transversal del túnel para distintas estaciones a lo largo del eje longitudinal del mismo.

Finalmente se analizarán los resultados recogidos y se compararán con los parámetros del flujo propuestos con el objetivo de ratificar que en el túnel de viento se recrean las condiciones de turbulencia presentes en este tipo de nubes.

Palabras clave: flujo turbulento; túnel de viento; anemometría hotwire; nubes cálidas

Abstract

The present Thesis was done at the University of Washington as a part of a global collaborative research project that aims to explain the fast growth of cloud droplets that leads to precipitation in warm-rain clouds and the influence of turbulence on this phenomenon.

This report, specifically, shows the study that was executed to characterize a turbulent flow in a wind tunnel and confirm that it matches a number of previously defined parameters in order to mimick the conditions in these kinds of cumulus clouds.

For this purpose, air velocity data were collected with hotwire anemometry at multiple points along the cross section of the tunnel at five distances downstream from a turbulence-inducing grid.

Finally, these data were analyzed and compared with the flow parameters proposed with the objective of verifying that the conditions of turbulence in real warm-rain clouds were recreated in the wind tunnel.

Keywords: turbulent flow, wind tunnel, hotwire anemometry, warm clouds

Índice general

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xii
ÍNDICE DE CUADROS	xiii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 <i>Objetivos generales del programa de investigación</i>	4
1.2.2 <i>Objetivos del Proyecto Fin de Carrera</i>	6
1.3 Fases del desarrollo	7
1.4 Estructura de la memoria.....	8
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	10
2.1 Antecedentes	11
2.2 Conceptos básicos	14
2.2.1 <i>Proceso de formación de las nubes</i>	14
2.2.2 <i>Microfísica de las nubes</i>	15

2.2.3 <i>La turbulencia en partículas</i>	27
2.3 Características del flujo	31
CAPÍTULO 3: COMPONENTES DEL EXPERIMENTO.....	33
3.1 Túnel de viento	35
3.2 Malla de inyectores	39
3.2.1 <i>Malla creadora de turbulencia</i>	39
3.2.2 <i>Sistema de inyección de gotas</i>	41
3.3 Brazo robótico	43
CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO CON HOTWIRE.....	45
4.1 Fundamentos de la anemometría hotwire.....	47
4.1.1 <i>Principios de funcionamiento</i>	47
4.1.2 <i>Morfología y selección</i>	50
4.2 Preparación del experimento	52
4.2.1 <i>Validación del sensor hotwire 45°</i>	52
4.2.2 <i>Diseño y fabricación del soporte del hotwire</i>	53
4.2.3 <i>Puesta a punto del CTA</i>	55
4.2.4 <i>Calibración del hotwire</i>	57
4.2.5 <i>Ajuste de curvas</i>	61
4.2.6 <i>Software de medidas</i>	63
4.3 Preliminares de la experimentación.....	64
4.3.1 <i>Caracterización inicial</i>	65
4.3.2 <i>Nuevo soporte de aluminio</i>	67
4.3.3 <i>Definición de las posiciones del brazo robótico</i>	68
4.4 Experimentación con hotwire.....	70
4.4.1 <i>Parámetros a caracterizar</i>	70
4.4.2 <i>Caracterización de las estaciones</i>	72
4.4.3 <i>Análisis de los resultados</i>	76
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	80
5.1 Conclusiones	81
5.2 Lecciones aprendidas	83
CAPÍTULO 6: TRABAJOS FUTUROS.....	84
6.1 Rediseño del túnel de viento	85

6.2 Experimentación con PDPA.....	86
CAPÍTULO 7: FASES Y PRESUPUESTO	88
7.1 Fases del Proyecto Fin de Carrera	89
7.1.1 Fase de trabajo en laboratorio.....	89
7.1.2 Fase de investigación y redacción de la memoria.....	93
7.2 Presupuesto.....	95
7.2.1 Desglose presupuestario.....	95
7.2.2 Resumen de costes	96
CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA.....	97
CAPÍTULO 9: ANEXOS	103
Anexo I: Guía rápida de selección de sondas	104
Anexo II: Tareas del proyecto de investigación global	105
Anexo III: Posiciones del brazo robótico	107
Anexo IV (a): Programas creados en MATLAB.....	108
Anexo IV (b): Programas creados en MATLAB	111
Anexo V: Ilustración del soporte de aluminio.....	113

Índice de figuras

Figura 1: Proceso de formación de nubes.....	14
Figura 2: Incremento de la energía E en función del radio R	17
Figura 3: Curvas de Köler	18
Figura 4: Crecimiento teórico de superficies de nucleación por condensación	20
Figura 5: Esquema del fraccionamiento de gotas.....	22
Figura 6: Esquema de la interacción hidrodinámica del par de gotas	23
Figura 7: Velocidad terminal de las gotas	24
Figura 8: Ejemplo de modelo estocástico.....	26
Figura 9: Tendencia de las partículas en flujos turbulentos	27
Figura 10: Disposición de partículas (2D) en función del número de Stokes	28
Figura 11: Esquema del montaje experimental	34
Figura 12: Imágenes del compresor y el panel de abeja.....	36
Figura 13: Sección de experimentación.....	37
Figura 14: Rain catcher.....	38
Figura 15: Esquema de la malla y valores característicos	39
Figura 16: Sección de experimentación.....	40
Figura 17: Inyectores.....	41
Figura 18: Sistema de inyección.....	42
Figura 19: Brazo robótico instalado para su uso en el túnel de viento.....	43
Figura 20: Esquema del funcionamiento de la sonda hotwire.....	48

Figura 21: Circuito esquemático del hotwire..	49
Figura 22: Tipos de sensores	50
Figura 23: Sensor hotwire 45°	51
Figura 24: Sensibilidad direccional	53
Figura 25: Esquema y dimensiones de soporte de madera	54
Figura 26: Montaje de soporte de madera	54
Figura 27: CTA ajustado	56
Figura 28: Termómetro de control	57
Figura 29: Soporte adicional del tubo pitot	58
Figura 30: Calibración del hotwire con tubo de pitot en inyector <i>GE</i>	59
Figura 31: Interfaz programado en LabView VI	63
Figura 32: Estaciones de medida con hotwire	64
Figura 33: Esquema de región de experimentación	66
Figura 34: Nuevo soporte de Aluminio	68
Figura 35: Detalle de diferentes posiciones del soporte del hotwire	69
Figura 36: Montaje del PDPA.	87
Figura 37: Calendario de fases del trabajo en laboratorio	92
Figura 38: Calendario fases de redacción	94

Índice de gráficos

Gráfico 1: Curvas de calibración con la ley de King.....	62
Gráfico 2: Caracterización inicial hotwire.....	65
Gráfico 3: Estación 1. Velocidades	73
Gráfico 4: Estación 1. RMS.....	73
Gráfico 5: Estación 2. Velocidades	74
Gráfico 6: Estación 2. RMS.....	74
Gráfico 7: Estación 3. Velocidades	75
Gráfico 8: Estación 3. RMS.....	75
Gráfico 9: Estación 3. Perfil de velocidades.	76
Gráfico 10: Estación 3. Perfil RMS de velocidades.	77
Gráfico 11: Decaimiento de la turbulencia.....	78
Gráfico 12: Energía turbulenta longitudinal 1D en la Estación 3 ($x/M=17$).....	79

Índice de cuadros

Cuadro 1: Características de la turbulencia y las gotas en las nubes reales	31
Cuadro 2: Calibración del hotwire.....	60
Cuadro 3: Posiciones para la Estación 1.....	69
Cuadro 4: Parámetros relevantes de las condiciones en las estaciones	78

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

La distribución preferencial de gotas en flujos turbulentos es un mecanismo muy importante en el crecimiento de partículas en diversos procesos tanto ingenieriles como medioambientales. Así sucede en la atomización de los inyectores de combustible, la producción de polvos en la industria química, la creación de hollín en llamas y la formación de lluvia en las nubes, por mencionar tan sólo algunos ejemplos [1].

La formación de las nubes y las precipitaciones son aspectos fundamentales del tiempo y el clima. La colisión-coalescencia de las gotas de las nubes es uno de los dos mecanismos por los cuales se crea la precipitación. Concretamente, este mecanismo se refiere frecuentemente al proceso precipitación en nubes cálidas (*warm clouds*), para diferenciarlo del mecanismo más común (proceso *Findeisen-Bergeron*) que implica procesos de congelación.

Como se verá más adelante (ver capítulo 2.2.2 *Microfísica de las nubes*), este mecanismo se basa en el crecimiento de las “gotitas” para formar gotas de lluvia a través principalmente de la colisión-coalescencia de las mismas. Este tipo de precipitación representa el 30% de todas las precipitaciones del planeta y concretamente el 70% de las precipitaciones que ocurren en las zonas tropicales [2].

Mientras que las nubes visibles se pueden extender hasta cientos de kilómetros, las pequeñas gotas de agua que las componen tienen un radio típicamente de $5\mu\text{m}$ a $20\mu\text{m}$. Las gotas más pequeñas (radios menores de $10\mu\text{m}$) crecen de manera eficiente por la difusión y condensación del vapor de agua, pero su crecimiento debido a colisiones gravitacionales es apenas posible a menos que alcancen radios de $100\mu\text{m}$ [3]. Por tanto, el rápido de crecimiento observado en las gotas que se encuentran en un rango de $10\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$ de radio, conocido como ***size gap***, es difícil de explicar debido a que ni el mecanismo de difusión ni el de colisión-coalescencia gravitacional son efectivos.

Sin embargo, existe un creciente consenso que indica que el aire turbulento dentro de las nubes juega un papel fundamental en el desarrollo de las gotas que se encuentran

en este size gap y, por tanto, acelera el desarrollo de la creación de precipitaciones en nubes cálidas [4].

Por otro lado, aunque el mecanismo de coalescencia en el crecimiento de gotas ha sido estudiado ampliamente debido a su relevancia en la industria (como por ejemplo en el uso de spráis, fundamentales para la combustión y el procesamiento de materiales), el rango de los parámetros en estos estudios es bastante diferente al encontrado en las nubes.

Por tanto, el estudio de la microfísica de la lluvia cálida está a la espera de un esfuerzo experimental y computacional que dé la oportunidad de determinar con precisión los diferentes efectos del kernel de turbulencia en la colisión-coalescencia en este tipo de precipitación.

Este proyecto está dirigido por el Dr. Alberto Aliseda de la *University of Washington*, encargado de la parte experimental. Está enmarcado como parte de una investigación global que se desarrolla en un plazo de 3 años (ver *Anexo II*) en colaboración con otros grupos. El Dr. Wang de la *University of Delaware*, a cargo de la parte computacional, y el Dr. Grabowski, perteneciente al programa de estudio de nubes convectivas y su precipitación en el NCAR (*National Center of Atmospheric Research*).

Concretamente el grupo del Dr. Aliseda, al que pertenece el presente Proyecto, es el encargado de ejecutar un estudio experimental del efecto de la turbulencia y las interacciones aerodinámicas en la colisión y coalescencia de las gotas reproduciendo condiciones realistas de las nubes.

1.2 Objetivos

El objetivo científico global del programa de investigación en el que se encuentra enmarcado este Proyecto Fin de Carrera es el desarrollo de herramientas experimentales y computacionales capaces de resolver las estadísticas dinámicas y cinemáticas de la colisión-coalescencia turbulenta para escalas semejantes a las de las pequeñas gotas contenidas en las nubes, con el propósito de obtener una parametrización precisa del kernel de colisión turbulenta para comprender el efecto de la turbulencia en el crecimiento de las gotas durante la iniciación de la lluvia cálida.

A continuación se definen con mayor precisión los objetivos tanto generales del programa de investigación, como los objetivos particulares del presente Proyecto.

1.2.1 Objetivos generales del programa de investigación

Para el programa de investigación de tres años de duración llevado a cabo, como se ha mencionado anteriormente, por el Dr. Alberto Aliseda (*University of Washington*), el Dr. Wang (*University of Delaware*) y el Dr. Grabowski (NCAR), se proponen los siguientes objetivos generales.

El primer lugar, se pretende establecer un sistema integrado microscópico de dos fases PIV (*Particle Image Velocimetry*) con el propósito de resolver simultáneamente el flujo del aire, la distribución de gotas, el tamaño y la velocidad de las mismas hasta escalas del tamaño de las gotitas contenidas en las nubes. El sistema PIV junto con un sistema complementario PDPA (*Phase Doppler*) medirán la distribución del tamaño de las gotas, ofreciendo así la posibilidad de determinar experimentalmente el kernel de colisión turbulenta así como los términos de las ecuaciones cinemáticas de las gotas.

El segundo objetivo es aplicar una aproximación computacional para simular la turbulencia con gotas y las interacciones gota-gota en condiciones experimentales para aumentar la fidelidad de cada una de las aproximaciones individuales.

Por último, el tercer objetivo es aplicar estas herramientas experimentales y computacionales para cuantificar los efectos de la turbulencia dentro de las nubes en la cinemática de los pares estadísticos de las gotas para formular de manera precisa el kernel de colisión turbulenta y comprender así la física del movimiento y las colisiones de las gotas bajo los efectos combinados de turbulencia, interacción aerodinámica, gravedad e inercia y validar un modelo turbulento para las gotas en el size gap relevante para la iniciación de la lluvia cálida [1]

1.2.2 Objetivos del Proyecto Fin de Carrera

Dentro de la parte experimental, encabezada por el Dr. Alberto Aliseda, este Proyecto se enmarca dentro de las tareas que se encargan de la caracterización del túnel de viento, una vez realizado su acondicionamiento a los parámetros descritos en el Cuadro 1 recreando así las condiciones en nubes cálidas, para así confirmar el cumplimiento de las mismas. Esto servirá para, en el futuro, realizar una batería de experimentos con el propósito de mejorar el entendimiento de la formación de precipitación en nubes cálidas y la influencia de la turbulencia en los procesos que intervienen en este fenómeno.

El objetivo principal, por tanto, de este Proyecto Fin de Carrera es caracterizar el flujo turbulento creado en el túnel de viento mediante sistemas de anemometría para comprobar que se cumplen los parámetros fijados para la recreación de las condiciones en nubes cálidas.

Para llevar a cabo este objetivo, se definen la siguiente serie de subobjetivos.

- 1.- Acondicionar el túnel de viento, diseñar y fabricar los elementos necesarios para la posterior realización de experimentos con anemometría hotwire.
 - 2.- Realizar una correcta selección y calibración del dispositivo hotwire que asegure la calidad de las mediciones de turbulencia.
 - 3.- Llevar a cabo una colección de experimentos de medida de las velocidades a lo largo del túnel que permita una adecuada caracterización del flujo turbulento y su evolución en el mismo.
 - 4.- Hacer un análisis riguroso de los resultados obtenidos en la fase de experimentación y comprobar si cumplen los parámetros básicos establecidos en “4.4.1 Parámetros a caracterizar” que aseguren la recreación de las condiciones de turbulencia en las nubes cálidas.
- Estos parámetros básicos son: *Velocidad media del flujo (U); Media cuadrática (u'); Energía unidimensional (E_{11}); Disipación turbulenta (ϵ); Escalas de Kolmogorov.*

1.3 Fases del desarrollo

Para alcanzar a los objetivos expuestos anteriormente se ha seguido la realización de las siguientes fases.

- Documentación inicial y reunión de información sobre los progresos hechos hasta el momento en la investigación.
- Preparación y acondicionamiento de los equipos necesarios para la realización de los experimentos.
- Diseño y fabricación de las estructuras necesarias para el soporte de los aparatos de medida.
- Selección del hotwire y CTA más adecuados para las condiciones experimentales.
- Puesta a punto y calibración de los dispositivos de anemometría y comprobación de su correcto funcionamiento.
- Caracterización de la turbulencia del túnel de viento por medio de la experimentación en diferentes estaciones situadas a lo largo del mismo.
- Análisis de los resultados obtenidos y comparación con las condiciones que han de cumplir.
- Propuesta de trabajos futuros que han de realizarse para continuar con la investigación global.
- Redacción de la memoria que explique las bases teóricas que justifican el proyecto, describa los experimentos llevados a cabo, los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas.
- Realización de un presupuesto adecuado del Proyecto Fin de Carrera
- Solución de los problemas que surjan (inherentes a cualquier proceso de experimentación).

1.4 Estructura de la memoria

A continuación se ofrece un esquema de la memoria con una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos.

- Capítulo 1: Introducción y objetivos

Se exponen la motivación y justificación del presente proyecto así como los objetivos que se pretenden alcanzar. También se enumeran las fases que se han seguido para su realización.

- Capítulo 2: Estado del arte

Comienza con una visión histórica de las investigaciones relacionadas con este tema. Se explican los conceptos teóricos necesarios para la comprensión de las actividades llevadas a cabo en las experimentaciones. Finalmente se exponen las condiciones que ha de cumplir el flujo en el túnel de viento y que se pretenden caracterizar.

- Capítulo 3: Componentes del experimento

Se describe el equipamiento que se utilizará en la realización de los experimentos. Se abordarán las justificaciones teóricas de la validez individual de cada uno de los elementos y se expondrán sus características principales.

- Capítulo 4: Caracterización del flujo con hotwire

Se comienza con una explicación de los fundamentos de las técnicas de anemometría hotwire. Se justificará la elección del hotwire seleccionado y se realizará la calibración del mismo así como el diseño y fabricación de los elementos de soporte. Por último se realizarán los experimentos para la caracterización de la turbulencia en el túnel de viento y un análisis de los resultados obtenidos.

- Capítulo 5: Conclusiones

Comentario sobre los resultados experimentales y reflexión sobre las lecciones aprendidas.

- Capítulo 6: Trabajos futuros

Propuesta de posibles vías de investigación futuras en base a las ya realizadas con el propósito de cumplir los objetivos principales de proyecto de investigación global

- Capítulo 7: Fases y presupuesto

Se resumen las actividades realizadas durante las diferentes fases del proyecto así como el tiempo empleado en ellas. Finalmente se ofrece un análisis de los costes económicos y un presupuesto.

- Capítulo 8: Bibliografía

Se recogen todas las referencias y documentos utilizados para la realización del proyecto.

- Capítulo 9: Anexos

Gráficas, figuras, tablas y otros documentos complementarios que aportan más información a lo ya expuesto en la memoria con el objetivo de aclarar y completar la misma.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se comenzará con una breve introducción histórica para enmarcar la situación actual de la investigación. A continuación se explicarán algunas nociones teóricas necesarias para la comprensión de las actividades llevadas a cabo en este Proyecto Fin de Carrera. Puesto que este proyecto es fundamentalmente experimental y no entra en profundos razonamientos teóricos, el objetivo de los conceptos que se expondrán será meramente orientativo y no se estudiarán en gran profundidad.

2.1 Antecedentes

La comunidad científica lleva bastante tiempo intentando formular un modelo que explique la paradoja existente en el rápido crecimiento del tamaño de las gotas medido en las nubes cálidas, inexplicable con los modelos de formación de lluvia existentes en los que intervienen procesos de congelación. No obstante, en las últimas décadas se han elaborado ciertos estudios que han intentado explicar este fenómeno teniendo como vía principal de investigación el efecto de la turbulencia en el mencionado size gap. A continuación, se expone una muestra representativa de la evolución de los estudios más importantes que se han llevado a cabo acerca del tema hasta nuestros días.

En 1939 *Arenberg* [12] estudió la influencia de las fluctuaciones sinusoidales de la velocidad en la velocidad relativa y la concentración de gotas en las nubes y comprobó cómo las colisiones se podían ver incrementadas debido a esas fluctuaciones.

En 1954, *East y Marshall* [13] basándose en las investigaciones de *Langmuir* [14] sobre la eficiencia de las colisiones entre gotas, crearon un modelo de colisión inducida por la turbulencia en el que se incluía el efecto de la gravedad y el del movimiento turbulento. En este caso, se trató la turbulencia como un incremento de la aceleración debido a la gravedad, obviando la influencia de inhomogeneidad espacial presente en los fenómenos turbulentos.

Fueron *Saffman y Turner* [15] quienes en 1956 predijeron por primera vez que la turbulencia incrementaba la probabilidad de colisión mediante dos mecanismos: el primero era incrementando la velocidad relativa asociada a la inhomogeneidad espacial y el segundo era incrementando la velocidad relativa entre las gotas de diferentes

tamaños resultando en respuestas diferentes de los remolinos turbulentos debido a las distintas inercias de las mismas.

Almedia en 1976 [16] realizó ciertas simulaciones que pretendían explicar la eficiencia de las colisiones debido a la turbulencia. Su aplicación a la evolución del tamaño de las gotas en las nubes dio como conclusión que el proceso de coalescencia se veía incrementado en gran medida gracias a la turbulencia.

Avanzando un poco más en el tiempo, en 1983, *Maxey y Riley* [17] derivaron las ecuaciones de movimiento de una partícula esférica rígida incluyendo la inercia en un flujo turbulento. Su trabajo contribuyó significativamente al futuro desarrollo de herramientas computacionales. Así lo muestran los diferentes estudios que se llevaron a cabo sobre la concentración preferencial por *Squires y Eiton* [18], *Wang y Maxey* [6] y *Truesdell y Elghobashi* [19] en la década de los noventa. Así mismo, también se formularon varios modelos influidos por las bases sentadas por *Maxey y Riley* sobre la colisión de gotas como los trabajos desarrollados por *Shaw et al* [20], *Pinsky et al* [11] o *Zaichik et al* [21] a finales de los noventa y principios del dos mil.

En el año 1988 *Reuter et al* [22] enunciaron un modelo de colisión en procesos turbulentos basado en el solapamiento de remolinos, en el que, cuando dos remolinos se encontraban y se superponían, las gotas que portaban colisionaban entre sí.

No fue hasta 1997 con *Sundaram y Collins* [5] cuando se utilizó por primera vez, a partir de la teoría cinética de los gases, el concepto de RDF (*Radial Distribution Function*) para describir el efecto de la concentración preferencial en la frecuencia de colisión para una población de partículas. Este concepto se repasará más adelante en esta memoria.

Por su parte, *Pinsky et al* [23] realizaron un estudio computacional en 2001 acerca de la eficiencia de las colisiones en flujos turbulentos, descubriendo así que debido a los efectos producidos por la turbulencia y la inercia, la eficiencia de las colisiones aumentaba considerablemente.

Finalmente en el año 2000, *Wang et al* [24] condujeron una serie de simulaciones tridimensionales (DNS: *Direct Numerical Simulations*) de flujos turbulentos cargados

de partículas. De esta manera denominaron al incremento de la velocidad relativa de las partículas debido a la turbulencia, efecto de transporte, y a la tendencia de las partículas a concentrarse preferentemente, efecto de acumulación. Continuando con esta línea de trabajo, *Ayala et al* [26] en 2008 presentaron un estudio DNS de los ratios geométricos de las colisiones de las gotas contenidas en las nubes en términos del tamaños de gotas ($d=20 - 120\mu\text{m}$) e índices de disipación energética ($\epsilon= 10 - 400 \text{ cm}^2/\text{s}^3$), calculando así el incremento de la eficiencia en las colisiones debido a la turbulencia.

A modo de resumen, se observa como en los últimos años diversos estudios tanto de ingeniería como atmosféricos han estudiado el fenómeno de colisión de partículas debido al efecto de un flujo turbulento. Estos estudios sugieren que el agrupamiento de las gotas en la nube se puede ver incrementado por varios efectos provocados por la turbulencia, tales como:

1. Aumento del movimiento relativo debido a la aceleración.
2. Aumento de la media de los pares estadísticos debido a la concentración preferencial y agrupamiento.
3. Aumento selectivo del ritmo de asentamiento aumentando la velocidad relativa entre gotas.
4. Aumento de la eficiencia de colisión.

2.2 Conceptos teóricos

2.2.1 Proceso de formación de nubes

Básicamente, las condiciones necesarias para la formación de nubes y posteriormente de las precipitaciones son: (1 y 2) ascenso del aire y su enfriamiento, (3) condensación del vapor de agua y formación de las nubes, (4) fuerte concentración de humedad y (4 y 5) crecimiento de las gotitas de agua de las nubes [25]. Dichas condiciones se representan esquemáticamente en la Figura 1.

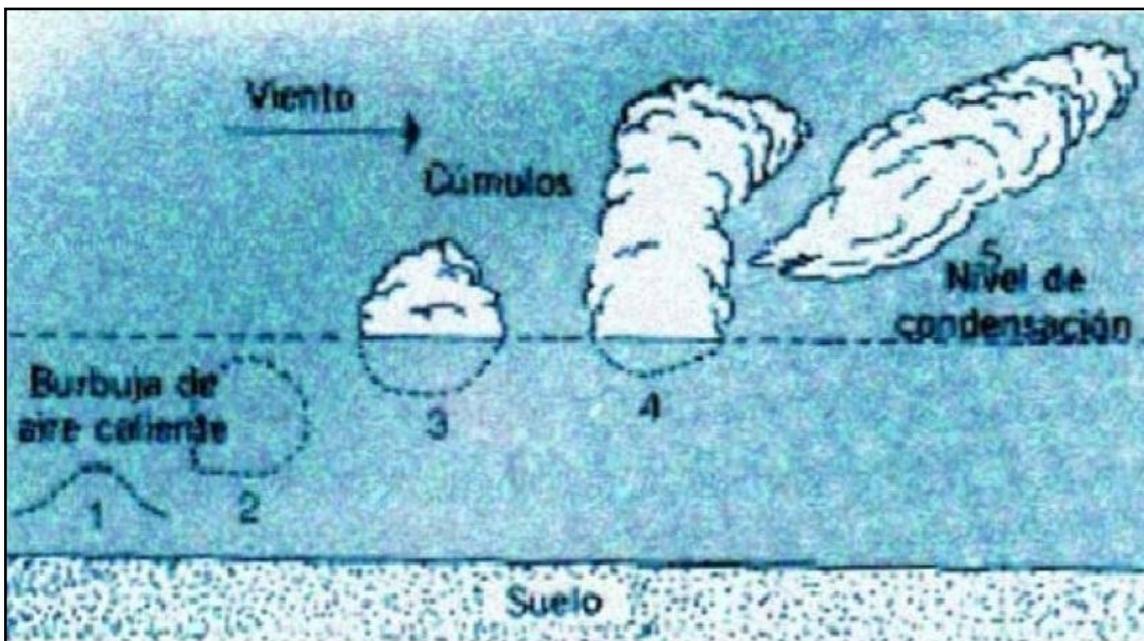


Figura 1: Proceso de formación de nubes

Sin embargo, el entendimiento de la formación de nubes implica un gran número de disciplinas, debido principalmente a la gran cantidad de procesos que influyen en la creación de las mismas. Por este motivo, la meteorología divide su estudio en tres grandes ramas que se diferencian principalmente en la escala de los fenómenos que tienen lugar [26]. De manera sencilla, estas ramas se dividen en:

1. Meteorología sinóptica: es la encargada del estudio de las variaciones en las condiciones meteorológicas diariamente, a grandes escalas. A estas escalas, se analiza la nube como un individuo perteneciente a un sistema de nubes y que se ve influenciado por el entorno que la rodea, como por ejemplo los

movimientos de aire a gran escala o la influencia de las nubes de su alrededor. Ligada íntimamente a esta rama se encuentra la meteorología dinámica.

2. Meteorología dinámica: el orden de las escalas de esta rama es el de las nubes. Por tanto, estudia los movimientos del aire (ascendente, descendente o lateral) basándose en la mecánica de fluidos y la evolución temporal de la atmósfera que dan pie a los procesos microfísicos en las nubes que son, precisamente, la tercera rama en la que se divide el estudio.
3. Microfísica de las nubes: se tratan escalas del orden de las gotas que componen las nubes. Se analizan los procesos de crecimiento individual de las mismas, por mecanismos de condensación o de colisión-coalescencia, hasta dar lugar a la precipitación.

En este último marco es en el que se desarrolla el presente proyecto y en el que se va a profundizar más detenidamente.

2.2.2 Microfísica de las nubes

Como ya se ha mencionado, en este apartado se tratará de explicar los procesos de formación y crecimiento de las gotas en las nubes y sus bases físicas de comportamiento [27;28]. Estos procesos son:

1. Nucleación: proceso de formación de las gotas a partir de la condensación del vapor de agua del aire en la atmósfera.
2. Crecimiento por condensación: posible tan sólo con la debida densidad de moléculas en la atmósfera.
3. Crecimiento por colisión y coalescencia: debido a la interacción entre gotas.

Este último proceso es el objeto de este estudio y, por tanto, el que se verá más extensamente.

Nucleación

Mediante este primer proceso se activa la formación de pequeñas gotas a partir del vapor de agua presente en el aire atmosférico. Para ello se requieren dos condiciones fundamentalmente. La primera, es que el aire se encuentre en condiciones de saturación. Esto se produce cuando las parcelas de aire húmedo al ascender se expanden y se enfrían adiabáticamente dando lugar a pequeñas gotas de agua o hielo. La segunda condición, es la existencia de núcleos de condensación, tales como partículas micrométricas o aerosoles con cierta afinidad por el agua, que disminuyan los valores energéticos de supersaturación y faciliten de esta manera la formación de las gotas.

Debido a estas dos condiciones necesarias para la nucleación, se pueden diferenciar dos mecanismos diferentes dentro de este proceso: la nucleación homogénea y la nucleación heterogénea.

La nucleación homogénea es la que se da cuando se forma una gota de agua debido exclusivamente a la condensación del vapor supersaturado, sin la presencia de aerosoles. Este proceso se basa, por tanto, en la colisión fortuita de moléculas de vapor de agua hasta la formación de pequeñas gotas embrionarias.

Desde el punto de vista energético, se observa como la energía libre de Gibbs existente en el sistema disminuye debido a la condensación. Además, se realiza un trabajo para vencer la tensión superficial (σ) del agua, que es proporcional al área (A) de la gota formada. Se puede realizar un balance energético mediante la Ecuación (2.1), que relaciona la energía libre de Gibbs con la tensión superficial, la densidad parcial del vapor de agua contenido en el aire (ρ_L), el radio (R) de la gota formada y las presiones de vapor (e) y de saturación (e_s) respectivamente, siendo R_v la constante de los gases para el vapor de agua ($R_v=461,5 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$).

$$\Delta E = 4\pi R^2\sigma - \frac{4}{3}\pi R^3\rho_L R_v T \ln\left(\frac{e}{e_s}\right) \quad (2.1)$$

Si se tiene en cuenta que los sistemas tienen tendencia a permanecer en equilibrio (mínima energía), es fácil comprobar de la ecuación anterior como para el aire que se encuentra por debajo de las condiciones de saturación ($e < e_s$) el valor de ΔE es siempre

positivo y, por tanto, las gotas formadas fortuitamente acaban siendo evaporadas por el propio sistema.

En la misma línea de razonamiento, si el aire se encuentra en condiciones supersaturadas ($e > e_s$), el valor de ΔE será positivo o negativo en función del valor del radio de la gota embrionaria (R). En el caso de que la variación de energía sea positiva, ocurrirá lo mismo que lo expuesto en el caso anterior. Por otra parte, para cierto valor de $R > r_c$ el valor de ΔE es negativo y la creación de gotas con radio mayor al radio crítico (r_c) se obtienen sistemas más estables. Su crecimiento posterior será espontáneo ya que hará disminuir la energía debido al aumento del radio, como se muestra en la siguiente figura:

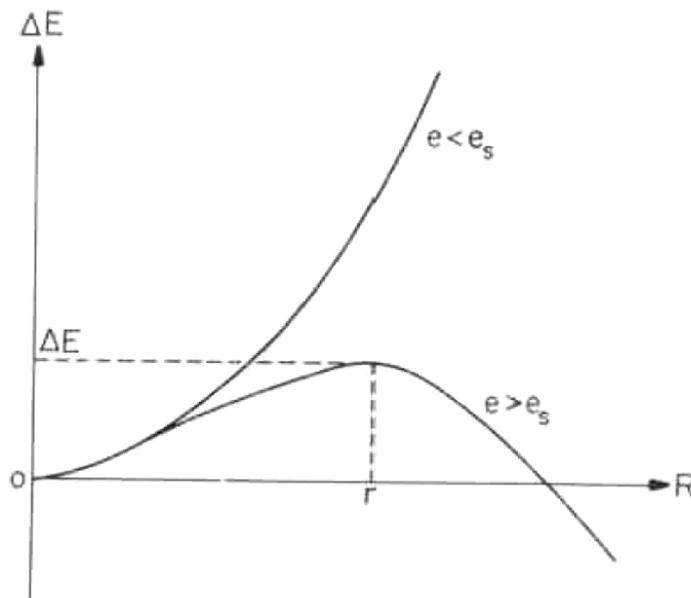


Figura 2: Incremento de la energía E en función del radio R de una gota, en una atmósfera de presión de vapor e y presión de saturación e_s

Derivando la expresión (2.1) $\partial(\Delta E)/\partial(R) = 0$ se obtiene el valor de r_c . Estudiando los radios de las gotas se comprueba que, para radios del orden de $1\mu\text{m}$ es necesaria una humedad relativa del 1%. Las gotas formadas por colisiones fortuitas en la nucleación homogénea suelen ser del orden de $R < 0,01\mu\text{m}$ y requerirían, por tanto, una humedad relativa de más de un 110%. Sin embargo, las humedades relativas debido al ascenso y expansión adiabática en la formación de nubes, raramente exceden del 1%. Esto demuestra la necesidad de núcleos de condensación para el crecimiento de las gotas, es decir, la nucleación heterogénea.

La nucleación heterogénea, como ya se ha mencionado, se activa a través de aerosoles que actúan como centros de nucleación, conocidos como CCN (*Cloud Condensation Nuclei*). Estos aerosoles han de tener cierta afinidad por el agua (hidroscópicos) y ser solubles.

El proceso se basa en que, al disolverse el aerosol en el agua, la presión de vapor sobre la superficie de la gota disminuye debido a que las moléculas del soluto (sales) disocian las moléculas de agua en iones. Esta disociación produce una reorganización de las moléculas de agua en la superficie de la gota, creándose espacios moleculares que son ocupados por las moléculas de sal dando lugar a una menor presión de vapor, debido principalmente a que esta es proporcional a la concentración de moléculas de agua sobre la superficie de la gota.

Las curvas de *Köler* (Figura 3) representan el nivel de humedad relativa y supersaturación necesario para la formación de gotas estables de distintos radios (r).

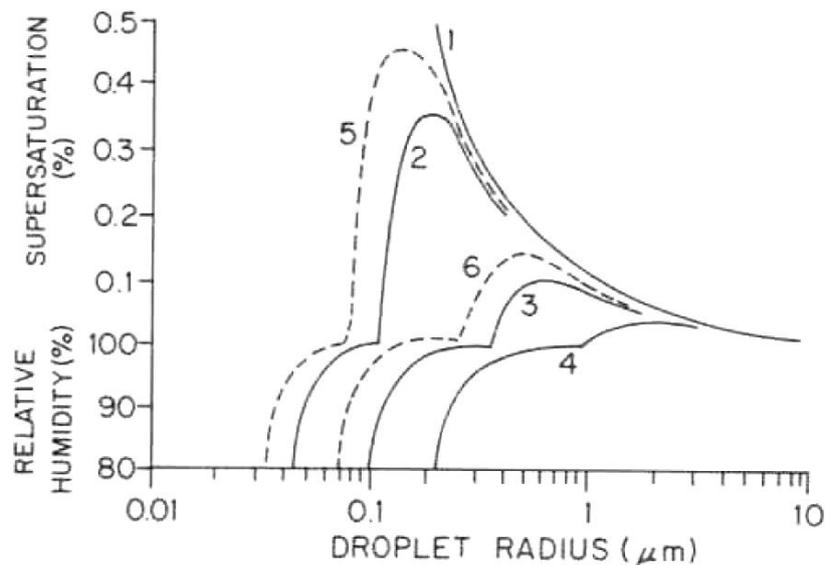


Figura 3: Curvas de Köler para (1) agua pura. Gotas de disolución masas fijas de sal: (2) 10^{-19} kg NaCl, (3) 10^{-18} kg NaCl (4) 10^{-17} kg NaCl, (5) 10^{-19} kg $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ y (6) 10^{-18} kg de $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$

Para que una gota embrionaria continúe creciendo (se active) deberá superar su máximo correspondiente en la curva de *Köler* formándose así una gota de nube. A medida que esta aumente de tamaño, la influencia ejercida por la sal será más débil debido a que estará diluida en una mayor masa de agua y su comportamiento se aproximará a la nucleación homogénea antes explicada.

Crecimiento por condensación

El crecimiento por condensación se basa en la difusión de las moléculas de agua a través de la superficie de la gota. Para que este fenómeno tenga lugar es necesario que la presión de vapor en el ambiente sea mayor que la presión de vapor del aire en torno a la gota y que exista, además, una densidad de moléculas en la atmósfera mayor que la densidad de moléculas existente en la superficie de esta. Este proceso de difusión libera el calor latente de vaporización, elevando de esta manera la temperatura de la gota por encima del valor ambiental.

Como se explicó anteriormente, cuando el aire asciende, se expande y se enfría adiabáticamente alcanzando las condiciones de saturación y posteriormente de supersaturación. Como se mostró en las curvas de *Köler* (Figura 3) los núcleos de condensación eficientes se activan iniciando su crecimiento simultáneo por condensación y aumentando así la demanda de humedad. En este instante, se produce un mecanismo de consumo de vapor en la condensación y otro de producción debido al enfriamiento adiabático. Cuando el consumo es mayor que la producción, disminuye la supersaturación y por tanto, los núcleos que no han sido activados según las curvas de *Köler*, comienzan a desaparecer. Los núcleos de menor tamaño ya activados continúan creciendo a un ritmo mayor que las gotas de mayor tamaño hasta que alcanzan dimensiones similares. A partir de ese momento, se observa un crecimiento lineal de las poblaciones de gotas [28]. Este proceso teórico se explica de manera esquemática en la Figura 4.

Sería por tanto de esperar un estrechamiento cada vez mayor con el paso del tiempo de la distribución de tamaño de gotas, en la que las dimensiones de la gran mayoría de estas se encontrase en valores comprendidos entre $11\mu\text{m}$ y $15\mu\text{m}$ [29]. Sin embargo, las observaciones realizadas en nubes reales muestran como a mayor tiempo de vida de la nube, mayor espectro de tamaños de gota extendiéndose desde radios de varias micras hasta más de $50\mu\text{m}$ [27].

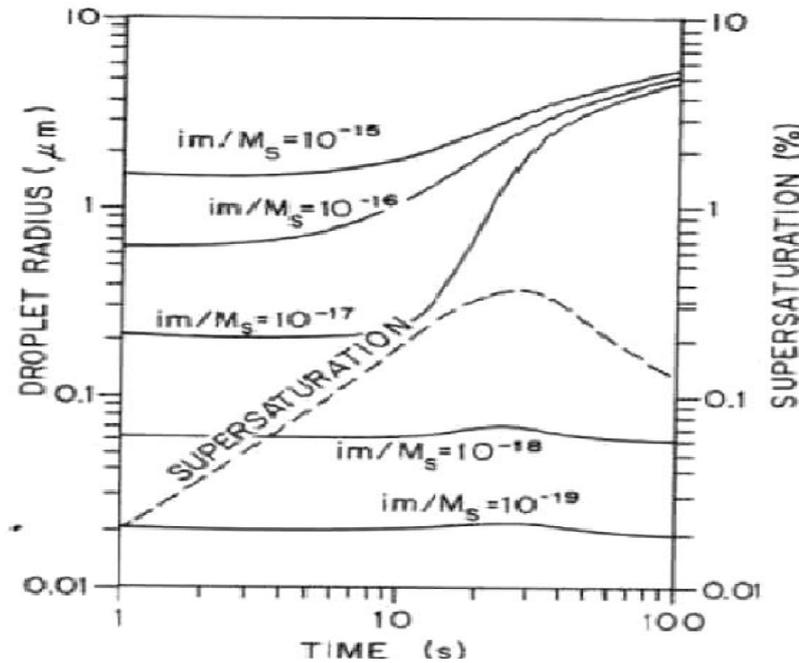


Figura 4: Crecimiento teórico de superficies de nucleación por condensación para diferentes fracciones molares de iones del núcleo de condensación [28]

En consecuencia, se puede concluir que la teoría de crecimiento por difusión (condensación) es capaz de explicar adecuadamente el ratio de crecimiento en las primeras etapas del desarrollo de las gotas, hasta tamaños del orden de $10\mu\text{m}$. Sin embargo, a partir de cierto punto de crecimiento, este mecanismo no predice correctamente el ancho espectro de tamaños de gota encontrados en nubes reales.

Aún más, para la formación de precipitaciones es necesaria la presencia del proceso de colisión – coalescencia. Dicho proceso no se inicia hasta que las gotas (o al menos una parte de ellas) alcancen tamaños superiores a $100\mu\text{m}$. Según lo visto anteriormente, por el mecanismo de difusión, una gota necesitaría varias horas hasta alcanzar dicho tamaño, lo cual contradice la rápida formación de precipitaciones (entre 15 y 20 minutos) observada en las nubes cálidas [3].

Debido a esta incertidumbre a la hora de explicar el rápido crecimiento de las gotas observado en estas etapas, se ha creado una hipótesis, cada vez más aceptada, de que la turbulencia influye de manera fundamental en el ensanchamiento del espectro de dimensiones de las gotas al aumentar las colisiones entre los núcleos de condensación y generando en última instancia un cierto número de gotas de gran tamaño.

Crecimiento por colisión – coalescencia

Como ya se ha mencionado, para etapas más avanzadas en el crecimiento de gotas en nubes cálidas, en las que las gotas tienen radios de 100 μ m o mayores, existe un mecanismo que se basa en la interacción entre las diferentes gotas para dar lugar, finalmente, a la precipitación en forma de lluvia. Este mecanismo de crecimiento es el de colisión – coalescencia. A continuación se exponen los modelos que explican este fenómeno con mayor profundidad.

Como hipótesis para el estudio de este mecanismo, se asumirá que las gotas son esféricas y se despreciarán las deformaciones producidas al interactuar entre ellas [30].

Debido a las diferentes velocidades producidas por la respuesta de gotas de agua con diferente masa ante fuerzas gravitatorias, eléctricas y aerodinámicas, parejas aisladas de gotas colisionan de manera ocasional entre ellas dando lugar a un proceso de coalescencia (en ocasiones y bajo determinadas condiciones) y formando así una gota de mayor tamaño. A partir de este punto aparecen dos modelos diferentes para explicar los acontecimientos que se suceden a continuación y que dan como resultado final la lluvia. Estos modelos son: *Modelo de crecimiento continuo* y *Modelo estocástico de crecimiento*. Como se verá a continuación, cada uno de estos modelos presenta ciertas virtudes y ciertos defectos a la hora de explicar la formación de precipitaciones.

Modelo de crecimiento continuo

Este modelo enuncia que el proceso de colisión entre gotas se repite aleatoriamente dando lugar a un cierto número inicial de las mismas que consiguen el tamaño suficiente para iniciar un descenso a una velocidad mayor que las gotas que les rodean. Durante la precipitación de estas gotas a través de la población homogénea de pequeñas gotas en las que se encuentran, chocan y coalescen con las gotitas que se encuentran en su trayectoria, convirtiéndose así en gotas recolectoras y aumentando su volumen a medida que caen.

La existencia de unas pocas de estas gotas recolectoras basta para desencadenar el inicio de las precipitaciones debido fundamentalmente a la combinación de dos procesos. En primer lugar, las gotas de gran tamaño tienen mayor probabilidad de seguir

creciendo. El segundo proceso es el fraccionamiento de las mismas cuando alcanzan tamaños de 1.5mm a 6mm (Figura 5) dando lugar a un crecimiento exponencial de gotas [30].

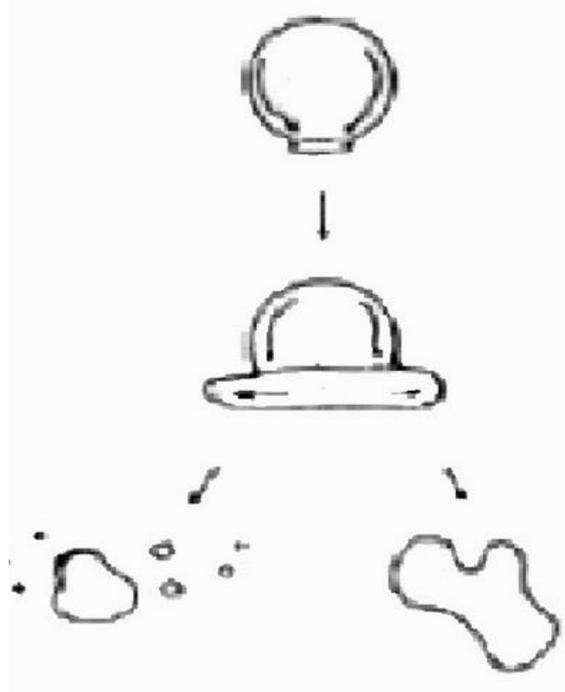


Figura 5: Esquema del fraccionamiento de gotas de tamaños de 1.5mm a 6mm

En el modelo de crecimiento continuo, el crecimiento de las gotas viene representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{dm_1}{dt} = K(r_1, r_2)w_L \quad (2.2)$$

Donde r_1 es el radio de la gota recolectora con y r_2 representa las gotas de tamaño uniforme que la rodean ($r_2 < r_1$). El contenido acuoso de la nube viene representado por w_L [kg/m^3]. K es el kernel de colisión para una captura hidrodinámica y se define como:

$$K(r_1, r_2) = E_c \pi (r_1 + r_2)^2 (U_{\infty,1} - U_{\infty,2}) w_L \quad (2.3)$$

Siendo E_c la eficiencia del proceso del proceso de coalición – coalescencia y $U_{\infty,i}$ las velocidades terminales respectivamente. A continuación se definirán estos parámetros más detalladamente.

La eficiencia de colisión – coalescencia (E_c) es un parámetro que se define por la *eficiencia de colisión* (E) y la *eficiencia de captura* (E'), de la siguiente forma: $E_c = E \cdot E'$. La eficiencia de colisión (E), es la relación entre las gotitas de la distribución homogénea con las que choca la gota recolectora y las existentes en la trayectoria de la misma. El resto de gotitas, que no chocan, son barridas lateralmente siguiendo las líneas de corriente de la gota recolectora. En la eficiencia de colisión influyen diversos aspectos como la distancia que existe entre el centro de la gota recolectora y el centro de la gota pequeña (y_c), la turbulencia, el tamaño de las gotas y la relación de los radios de las gotas (r_1/r_2), ya que una gran diferencia de radios hace que las gotas pequeñas tiendan a seguir las líneas de corriente de la gota recolectora y gotas de radios similares tienden a mantener sus propias trayectorias [30]. En la figura que se muestra a continuación se muestra esquemáticamente la interacción en el par gota recolectora gota captada.

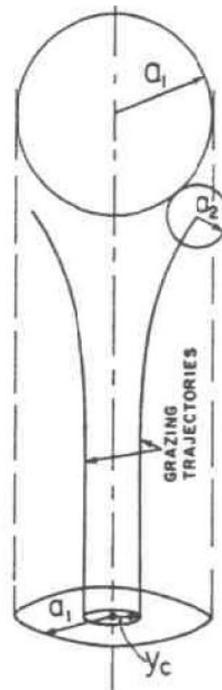


Figura 6: Esquema de la interacción hidrodinámica del par de gotas

Por otra parte, la eficiencia de captura (E') cuantifica la cantidad de gotas de radio r_1 en las que, tras colisionar con gotas de radio r_2 ($r_1 > r_2$), se produce un proceso de coalescencia creando una nueva gota de mayor tamaño. Se ha demostrado experimentalmente que cuanto más próximos sean los tamaños de las gotas implicadas, la eficiencia de captura se hace menor.

Las velocidades terminales de caída de gotas ($U_{\infty,i}$) representan la diferencia de velocidades entre las distintas gotas de lluvia, que son las que producen las capturas de las mismas al chocar unas con otras. Cuando la fuerza de arrastre de la gota y el efecto de la gravedad sobre la misma son iguales, entonces la gota cae con respecto al aire con su velocidad terminal. Existen aproximaciones matemáticas empíricas para definir estas velocidades, en función del tamaño de las gotas, en las que se desprecian los valores de la turbulencia. A continuación se muestran estas aproximaciones para un valor del número de Reynolds pequeño:

$$- \quad r < 40\mu\text{m}: \quad U_{\infty} = k_1 r^2 \quad (k_1 = 1.19 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}) \quad (2.4)$$

$$- \quad 40\mu\text{m} < r < 0.6\text{mm} \quad U_{\infty} = k_2 r \quad (k_2 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}) \quad (2.5)$$

$$- \quad r > 0.6\text{mm} \quad U_{\infty} = k_3 r^{1/2} \quad (k_3 = 2.2 \cdot 10^3 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1/2} \text{ cm}^{1/2} \text{ s}^{-1}) \quad (2.6)$$

Siendo ρ_0 una densidad de referencia y ρ la densidad del aire que rodea la gota.

Gráficamente, la evolución de la velocidad terminal de caída en función del tamaño de la gota se representa de la siguiente manera:

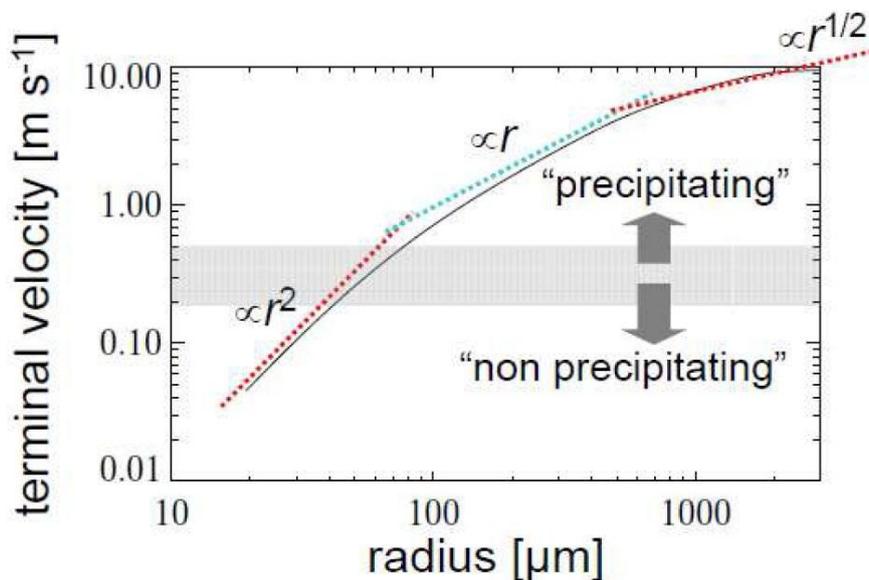


Figura 7: Velocidad terminal de las gotas

El modelo de crecimiento continuo, sin embargo, asume ciertas hipótesis que hacen que el tiempo predicho para la formación de lluvia por colisión entre pares de gotas sea sobreestimado. Entre estas hipótesis que aumentan el tiempo predicho en relación al observado en la realidad, se encuentra por ejemplo, la asunción de distribuciones homogéneas de gotas en las nubes, cuando en la realidad, existen zonas de altas concentraciones de gotitas que aumentarían (o disminuirían en caso contrario) la velocidad de formación de precipitaciones. Otros factores que disminuyen este tiempo son la existencia de turbulencia, cuya presencia no se considera en el modelo de crecimiento continuo, o la influencia de corrientes ascensionales dentro de la nube que tampoco se toma en consideración.

Estas malas aproximaciones dan lugar a un segundo modelo en el que no se estudia el fenómeno como un proceso de captación de gotitas por parte de gotas recolectoras, sino que tiene una base estadística en las que las colisiones son sucesos individuales con una distribución de probabilidad en el tiempo y el espacio [28].

Modelo estocástico de crecimiento por colisión - coalescencia

Como ya se ha mencionado, este modelo analiza la probabilidad estadística de la colisión individual entre pares de gotas para un espacio y un tiempo determinado, estudiando así la evolución global del espectro de gotas. Por tanto, este comportamiento viene definido por la ecuación estocástica de coalescencia [28]:

$$\frac{dn_k}{dt} = \left(\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{k-1} K_{i,k} - n_i n_{k-i}\right) - n_k \sum_{i=1}^{\infty} K_{i,k} n_i \quad (2.7)$$

Siendo n la concentración de partículas. Los términos la ecuación anterior representan:

- $\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{k-1} K_{i,k} - n_i n_{k-i}$: contabiliza el número de moléculas k que se crean por unidad de tiempo debido al proceso de colisión – coalescencia.
- $n_k \sum_{i=1}^{\infty} K_{i,k} n_i$: contabiliza la desaparición de moléculas k por unidad de tiempo debido al proceso de colisión – coalescencia que dan como resultado moléculas de mayor volumen.

K es el coeficiente kernel de colisión y representa la probabilidad de que una gota de volumen u , capte a una de volumen v (y viceversa) que en este modelo, a diferencia del anterior, se expresa en función del volumen de las gotas y no con su radio:

$$K(u, v) = K\left[\left(\frac{3u}{4\pi}\right)^{1/3}, \left(\frac{3v}{4\pi}\right)^{1/3}\right] \quad (2.8)$$

Con este modelo estocástico se obtienen velocidades de crecimiento hasta 50 veces superiores al obtenido con el modelo continuo. A continuación se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos con este modelo.

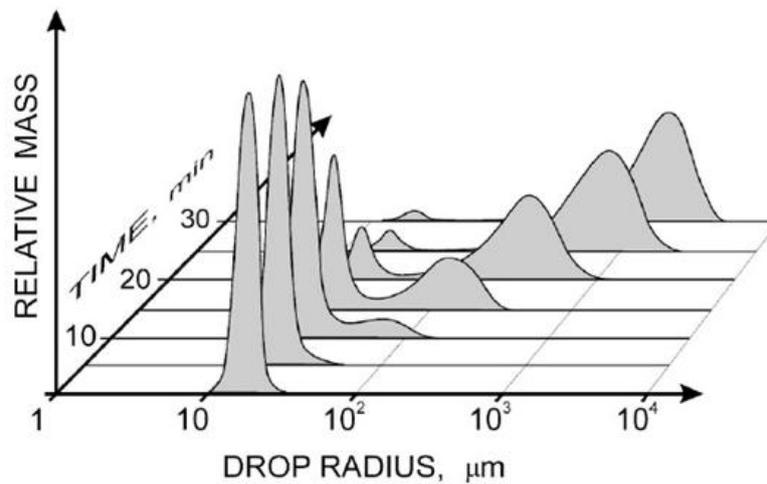


Figura 8: Ejemplo de modelo estocástico

Se puede observar como en apenas 10 minutos, se inicia un crecimiento explosivo por colisión - coalescencia en las que más de la mitad de la población inicial de gotas da lugar a gotas de tamaño de 1 mm.

Este método, a pesar de la mejoría introducida con respecto al modelo de crecimiento continuo, se ha utilizado relativamente poco hasta la aparición de cálculo computacional. Sin embargo, aunque arroja mejores resultados, la velocidad de formación de lluvia (unos 30 minutos) sigue encontrándose por debajo de lo observado en las nubes cálidas (del orden de 15 minutos). Por tanto, se demuestra que los efectos estadísticos son de gran importancia para explicar la fase de colisión – coalescencia pero siguen sin ser suficientes para explicar el desarrollo real de las gotas.

Como se ha visto, los procesos de condensación y de colisión – coalescencia son insuficientes para explicar el rápido crecimiento de las gotas en ciertas fases y las diferentes distribuciones de tamaño de gotas observados en las nubes cálidas, sobre todo en el crecimiento del denominado size gap (gotas de radios 10 - 100 μ m). Por ello, los últimos estudios se centran en los fenómenos turbulentos y su rol fundamental como activador de las etapas de condensación y colisión – coalescencia.

2.2.3 La turbulencia en partículas

Se han realizado diversos estudios acerca de los efectos de la turbulencia sobre partículas de diferentes tamaños. A partir de ellos, se han observado dos fenómenos principalmente. El primero de ellos es que la inercia de las partículas pesadas hace que éstas se concentren en regiones de alta tensión y baja vorticidad, efecto conocido como *concentración preferencial*. El segundo fenómeno observado, denominado *asentamiento gravitacional*, es que la turbulencia incrementa la velocidad de asentamiento a través de barridos preferenciales de las partículas hacia regiones aguas abajo [31; 32].

Concentración preferencial

La concentración preferencial es la tendencia de las partículas a moverse lejos de las regiones de alta vorticidad (Figura 9a) y acumularse en zonas de altas tensiones (Figura 9b), como se muestra esquemáticamente a continuación.

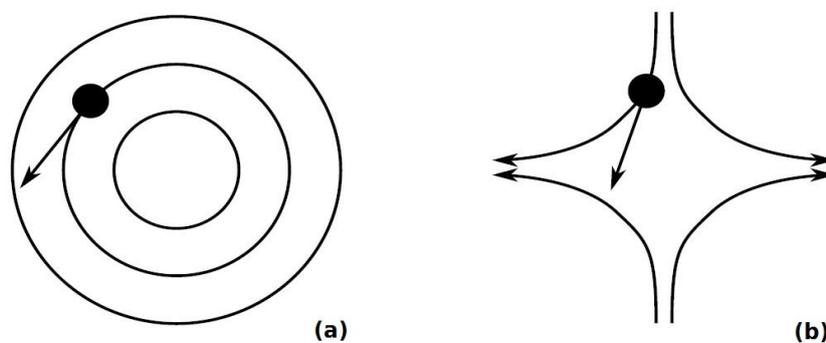


Figura 9: Tendencia de las partículas en flujos turbulentos

Esta concentración preferencial se debe a los movimientos a pequeñas escalas de la turbulencia. Por este motivo, se usa la escala de *Kolmogorov* para definir la constante temporal del fluido. El número de *Stokes* (St) es un parámetro adimensional que cuantifica el efecto de la inercia de las partículas en sus interacciones con las estructuras del flujo turbulento. Este se define como la relación entre el tiempo de relajación de la partícula (τ_p) y la escala temporal Kolmogorov turbulenta (τ_k).

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_k} \quad (2.9)$$

En la Figura 10 se muestran diferentes ejemplos de la disposición de las partículas para distintos números de Stokes.

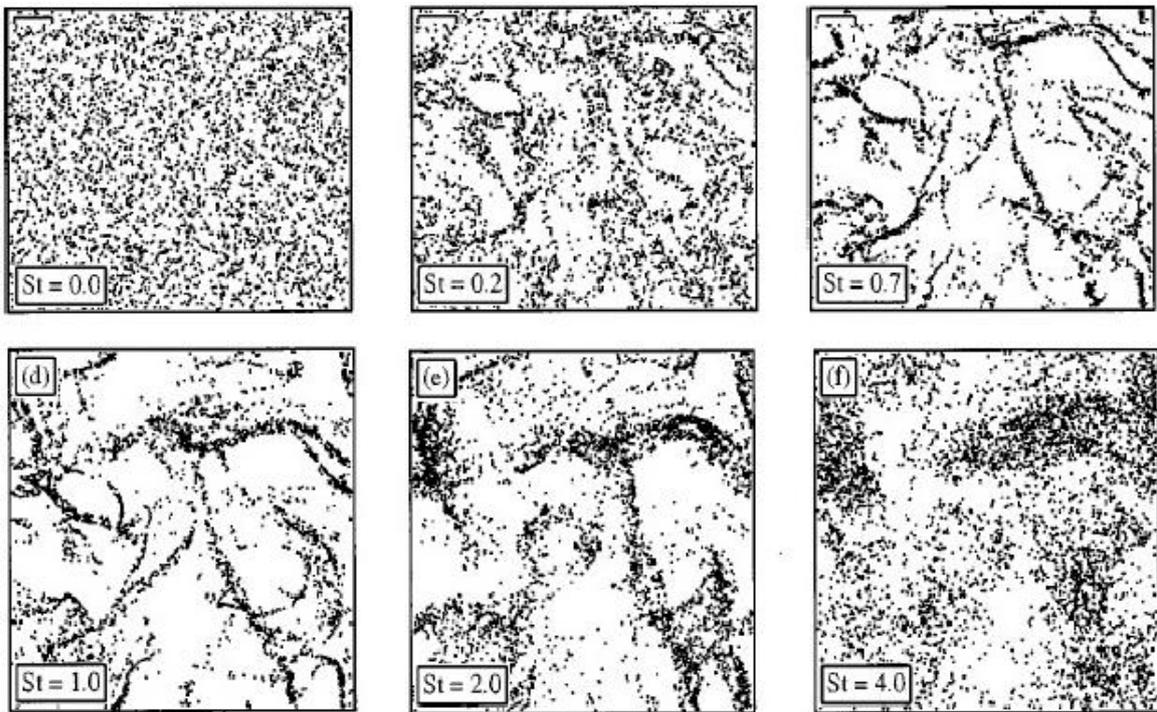


Figura 10: Disposición de partículas (2D) en función del número de Stokes [31]

En la figura anterior se puede observar cómo la concentración preferencial más pronunciada (*d*) tiene lugar cuando el valor del número de Stokes es aproximadamente 1 ($St \approx 1$). Por tanto, el agrupamiento de las partículas se verá afectado en mayor o menor medida por la fuerza de la turbulencia (representado por el número de Reynolds).

Este fenómeno da lugar a regiones de alta concentración de gotas (en el caso de las nubes) debido a las diferentes trayectorias que toman estas para evitar las anteriormente mencionadas zonas de alta vorticidad.

Asentamiento gravitacional

Cuando las fuerzas gravitacionales se toman en consideración, las partículas pesadas poseen una velocidad vertical relativa al flujo turbulento que provoca una interacción de las mismas con las estructuras de vórtices a través de las trayectorias que los cruzan. Las partículas son barridas predilectamente aguas abajo en el flujo con un incremento de la velocidad de asentamiento, en comparación con un flujo inactivo, debido a la acción turbulenta [33].

Este aumento de la velocidad terminal inducida en las gotas hace que muestren diferentes aceleraciones inerciales dentro del flujo aumentando de esta manera la eficiencia de las colisiones, ya que, como se vió en el apartado 2.2.2, el coeficiente kernel depende de la diferencia de la velocidad terminal de las gotas.

Ecuación de la colisión turbulenta

Para mostrar el efecto de la concentración preferencial en la frecuencia de las colisiones se utiliza el concepto de Función de Distribución Radial RDF (*Radial Distribution Function*) desarrollada a partir de la teoría cinética de los gases [34]. La ecuación para la frecuencia de las colisiones en una población de partículas se expresa como:

$$Nc = \frac{1}{2} \pi \sigma^2 n^2 g(\sigma) \int w P(w|\sigma) dw \quad (2.10)$$

Donde σ es el diámetro de la partícula, n es la densidad de la partícula, $g(\sigma)$ es el RDF de la partícula evaluada, w es la velocidad relativa y $P(w|\sigma)$ es la velocidad relativa PDF (*probability density function*) a la distancia de contacto. La distancia de contacto es el diámetro de la partícula o la separación entre dos partículas en el instante de la colisión.

La RDF mide la probabilidad de encontrar una gota en un espacio esférico de grosor dr y radio r_i centrada en la posición de cada gota. Esta función está normalizada de tal forma que, para una población de gotas separadas entre sí por una distribución completamente aleatoria de distancias, el RDF vale 1. Si las gotas se concentran de una manera preferente, el RDF lo reflejará adquiriendo un valor en esta región mayor que 1.

Resumiendo lo visto en los conceptos teóricos, los estudios han demostrado el papel fundamental que la turbulencia tiene en los mecanismos responsables de variar el movimiento relativo de las gotas, su distribución espacial y su eficiencia de colisión y consecuentemente, justificando su importancia en la aceleración de los procesos de condensación y de colisión – coalescencia que dan lugar al rápido crecimiento del espectro y de gotas y, en última instancia, la formación de precipitaciones.

Sin embargo, el estudio de la turbulencia y su influencia en la microfísica de las nubes se encuentra en la actualidad en una etapa muy inicial, en la que en los estudios preliminares ya realizados se han considerado muchas simplificaciones. Es por eso, por lo que las investigaciones en este campo necesitan un gran trabajo para el desarrollo de modelos más fiables con el objetivo de alcanzar así un mayor entendimiento de los fenómenos que dan lugar a la formación de las precipitaciones, concretamente, en las nubes cálidas.

2.3 Características del flujo

A continuación se exponen las condiciones que nos proponen recrear en el túnel de viento para realizar el estudio [1].

Un flujo homogéneo, isotrópicamente turbulento cargado de micro gotas creado en un túnel de viento. Una malla creará una turbulencia homogénea, isotrópica, y lentamente descendiente con un número de Reynolds (Re_λ) de hasta 250 basado en la microescala Taylor. Un conjunto de inyectores incrustados en la malla atomizarán las pequeñas gotas en el flujo. La fracción volumétrica de las gotas será similar a la encontrada en las nubes. Regulando el flujo de aire del túnel de viento y los atomizadores, se podrá controlar con precisión el índice de disipación turbulenta que se encontrará en un rango de 10^{-4} a $1\text{m}^2/\text{s}^3$, creándose así las condiciones de la mayoría de las nubes cumulus y cumulo-nimbus.

	EXPERIMENTOS	NUBES CUMULUS
Índice de Disipación Turbulenta (ϵ) [m^2/s^3]	$10^{-4} - 1$	$10^{-4} - 10^{-2}$
Número de Reynolds (Re_λ)	50 – 250	$10^3 - 10^4$
Longitud de escala Kolmogorov (η) [μm]	200 – 2000	600 – 1800
Diámetro de gota (d) [μm]	1 – 100	1 – 100
Fracción volumétrica de gota (α)	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-8} - 10^{-6}$
Tiempo respuesta gota ($\tau_p = \rho_p / \rho_a \cdot d^2 / 18\nu_a$) [s]	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-2}$
Tiempo de escala Kolmogorov (τ_k) [ms]	3.8 – 380	30 – 400
Número Stokes de gota ($St = \tau_p / \tau_k$)	$10^{-5} - 10$	$10^{-5} - 1$
Velocidad terminal gota ($v_t = \tau_p \cdot g$) [m/s]	$10^{-5} - 0,3$	$10^{-5} - 0,3$
Velocidad de escala Kolmogorov (v_k) [mm/s]	5 – 50	4 – 20
Ratio velocidad terminal (v_t / v_k)	$10^{-4} - 20$	$10^{-4} - 25$

Cuadro 1: Comparativa de las características de la turbulencia y las gotas en las nubes cumulus reales y las reproducidas en los experimentos

En la tabla se demuestra como la mayoría de las condiciones en las nubes se pueden reproducir en los experimentos a excepción del número Reynolds (Re_λ). Sin embargo, es importante destacar que la colisión coalescencia de las gotas está gobernada fundamentalmente por el movimiento relativo local de las gotitas cercanas y por debajo de la escala Kolmogorov, por lo que la media estadística de disipación turbulenta es de primaria importancia. El número de Reynolds juega un papel secundario, regulando la intermitencia de la disipación local [10; 11], siendo altamente

intermitente para números de Reynolds altos. A partir de esto se concluye (según estos estudios):

1. El índice de colisiones basado en una distribución Gaussiana de las fluctuaciones turbulentas difiere entre un 10% y un 15% del índice de colisiones basado en la probabilidad real para altos números de Reynolds.
2. El aumento del índice de colisiones como función del índice de disipación del flujo es cualitativamente similar para distintos números de Reynolds.
3. El índice de colisiones aumenta alrededor del doble cuando el Reynolds aumenta de 200 a 20000.

Aun con todo esto, el efecto del número de Reynolds se puede considerar en los modelos analíticos que se desarrollarán posteriormente en el estudio global, basándose en los resultados experimentales y computacionales, usando leyes asintóticas y relaciones de velocidad generalizada para altos números de Reynolds, como los ya realizados en [11].

Capítulo 3

Componentes del experimento

En este capítulo se describirán los elementos y componentes disponibles para la realización de la caracterización del flujo turbulento así como una breve justificación de la validez de los mismos. Todos estos dispositivos han sido diseñados y montados en las instalaciones del laboratorio de ingeniería mecánica de *University of Washington* en etapas anteriores que se encuentran enmarcadas dentro del programa global de investigación del cual forma parte este Proyecto Fin de Carrera. El objetivo de todos estos elementos, como ya se ha mencionado con anterioridad, es mimetizar las condiciones presentes en la nubes cálidas, mediante la creación de un flujo turbulento lo más homogéneo e isotrópico posible.

Básicamente, los elementos de los que se compone este experimento y que ya se encontraban implantados son los siguientes:

- Túnel de viento: cuya función es la de generación del flujo de aire homogéneo.
- Malla de inyectores: encargada de la creación de la turbulencia así como de la inyección de las gotas del tamaño característico al flujo
- Brazo robótico: mecanismo cuyo objetivo es realizar operaciones de desplazamiento automatizadas para los experimentos con los diferentes dispositivos de medición.

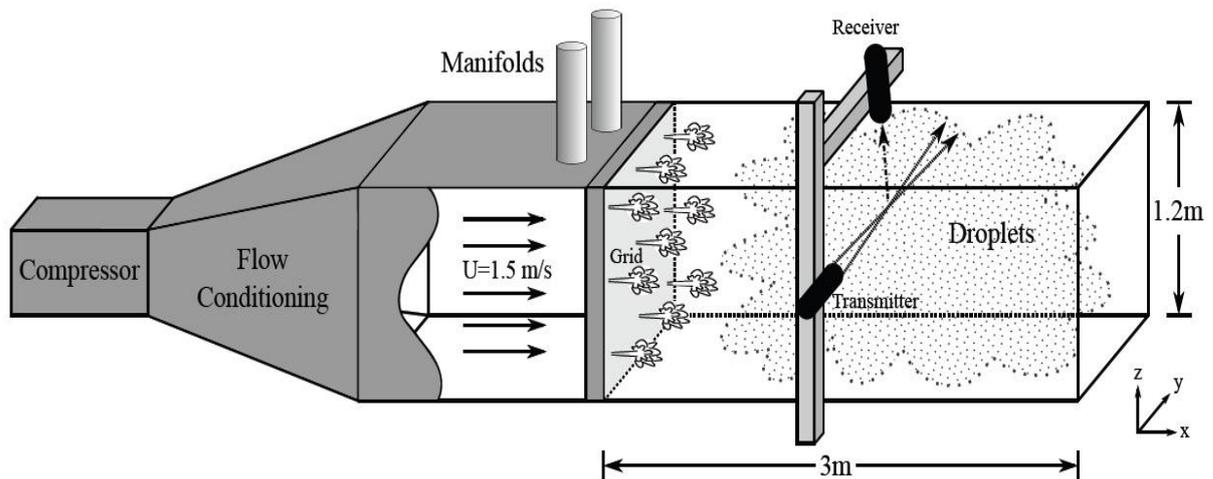


Figura 11: Esquema del montaje experimental

Estos elementos se describirán con más detalle a continuación.

3.1 Túnel de viento

Se trata de un túnel de viento horizontal de baja velocidad con flujo aguas abajo. El recorrido del aire a lo largo del túnel de viento se puede dividir en cuatro etapas o secciones principalmente: etapa del compresor, etapa de acondicionamiento, etapa de experimentación y etapa de difusión.

En la etapa inicial, el aire es impulsado por un compresor eléctrico axial del tipo GE 7A5 A1. La velocidad del compresor y, por tanto, el caudal de aire en el túnel se controla a través de un potenciómetro manual que regula el voltaje del compresor. Con el objetivo de recrear las condiciones de flujo deseadas, la velocidad de rotación media del compresor es de 1396 rpm con una desviación estándar de 4,5.

Para ajustar el flujo a las condiciones requeridas, en su segunda etapa este circula por diversos tramos de acondicionamiento. En primera instancia, a la salida del compresor, el aire transita por una sección con un ratio de expansión de 8:1 que remansa su velocidad media y suaviza las fluctuaciones que provienen del compresor. A lo largo de esta sección de expansión, el aire atraviesa una malla de panal de abeja que elimina la velocidad rotacional del mismo proveniente del compresor axial y reduce las escalas de turbulencia del mismo. Finalmente el aire circula por un tramo recto de sección cuadrada de 2,25x1,2x1,2m que ayuda a eliminar las posibles estructuras turbulentas remanentes en el flujo.

Con todo ello se obtiene finalmente un flujo de aire homogéneo y prácticamente uniforme (a excepción de una fina capa de contorno que se desarrolla en las paredes) a la entrada de la sección donde se llevan a cabo los experimentos. La velocidad media del flujo de aire es aproximadamente 1,5 m/s.

En la Figura 12 se muestran algunas imágenes correspondientes a la sección del compresor y una vista frontal desde el interior del túnel de viento (visto aguas arriba) de la malla de panal de abeja situada en la etapa de acondicionamiento.



Figura 12: Imágenes del compresor y el panel de abeja. Arriba a la derecha panel de abeja de sección 1,2x1,2m. Arriba a la izquierda y abajo (en horizontal) el compresor axial GE 7A5 A1.

Continuando aguas abajo, el flujo de aire atraviesa la malla de inyectores (que se describirá en la siguiente sección) y entra en la sección de experimentación donde, como su nombre indica, se llevan a cabo los diferentes test y medidas experimentales. Este tramo es de sección cuadrada y tiene una longitud de 3 metros (3x1,2x1,2m). Este tramo se divide así mismo en dos regiones, una de desarrollo del flujo y otra donde el flujo ya se encuentra completamente desarrollado. Este concepto se abordará más adelante en el apartado *3.2.1 Malla creadora de turbulencia*.

El material utilizado para su fabricación es Plexiglas (PMMA) con el objetivo principal de tener acceso visual al interior del túnel para realizar los diferentes experimentos con técnicas ópticas no intrusivas, como el PDPA. Los paneles de Plexiglas están soportados por una estructura compuesta de barras de aluminio situadas en el exterior (para no interactuar con el flujo que recorre el interior del túnel de viento) por los cuatro lados que aseguran la rigidez de la sección. Así mismo, las juntas de los distintos paneles están selladas con silicona para evitar posibles fugas de aire o agua y mantener así las condiciones adecuadas del flujo.

Por último, destacar que durante la construcción de esta sección, en los paneles de metacrilato se realizaron una serie de ventanas de diferentes tamaños en los cuatro lados de la estructura con el objetivo de tener acceso al interior del túnel de viento tanto para la realización de experimento intrusivos, como las medidas con el hotwire que se explicarán en el próximo capítulo, como para operaciones de mantenimiento. El cierre de estas ventanas mediante tornillos asegura su estanqueidad y continuidad en el interior del túnel de viento para no interferir así en el flujo.

En la Figura 13 se exhiben los paneles de Plexiglás resultantes soportados por la estructura de aluminio vista desde dentro del túnel de viento (vista aguas arriba) donde se puede ver la malla de inyectores y un plano general visto desde fuera.



Figura 13: Sección de experimentación. Vista interior aguas arriba (a la izquierda) y vista exterior con la estructura de aluminio (a la derecha)

Finalmente, en el último tramo del túnel se encuentra la etapa de difusión. Mediante la construcción de un “*rain catcher*” el flujo de aire decelera y se descarga en un espacio abierto en el laboratorio sin interactuar aguas arriba con el flujo. Para este propósito se diseñó con una sección 3,5 veces mayor que la de la etapa de experimentación y con una geometría que cambia el sentido de la corriente de aire dirigiéndola hacia arriba y hacia los lados, como se muestra en la Figura 14.

Además, este dispositivo se encarga de atrapar las gotas de agua evitando que invadan el espacio del laboratorio y siendo recogidas por un sumidero. El espacio abierto entre el *rain catcher* y el final de la sección anterior está cubierto por un material

filtrante utilizado en aires acondicionados que deja pasar el aire pero atrapa las gotitas de agua enviándolas al final de este tramo.



Figura 14: Rain catcher. Geometría interior del rain cácher (a la izquierda) y conjunto montado al completo con filtro de aire incluido (a la derecha)

3.2 Malla de inyectores

La malla de inyectores cumple dos funciones principalmente: la creación de una turbulencia homogénea e isotrópica y el soporte como estructura del sistema de inyección de gotas del tamaño característico en el flujo.

Debido a su doble funcionalidad, se analizarán por separado la malla creadora de turbulencia y el sistema de inyección de gotas, a pesar de estar ambos integrados en el mismo elemento.

3.2.1 Malla creadora de turbulencia

La malla utilizada en los experimentos se encuentra situada a la entrada de la sección de experimentación y está compuesta por 9 tubos horizontales y 9 tubos verticales de aluminio alineados en el mismo plano. Estos tubos son huecos, de manera que pueden albergar en su interior las líneas de abastecimiento de aire y agua de los 81 inyectores situados en las respectivas intersecciones de los tubos verticales con los horizontales. En la tabla y su correspondiente figura a continuación, se muestra un esquema de la misma con sus características básicas, así como una breve justificación de los parámetros seleccionados [35].

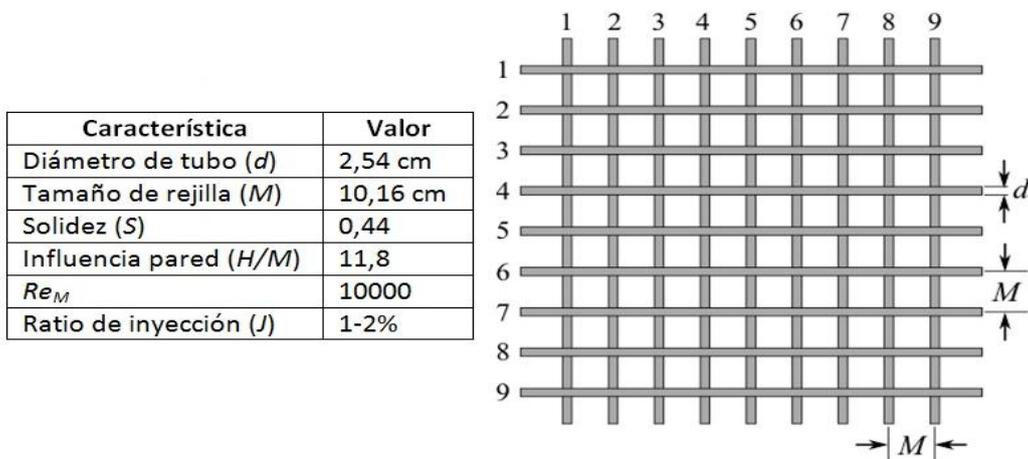


Figura 15: Esquema de la malla y valores característicos

La solidez (S) es un parámetro adimensional que describe el grado de obstrucción que la malla crea sobre el flujo, definiéndose como el cociente entre el área obstruida y el área total de la malla. Para asegurar un flujo homogéneo y que provea valores reproducibles, el valor de la solidez tiene que estar por debajo de $S=0,5$ [36].

Para evitar la influencia de las paredes en la turbulencia la relación de altura del túnel de viento (H) y el tamaño de la rejilla (M) han de ser mucho mayor que la unidad [37], eligiendo para nuestro caso $H/M=11,8$.

Los inyectores, que se describirán a continuación, debido su gran efecto en la turbulencia, convierten a la malla en una malla activa. Por este motivo, se ha tenido en cuenta el ratio de inyección (J) que relaciona el flujo volumétrico que aportan los inyectores en comparación con el flujo volumétrico medio a través de la malla. Siguiendo las recomendaciones de la bibliografía [38], para una buena homogeneidad del flujo se requiere $J<7\%$. En este experimento se tiene $J=1-2\%$ lo que asegura un rápido desarrollo del flujo aguas debajo de la malla en una turbulencia homogénea.

El flujo aguas debajo de la malla (sección de experimentación) se puede dividir en dos regiones (Figura 16), como se mencionó anteriormente. La primera de ellas es la región de desarrollo del flujo donde la turbulencia todavía es inhomogénea y no isotrópica y, por tanto, no válida para la experimentación. La segunda, región desarrollada, la interacción de las diferentes estructuras turbulentas provenientes de la malla logran un espectro continuo con una turbulencia completamente desarrollada que es prácticamente homogénea, isotrópica y de lento decaimiento.

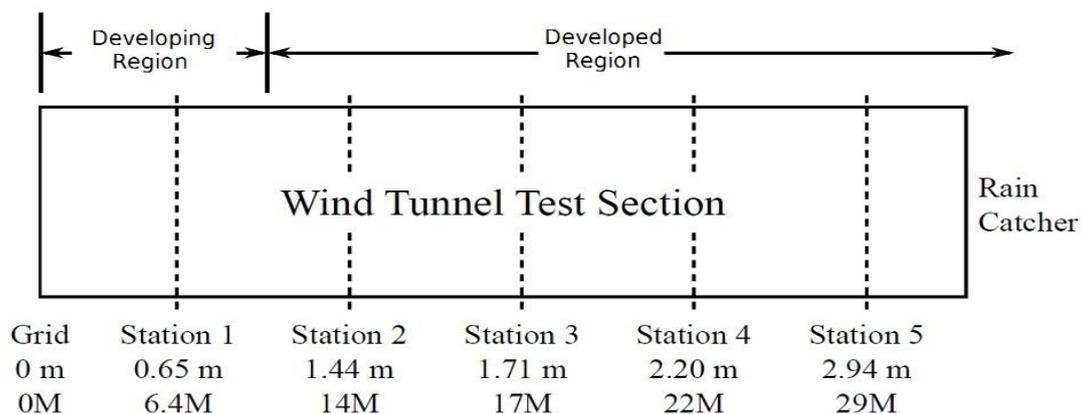


Figura 16: Sección de experimentación

Según la literatura [39], esta región se extiende desde los $10M$ hasta los $150M$ aguas abajo. Por tanto, se ajustaron el tamaño de rejilla (M) con la longitud de la sección de experimentación del túnel, la viscosidad cinemática (ν) y la velocidad media del flujo (U_0) deseado para alcanzar un número de Reynolds en la malla que cumpliera las condiciones mencionadas, siendo este finalmente.

$$Re_M = \frac{U_0 M}{\nu} = 10000 \quad (3.1)$$

Con todo esto, se logra finalmente la turbulencia homogénea e isotrópica deseada.

3.2.2 Sistema de inyección de gotas

El sistema de inyección de gotas es el encargado de llenar la sección de experimentación del túnel con gotas de agua del tamaño característico encontrado en las nubes cálidas. Los inyectores inyectan un chorro de aire a alta presión que interactúa con un chorro de agua a baja presión dando como resultado la atomización del líquido y produciendo una densa nube de pequeñas gotas ($1\mu\text{m} < d < 200\mu\text{m}$). Los inyectores se encuentran instalados en la malla de manera que el aire es inyectado paralelamente al flujo de túnel de viento. La Figura 17 ilustra la distribución de los inyectores.

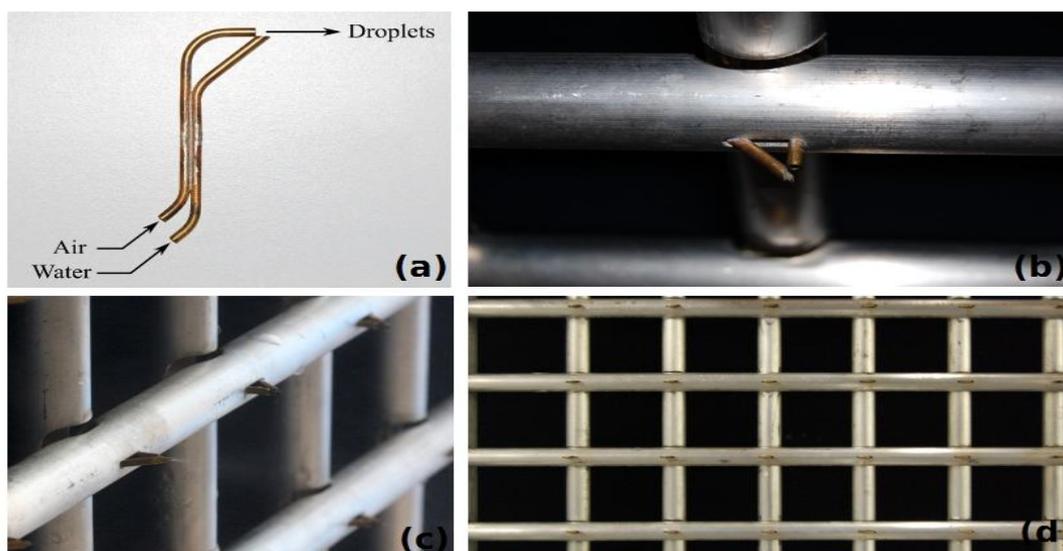


Figura 17: Inyectores. (a) esquema del funcionamiento del inyector; (b) y (c) disposición de los inyectores en la malla; (d) malla de inyectores

3. Componentes del experimento

La distribución del tamaño de las gotas así como la fracción de líquido inyectado se puede controlar mediante el panel que regula la presión de aire y caudal de agua suministrados.

Con el objetivo de vencer las pérdidas de carga y la caída de presión (no despreciable) entre las filas de inyectores superiores y las inferiores en la malla, se crearon unos colectores que se llenan antes de comenzar el experimento y que son alimentados constantemente por las vías de suministro de aire y agua. Las salidas de los colectores, que se conectan con los inyectores a través de unos finos tubos de alimentación, son de diferente área. Esto permite cancelar la diferencia de presión hidrostática dependiendo de la fila, consiguiendo el valor nominal del flujo volumétrico en cada inyector y asegurando la distribución homogénea de las gotas en el túnel [40].

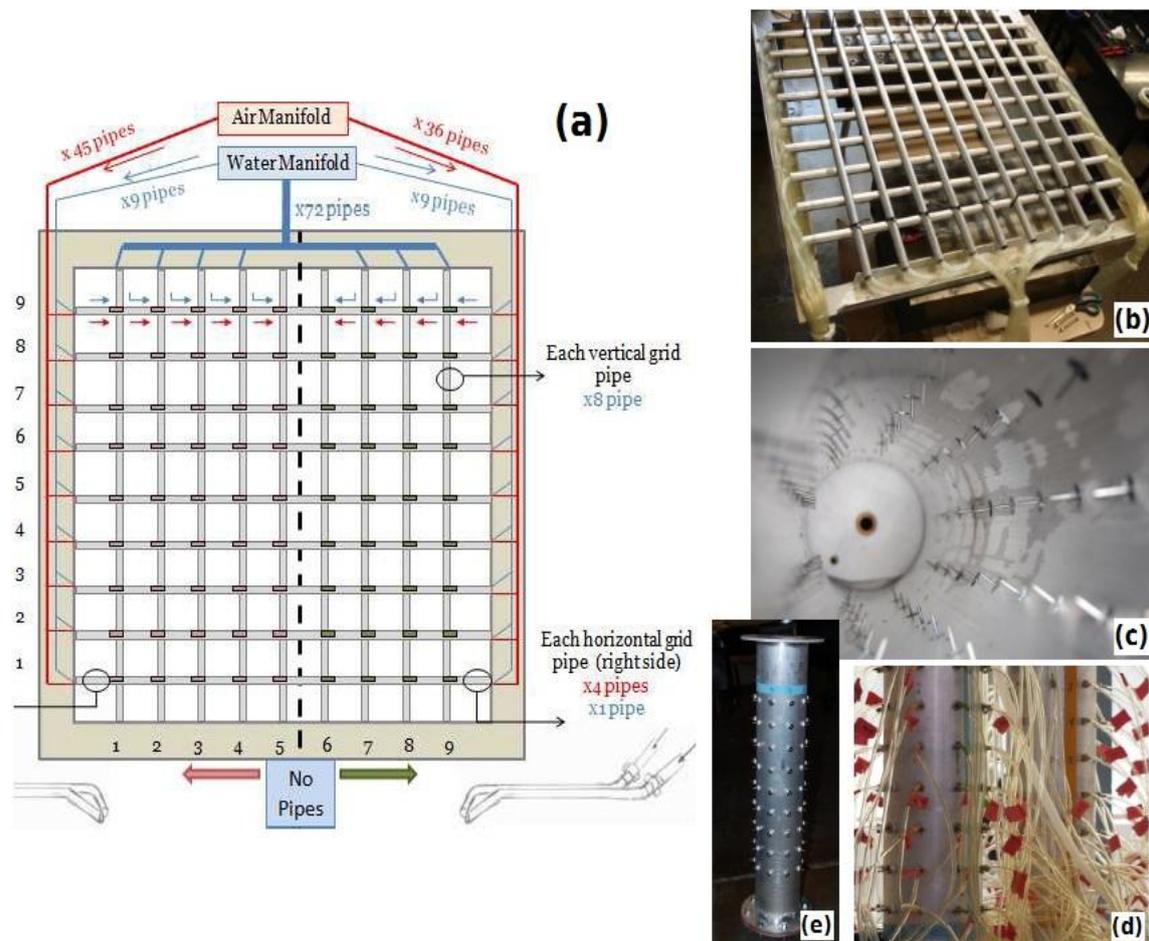


Figura 18: Sistema de inyección. (a) esquema de funcionamiento del sistema de inyección; (b) detalle de la distribución de las líneas de alimentación en la malla; (c) interior de un colector con las salidas de diferente área; (d) colectores con las líneas de alimentación montadas; (e) vista exterior del colector sin líneas de alimentación.

3.3 Brazo robótico

Para las operaciones de experimentación y toma de medidas se dispone de un brazo robótico para movimientos en 2D (plano transversal al túnel de viento), conectado a un ordenador desde el cual se puede controlar su posición en cada instante.

Mediante el software del brazo robótico, se pueden almacenar diferentes posiciones con una precisión de $\pm 0,005\text{m}$ automatizando sus desplazamientos y asegurando así la repetibilidad de las mediciones lo que conduce a un aumento de la fidelidad de los datos tomados en diferentes tandas de experimentos. Otra ventaja que aporta este brazo robótico es que permite fijar unos ejes y orígenes concretos que sirven para todos los experimentos. Gracias a unos discos adicionales situados en los extremos de los brazos, se permite el giro de los dispositivos montados sobre ellos en diferentes ángulos, como ilustra la siguiente figura:

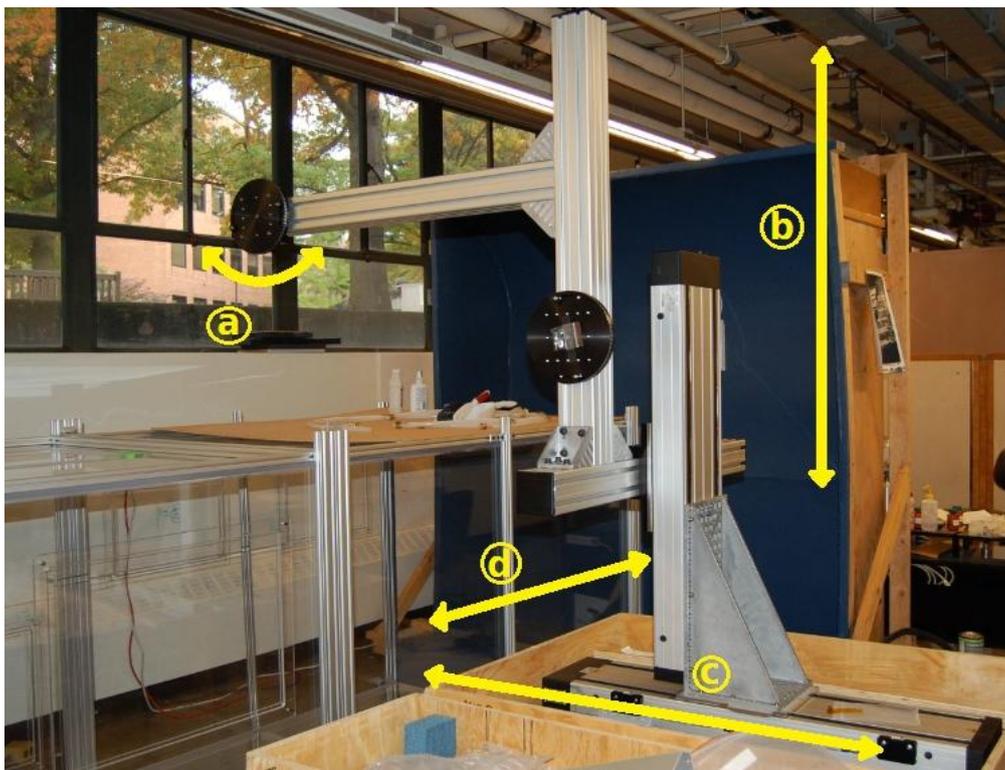


Figura 19: Brazo robótico instalado para su uso en el túnel de viento.

Tomando como origen de coordenadas en los ejes globales del túnel de viento la esquina inferior izquierda de la malla de inyectores si se observa el túnel de viento aguas arriba, (d) representa el movimiento en el *eje x* siendo positivo aguas arriba. (c)

representa el *eje y* y que es positivo hacia la pared del laboratorio que se ve en la figura. Por último, (b) representa el *eje z* positivo hacia arriba.

Cabe destacar que los movimientos de rotación (a) y desplazamiento longitudinal (d) han de realizarse manualmente.

Finalmente, dada su envergadura y robustez, sirve como estructura de soporte para los diferentes dispositivos de medida, ya sean no intrusivos, como el PDPA, o intrusivos, como el hotwire. Además, asegura la conservación de los mismos al reducir las operaciones manuales de cambio de posición de los dispositivos de medida.

Sin embargo, su uso también presenta inconvenientes. La poca flexibilidad a la hora de acceder al interior del túnel de viento (sobre todo en la experimentación con hotwire) debido a las posiciones y tamaños fijos de las ventanas de acceso en las paredes del mismo, ha hecho que durante la realización de los experimentos se hayan tenido que abordar numerosos problemas para alcanzar ciertas zonas en el interior del túnel, imposibles de acceder mediante operaciones sencillas de movimiento del brazo robótico.

Capítulo 4

Caracterización del flujo con hotwire

Hasta ahora, en la memoria de este Proyecto Fin de Carrera se han comentado los antecedentes que preceden a este estudio, los orígenes del problema y las soluciones que se han dado a lo largo de la historia así como la evolución de éstas con el desarrollo de los recursos tecnológicos y cognitivos, dando pie, finalmente, a la motivación de este gran proyecto global de investigación conjunta.

A través de los conceptos teóricos expuestos, se ha analizado el proceso de formación de las precipitaciones, concretamente en nubes cálidas, y los mecanismos que entran en juego. Esto ha sido de gran utilidad, ya que ha mostrado la incertidumbre existente a la hora de explicar los fenómenos físicos que justifican el vertiginoso crecimiento de las gotas en el denominado *size gap*, fundamental para el entendimiento de la rápida formación de precipitaciones en nubes cálidas. Se han planteado posibles hipótesis que pueden dar respuesta a esta incógnita, como es la influencia de la turbulencia en los procesos de colisión coalescencia de las gotas.

Con el objetivo de demostrar científicamente estas hipótesis y con ello poder crear modelos de predicción fiables, se propone un trabajo conjunto de varias disciplinas, que incluyen entre otras, la modelización computacional y la recreación artificial de las nubes cálidas para su estudio experimental mediante el uso de diferentes técnicas controladas en un laboratorio. Siendo este último el objeto de estudio del equipo del Dr. Aliseda, se ha diseñado un túnel de viento en el que se pretenden recrear las condiciones del flujo característico presente en este tipo de nubes, enunciando una serie de objetivos y parámetros para simular correctamente la realidad que ocurre en las nubes.

Tras el montaje del túnel de viento y la demostración de la validez de cada uno de los elementos individualmente que intervienen en su diseño [43], llega la hora de comprobar que todos estos componentes son capaces de reproducir las condiciones del flujo característico antes mencionado cuando funcionan juntos.

Para ello, y siendo éste el propósito concreto de este Proyecto Fin de Carrera, se utilizarán técnicas de anemometría para caracterizar la turbulencia del flujo. Como se verá a continuación, esto implica el diseño, fabricación y montaje de diferentes dispositivos además de, evidentemente, la toma de mediciones.

4.1 Fundamentos de la anemometría hotwire

Los anemómetros de hotwire (hilo caliente), también conocidos como anemómetros de temperatura constante o CTA por sus siglas en inglés (*Constant Temperature Anemometers*), haciendo referencia a sus principios de operación, son extensamente utilizados para la medición de turbulencia de diferentes flujos. Este tipo de anemometría funciona basándose en la transferencia convectiva del calor de un sensor al fluido que lo rodea. La cantidad de calor transferida está directamente relacionada con la velocidad del fluido. Por tanto, mediante el uso de finos hilos calentados eléctricamente, es posible determinar la velocidad del flujo de una manera bastante precisa.

Los motivos principales que han llevado a la elección de este tipo de tecnología son en primer lugar su facilidad de uso. En segundo lugar, gracias a sus dispositivos electrónicos, es capaz de medir pequeñas fluctuaciones en escalas muy pequeñas a grandes frecuencias gracias a su rapidez de respuesta, lo que lo hace ideal para la medición de fenómenos turbulentos. Además, su señal de salida es analógica, por tanto no hay pérdida de información. Finalmente, su precio es menor que el de otros sistemas tales como sistemas LDA o PIV.

4.1.1 Principios de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un CTA se basa en tener una sonda con una resistencia determinada y proporcional a la temperatura del hotwire. Se establece un circuito puente (Figura 21) determinando la resistencia, mediante un resistor regulable, que se desea que tenga el sensor durante el experimento (las otras dos resistencias de los brazos del puente tienen idéntico valor). El amplificador del circuito es el encargado de mantener la diferencia del voltaje a cero, lo que significa que mantiene las resistencias de los dos brazos iguales. Por tanto, cuando se coloca el sensor en un fluido, en este caso aire, con la circulación del mismo se produce un enfriamiento del sensor. Para mantener la temperatura (resistencia), el amplificador ajusta el voltaje del puente de manera que la corriente que circula por el sensor lo calienta a una temperatura tal, que proporciona la resistencia seleccionada previamente alcanzando de nuevo el equilibrio.

Por tanto, el voltaje del puente tendrá un mayor incremento cuanto mayor sea la velocidad del fluido. Esquemáticamente el funcionamiento es el siguiente:

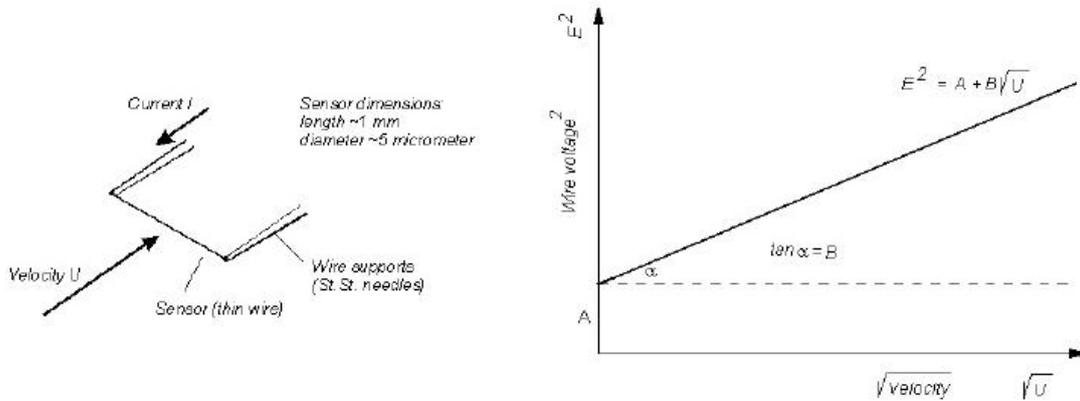


Figura 20: Esquema del funcionamiento de la sonda hotwire

La ecuación que gobierna este fenómeno se expresa a continuación.

$$W = Q = I^2 R_w = \frac{A}{d} Nu k_f (T_w - T_0) \quad (4.1)$$

- | | | |
|--------|---|--|
| Donde: | W : potencia Joule | Q : Calor transferido |
| | I : corriente eléctrica | R_w : resistencia del sensor |
| | T_w : temperatura sensor | A : área de transferencia |
| | d : diámetro del sensor | k_f : conductividad térmica del fluido |
| | Nu : coeficiente de transferencia de calor (adimensional) | |

La ley de *King* relaciona el voltaje con la velocidad de la siguiente manera:

$$I^2 R_w^2 = E^2 = (T_w - T_0)(A + BU^n) \quad (4.2)$$

- | | | |
|---------|-----------------|------------------------|
| Siendo: | E : voltaje | A y B : constantes |
| | U : velocidad | n : exponente |

Sin embargo, cuando el hotwire se somete a un fluido con cambios en su velocidad, éste no reacciona instantáneamente debido a su inercia térmica. Esto puede provocar un deterioro en las variaciones de la resistencia (y por tanto del voltaje) dando como resultado fluctuaciones menores de las realmente existentes. Por eso es necesario

la compensación de esta respuesta mediante componentes electrónicos tales como amplificadores realimentados y filtros que pueden llegar a incrementar el límite de frecuencia de adquisición hasta 1000 veces [41].

Por este motivo, las variaciones de voltaje se dirigen a través de una serie de filtros para eliminar el ruido de la señal y amplificadores realimentados. Finalmente las señales llegan a un ordenador donde, mediante un software, como se verá más adelante, se traduce en datos útiles para la determinación de la velocidad del fluido y sus fluctuaciones.

En la Figura 21 se muestra un esquema de la cadena de medición de un CTA típico, desde la sonda situada en el fluido que se quiere medir, hasta la llegada de la señal al ordenador donde se procesan los datos. Además, se muestra una imagen de mayor detalle del funcionamiento del circuito puente.

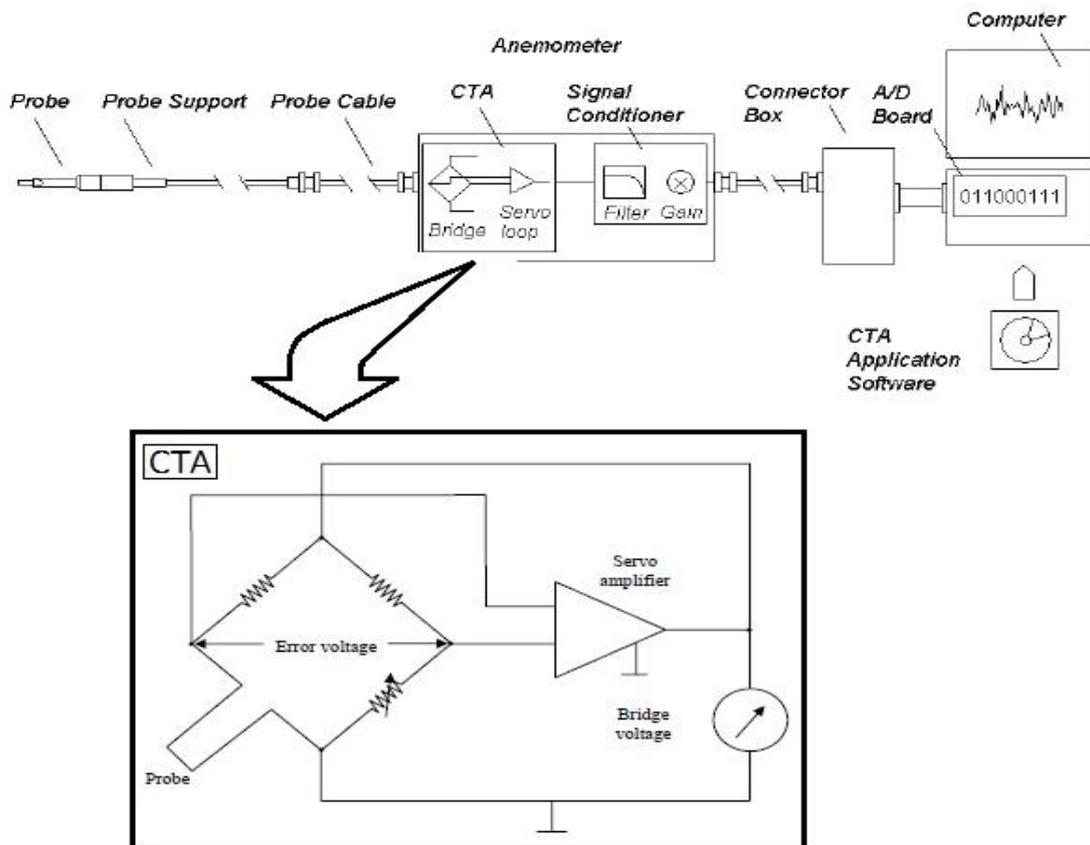


Figura 21: Circuito esquemático del hotwire. Detalle del circuito puente.

4.1.2 Morfología y selección

A la hora de elegir una sonda CTA hay que tener en cuenta una serie de requisitos. Entre ellos, los principales son el tipo de fluido, rango de velocidades, resolución requerida, intensidad de la turbulencia y fluctuación de la frecuencia del flujo, variaciones de temperatura, riesgo de contaminación y espacio disponible en el punto de medida. Se puede encontrar una guía rápida de selección de sensores en el *Anexo I*.

En el mercado principalmente se pueden encontrar cuatro tipos de sensores [42]: "Miniature wire", "Gold-plated", "Fibre film" y "Film-sensor".

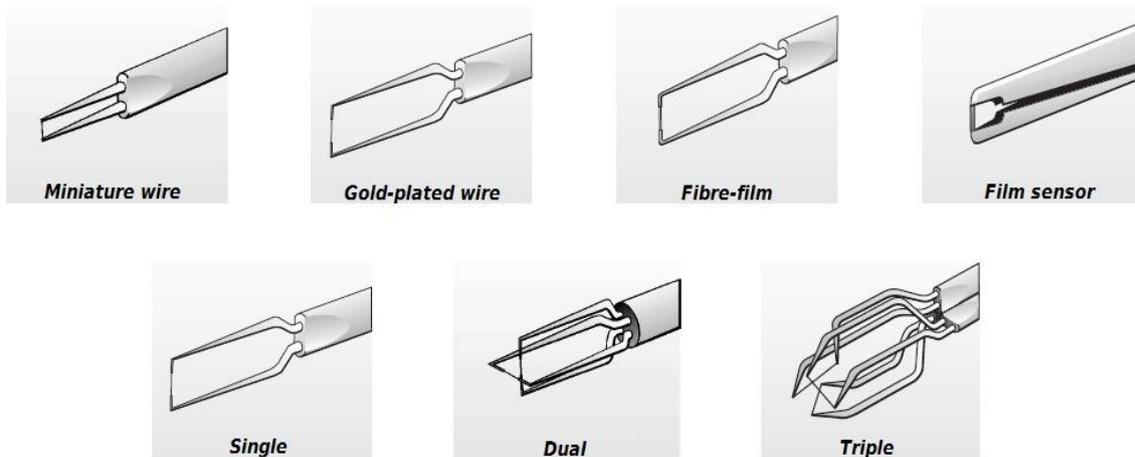


Figura 22: Tipos de sensores

Los sensores de filamento pueden ser *Miniature wire* y *Gold-plated*. Los primeros suelen tener filamentos de diámetros de $5\mu\text{m}$ y $1,2\text{mm}$ de longitud. Son la primera elección para aplicaciones de flujo de aire con intensidades de turbulencia de 5-10%. Son los de mayor frecuencia de respuesta. Los segundos, tienen la misma longitud que los anteriores pero con terminaciones que los alargan hasta 3mm para minimizar así las interferencias de las puntas. Se aplican para mayores intensidades de turbulencia (20-25%) y su frecuencia de respuesta es algo menor.

Los sensores *Fibre-film* tienen un diámetro de $70\mu\text{m}$ y $1,2\text{mm}$ de longitud activa. Son más robustos y se utilizan en flujos de aire sucio o agua. Su frecuencia de respuesta es menor que la de los sensores de filamento.

Por último los *Film sensor* son para flujos de aire sucio o agua con fluctuaciones de baja frecuencia y se suelen situar en las puntas de cuerpos aerodinámicos y cuñas.

Dependiendo del número de sensores pueden ser sencillos (*single*), doble (*dual*) o triples (*triple*). Los dos últimos se utilizan para aplicaciones de dos flujos dimensionales dependiendo de las condiciones del fluido y el ángulo de ataque. Se puede encontrar una amplia variedad de usos y tipos en la bibliografía. Los sensores sencillos se utilizan para flujos unidimensionales y unidireccionales. Existen diferentes geometrías en cuanto a puntas se refiere y han de colocarse con el sensor perpendicularmente al flujo.

Debido a las características del flujo de este estudio, se ha seleccionado un sensor *Miniature wire* ya que no se tienen turbulencias mayores del 10%. Además, es de gran interés la alta frecuencia de respuesta de este tipo de sensores. El flujo es unidireccional y unidimensional por lo que se seleccionará además un sensor del tipo “sencillo”.

Con esta técnica de medición, no se conectará el flujo de agua de los inyectores, con el propósito de no dañar el sensor con las medidas. Al ser gotas atomizadas, puede desprejarse su influencia a la hora de modificar la turbulencia del flujo. Por tanto, tan sólo se tendrá el flujo de aire proveniente del compresor del túnel de viento y del aire saliente de los inyectores.

Por limitaciones del material disponible, se tuvo que utilizar un sensor con ángulo de 45° como el de la Figura 23, por lo que fue necesario realizar un estudio para justificar la validez de este tipo de sensor que se muestra en la siguiente sección.

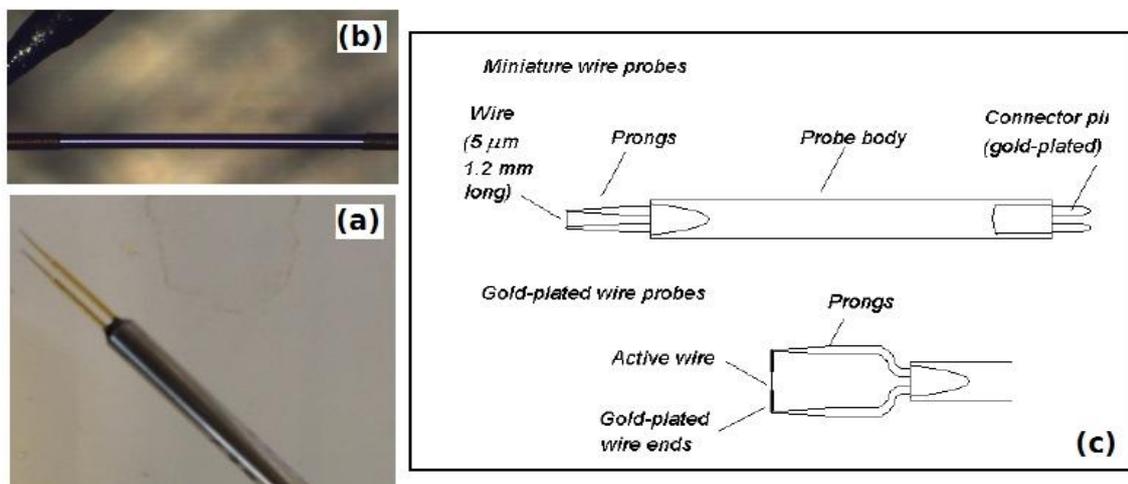


Figura 23: (a) Sensor hotwire 45°; (b) detalle del filamento; (c) morfología sensor hotwire

4.2 Preparación del experimento

A continuación se presenta el proceso experimental, describiendo paso a paso los el procedimiento seguido en orden cronológico, así como la solución de los problemas que se tuvieron que abordar durante este su transcurso.

4.2.1 Validación del sensor hotwire 45°

Como se ha comentado en el apartado anterior, fue necesario validar la funcionalidad del sensor hotwire de 45° para nuestros experimentos. Para ello se realizó un proceso de investigación en la bibliografía existente. De esta investigación se sacaron las siguientes conclusiones.

La relación de calor transferido en un hotwire asume que el vector de la velocidad es normal al filamento del hotwire. De hecho, la transferencia de calor depende en gran medida del ángulo entre el vector de la velocidad y el filamento. En el caso de un sensor ideal, donde no existe conducción de calor en las puntas, la transferencia de calor varía con el coseno del ángulo entre la velocidad y la normal del filamento (4.3). En la realidad, parte del calor es conducido a través de las puntas que sostienen el filamento y es necesario introducir un factor de sensibilidad direccional k , que describe la interferencia de las puntas [44; 45].

Sensibilidad direccional

$$U(\alpha)^2 = U(0)^2(\cos^2\alpha + k\sin^2\alpha) \quad (4.3)$$

Donde: $U(0)$: velocidad del fluido α : viraje (velocidad-normal)
 k : factor de sensibilidad direccional

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente este razonamiento.

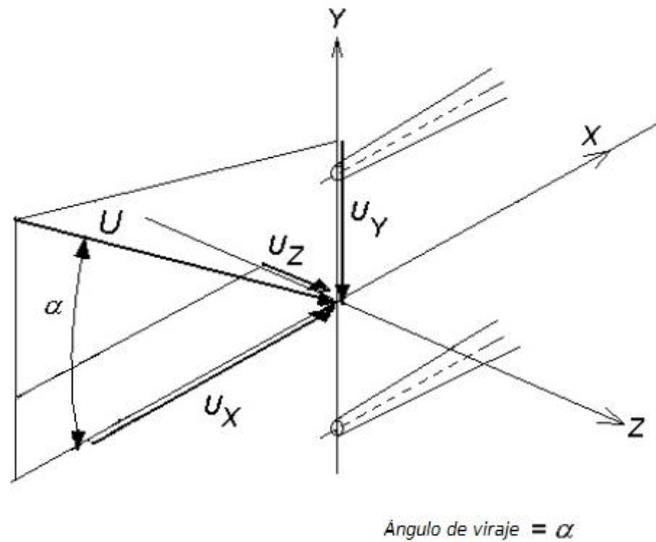


Figura 24: Sensibilidad direccional

A la luz de este estudio, es necesario construir un soporte que mantenga nuestro hotwire con una posición normal a la velocidad del fluido, que como ya se ha definido, es longitudinal al túnel de viento.

Este soporte deberá ser capaz de mantener el hotwire a un ángulo de 45° , ya que como se ha demostrado, las medidas tomadas influyen en gran medida de la posición del anemómetro. Además, deberá ser lo suficientemente alargado como para no interferir en las medidas produciendo recirculaciones del flujo o creando “efectos pared”, sin embargo ha de ser robusto al mismo tiempo para que la turbulencia no lo haga vibrar demasiado debido a su esbeltez. Y por último, tiene que ser versátil para que presente sencillez a la hora de su manipulación.

4.2.2 Diseño y fabricación del soporte del hotwire

Una vez ya definidos los requisitos que debe de cumplir el soporte se procede a su diseño y fabricación.

En primera instancia se fabrica un soporte alargado de madera. Se elige la madera como material inicial ya que es fácil de manejar y transformar. Este primer soporte se crea con el objeto de hacer la calibración del hotwire y la comprobación de la utilidad del diseño realizado.

Para ello se unieron dos listones uno más largo que otro. La función del listón largo es de soporte y la del corto es de refuerzo para evitar vibraciones y el movimiento del hotwire. El montaje de los dos listones y sus dimensiones se muestran en esta figura.

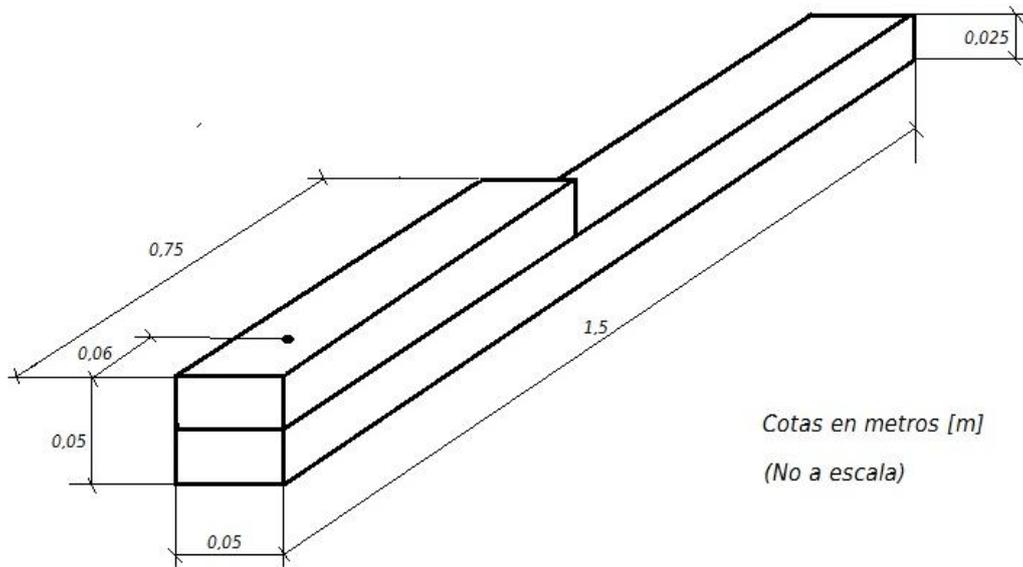


Figura 25: Esquema y dimensiones de soporte de madera

Se puede observar que se ha realizado un agujero pasante con ángulo de 45° por donde atraviesa el soporte del sensor del hotwire. En la Figura 26 aparece el montaje final, con el detalle de la unión del soporte de madera al brazo robótico.

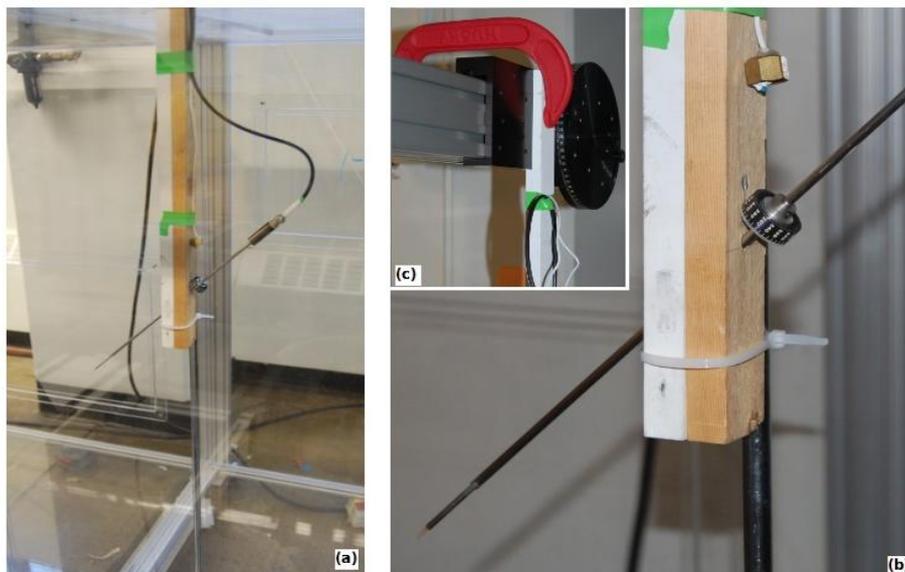


Figura 26: Montaje de soporte de madera, (a) dentro del túnel; (b) detalle del dial y montaje sobre el soporte; (c) detalle del montaje sobre el brazo robótico

En la figura anterior se puede ver que el montaje sobre el brazo robótico es provisional. También se ve como se ha montado un dial cilíndrico para asegurar que el hotwire mantiene su posición normal en ese plano y no existe rotación del mismo.

4.2.3 Puesta a punto del CTA

Antes de comenzar con la calibración del hotwire es necesario poner a punto el anemómetro CTA. La puesta a punto consiste básicamente en el *set up* del hardware definiendo el equilibrio en el puente del circuito mediante el *overheat adjustment*.

Este ajuste determina la temperatura (resistencia R_{dec}) de trabajo del sensor hotwire, mediante la regulación de su resistencia (como se explicó en los principios de funcionamiento). Para ello hay que definir el *overheating ratio* (a).

$$a = \frac{R_w - R_0}{R_0} \quad (4.4)$$

Donde R_w es la resistencia del sensor a la temperatura de operación y R_0 es la resistencia a la temperatura ambiente. En primer lugar se calcula R_0 a partir de la ecuación (4.5). El fabricante aporta los siguientes datos: $R_{0,0^\circ C} = 4,86 \Omega$, $(R_{100^\circ C} - R_{0^\circ C}) = 1,27 \Omega$. De la ecuación del manual [42] se despeja R_0 considerando $T_0 = 25^\circ$:

$$R_0(T_i) = R_{0,0^\circ C} + (R_{100^\circ C} - R_{0^\circ C}) \left(\frac{T_i}{100} \right) = 4,86 + 1,27 \left(\frac{25}{100} \right) = 5,1775 \Omega \quad (4.5)$$

Se tiene que $R_w = 8,04 \Omega$ (indicado por el fabricante del hotwire para una temperatura $T = 250^\circ C$), por tanto, se despeja de (4.4) obteniéndose:

$$a = \frac{8,04 - 5,1775}{5,1775} = 0,55 \quad (4.6)$$

Por otra parte, se mide con un ohmímetro la resistencia del cable y el soporte $R_{support+cable}=0,3 \Omega$. Finalmente se puede calcular R_{dec} con la que se ajusta el CTA [42]:

$$R_{dec} = (1 + a)R_0 + R_{support+cable} = (1 + 0,55)5,1775 + 0,3 = 8,32\Omega \quad (4.7)$$

A partir de este punto, R_{dec} será la nueva $R_w=8,32\Omega$ para las condiciones de trabajo, que se introducirá en el *overheat adjustment* del CTA (resaltado en la figura).

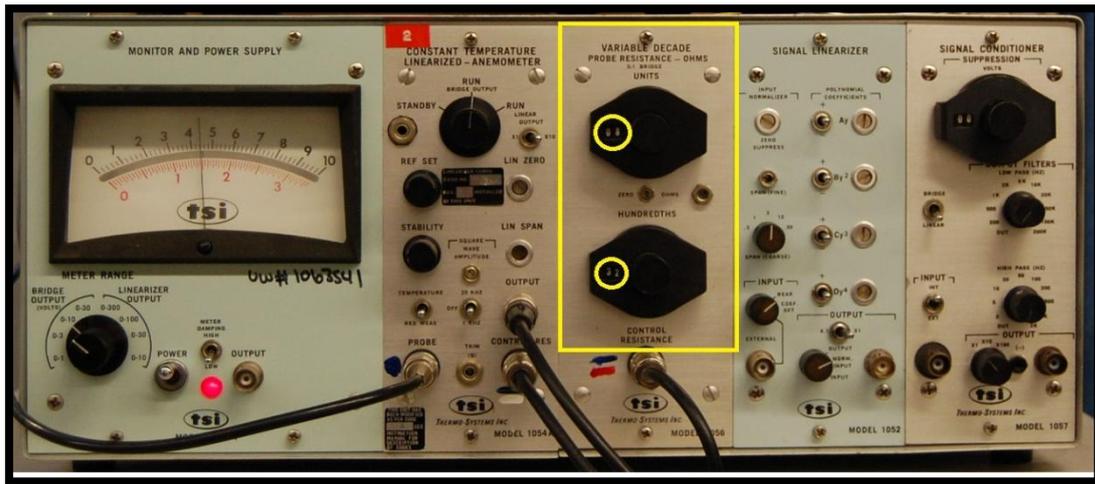


Figura 27: CTA ajustado

El uso práctico de este ajuste depende de cómo varíe la temperatura durante el *set up*, la calibración y finalmente el experimento. En principio el experimento que se lleva a cabo en este proyecto es a temperatura constante (se considera temperatura constante a variaciones de temperatura menores de $\pm 1^\circ\text{C}$). No obstante, en caso de que la temperatura cambiase más del rango permitido, habría que ajustar los datos obtenidos mediante ciertos sistemas de corrección. Por ello, el control de la temperatura en todo momento será de vital importancia para garantizar la calidad de los resultados obtenidos.

El control de la temperatura se llevará a cabo mediante un termómetro situado en la parte posterior del soporte del hotwire y cercano al mismo, como se muestra en la figura, evitando así posibles interferencias con el flujo y asegurando el correcto control de su variación.

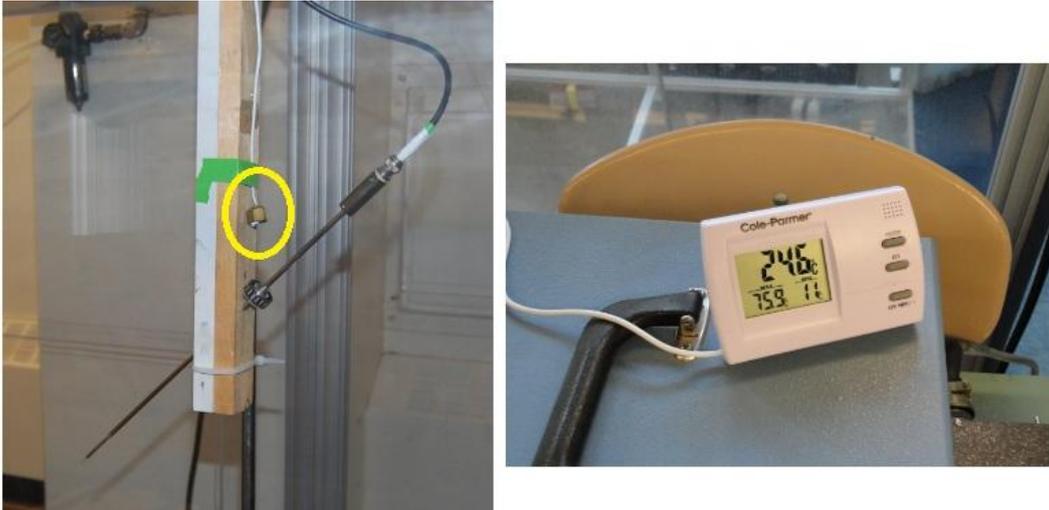


Figura 28: Termómetro de control

4.2.4 Calibración del hotwire

La calibración establece una relación entre la salida del CTA y la velocidad del fluido. Se realiza exponiendo el sensor del hotwire a una serie de velocidades conocidas, U , y relacionándolas con los voltajes que se obtienen, E . Representando una curva (E, U) con los puntos obtenidos, se halla la función de transferencia de la misma que se utilizará para la conversión de los voltajes en velocidades durante los experimentos.

Para tener una calibración controlada, con un flujo constante y de velocidad conocida que asegure la repetibilidad de la toma de datos, se va a utilizar un inyector proporcionado por *General Electrics* del cual se conocen todos sus parámetros característicos. Con la ayuda de un tubo de pitot se recogerán las velocidades de referencia. Como ya se ha comentado, la temperatura se controlará en todo momento para asegurar una correcta calibración.

La instalación del tubo de pitot se realiza de tal manera que la entrada al mismo se encuentre alineada con el filamento del sensor del hotwire, evitando así las posibles variaciones de la velocidad debidas a la diferente distancia que exista entre el emisor (inyector *GE*) y los receptores (hotwire y tubo de pitot respectivamente).

En la fabricación del soporte del tubo de pitot se busca, además, que asegure la posición fija en relación al hotwire, evitando cualquier deslizamiento o rotación del tubo. Finalmente, en el diseño se ha definido una distancia suficiente de separación entre hotwire y tubo de pitot para que no exista interferencia entre estos y el flujo mientras se toma las respectivas mediciones. Se ha intentado evitar, por tanto, el efecto pared o recirculaciones del flujo al chocar contra el soporte. Esta distancia es de $h=5\text{cm}$.

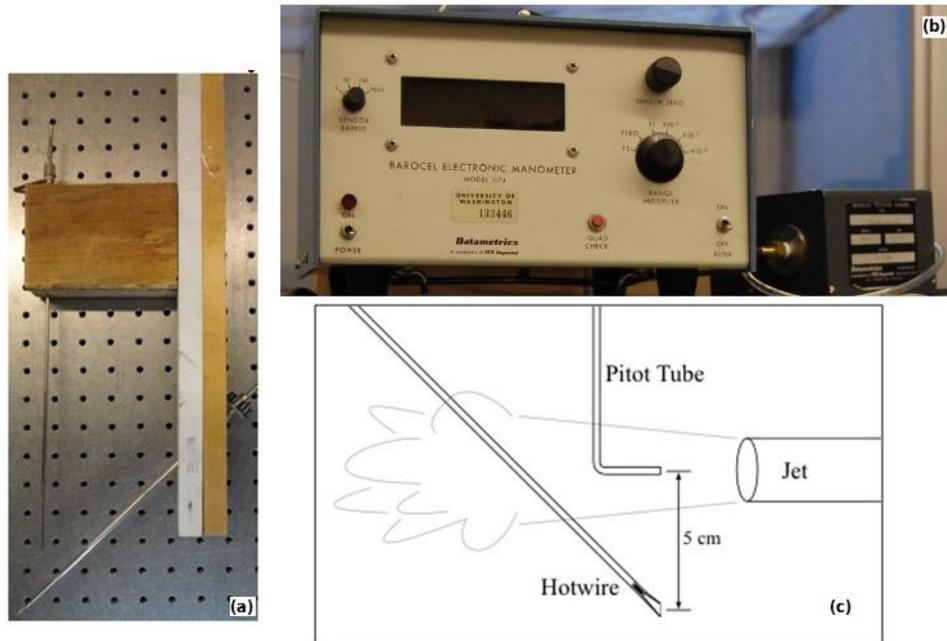


Figura 29: (a) soporte adicional del tubo pitot; (b) manómetro y transductor de presiones; (c) esquema del montaje

El transductor de presiones que se utiliza es *Datametrics Type 590* con rango de medida hasta 10 Torr (1333,2 Pa), lo cual supondrá un problema de precisión a la hora de medir bajas presiones, como veremos a continuación. El manómetro es *Datametrics Barocel electrónica manometer model 1074*.

Para proceder a la calibración, con la ayuda del brazo robótico se sitúa el tubo de pitot en el centro del chorro del inyector (posicionándolo iterativamente hasta alcanzar el máximo de presión) y se almacena esta posición como el origen de coordenadas. Para la toma de datos y el cambio de tubo de pitot a hotwire bastará con introducir la distancia exacta entre ambos en el software del brazo robótico y éste se encargará de moverlos con precisión.

En la Figura 30 se muestra el montaje final de los dispositivos situados ante el inyector *GE* listos para comenzar la calibración. También se muestra un esquema básico del procedimiento.

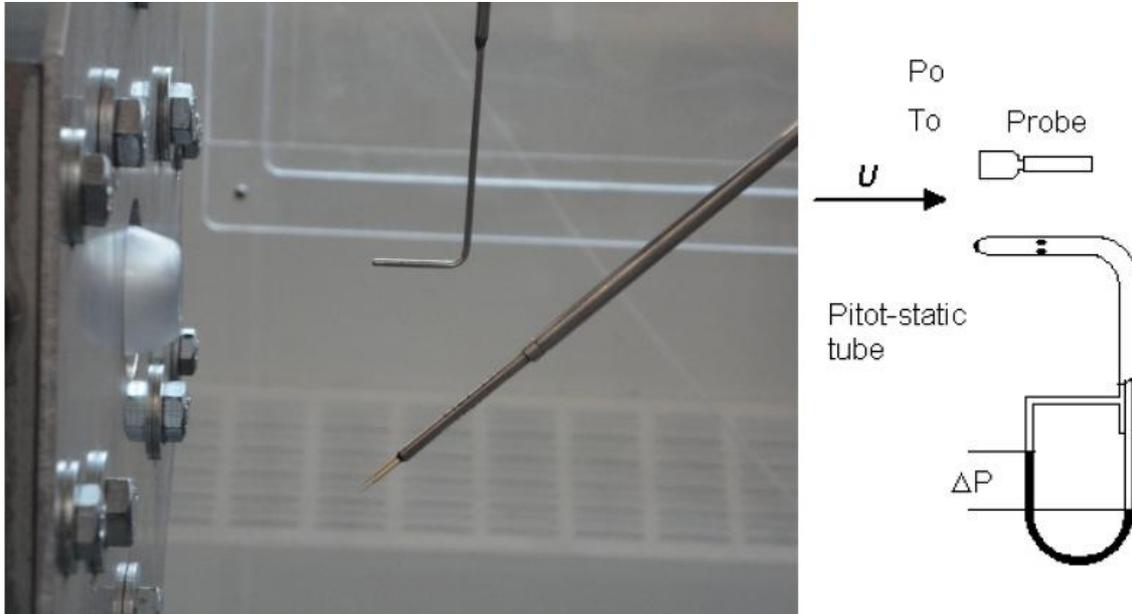


Figura 30: Calibración del hotwire con tubo de pitot en inyector *GE*

A partir de la ecuación de Bernoulli se puede despejar la velocidad (U) en función de la presión ΔP , proporcionada por el tubo de pitot, y la densidad del aire ($\rho_0=1,23\text{k/m}^3$):

$$U = \left(\frac{2\Delta P}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

Se recogen en una tabla un set de presiones (velocidades) a diferentes caudales del inyector y se miden los correspondientes voltajes con el hotwire, para después representarlos y hallar la función de transferencia.

Tandas de prueba de calibración

Se realizaron una serie de tandas de recogida de datos en las que se situó el tubo de pitot (y el hotwire, por consiguiente) a una distancia de 4cm de la boquilla del inyector.

Sin embargo, se encontraron una gran variedad de problemas e imprecisiones, entre los que destacan los siguientes: las presiones obtenidas eran demasiado bajas para

el transductor y los datos que proporcionaba no eran fiables. Además, había grandes fluctuaciones para caudales bajos de aire durante la medición lo que dificultaba la decisión de tomar un valor concreto con el tubo pitot debido a que éste variaba constantemente.

Por esto se tomó la medida de acercar estos elementos a una distancia más cercana a la boquilla del inyector ($\approx 0,5-1\text{cm}$) con lo que se obtuvieron datos válidos.

Tanda de calibración definitiva

Los resultados obtenidos para la calibración del hotwire son los siguientes:

				Final Calibration Results			
Try round				n 0,450			
Flow rate	ΔP [Torr]	v [m/s]	Voltage [V]	Rw 8,32	E^2		U^n
				T_0 25.0 C			
10	0,003	0,806	3,663		13,418	0,908	
15	0,007	1,232	3,908		15,272	1,098	
20	0,017	1,920	4,066		16,532	1,341	
25	0,026	2,374	4,195		17,598	1,476	
30	0,038	2,870	4,324		18,697	1,607	
35	0,055	3,453	4,419		19,528	1,747	
40	0,070	3,895	4,501		20,259	1,844	
45	0,088	4,368	4,571		20,894	1,941	
50	0,104	4,748	4,638		21,511	2,016	
55	0,111	4,905	4,659		21,706	2,046	
60	0,128	5,268	4,714		22,222	2,112	
65	0,165	5,981	4,804		23,078	2,236	
70	0,206	6,683	4,884		23,853	2,351	
75	0,257	7,464	4,972		24,721	2,471	
80	0,323	8,368	5,060		25,604	2,601	
85	0,400	9,312	5,149		26,512	2,729	
90	0,499	10,401	5,237		27,426	2,869	
95	0,620	11,593	5,331		28,420	3,012	
100	0,760	12,836	5,420		29,376	3,153	

Cuadro 2: Calibración del hotwire

El *Flow rate* es el marcador del caudalímetro y no tiene unidades. En el cuadro de la derecha el factor *n* de la ley de *King* se ha elegido iterativamente hasta encontrar la función de transferencia que más se ajusta a los datos, como se explica a continuación.

4.2.5 Ajuste de curvas

Una vez comprobado que los datos recogidos son válidos, (controlando también la temperatura y presión ambiental), se representan los datos recogidos en el Cuadro 2 gráficamente. A la hora de buscar una función de transferencia, existen dos opciones principalmente según recomienda la bibliografía [42].

Ajuste mediante un polinomio de cuarto orden.

$$U = C_0 + C_1E + C_2E^2 + C_3E^3 + C_4E^4 \quad (4.9)$$

Donde C_i son las constantes de calibración que hay que ajustar. Las curvas polinomiales se recomiendan normalmente ya que proveen buenos ajustes con errores menores al 1%. Sin embargo, en regiones en las que no existen datos de calibración, el ajuste de la curva no aporta resultados fidedignos. Puesto que en nuestro caso, debido a las limitaciones del tubo de pitot y, principalmente, del transductor de presiones (debido a su limitación para bajas presiones), no se han podido obtener valores de velocidades tan pequeños como se hubiera deseado, se tiene un vacío de datos en esta región. Ante la limitación que presenta este sistema a la hora de interpolar, esta opción de ajuste queda descartada.

Ajuste mediante ley de potencias. Ley de *King*.

$$E^2 = A + BU^n \quad (4.10)$$

En este caso, A y B son las constantes de calibración. Este tipo de ajuste es menos preciso que el ajuste mediante polinomios pero permite una mejor interpolación para regiones con ausencia de datos (especialmente si la región es cercana al origen, como es nuestro caso). Debido a que en los experimentos que se llevarán a cabo, el rango de velocidades es alrededor de $U=1,5m/s$ (rango con ausencia de datos en la calibración), se decide seleccionar este tipo de ajuste.

El exponente n se varía hasta que se obtenga un error de ajuste aceptable (representado por el coeficiente de correlación R^2). Por tanto, se representa E^2 como

función de U^2 en escala doble logarítmica y se escoge una línea de tendencia lineal. La bibliografía recomienda un valor inicial $n=0,45$ para comenzar a iterar.

Tras el proceso de iteración y con el objetivo de alcanzar el menor error de ajuste posible (R^2 lo más cercano a la unidad), se han obtenido los siguientes resultados.

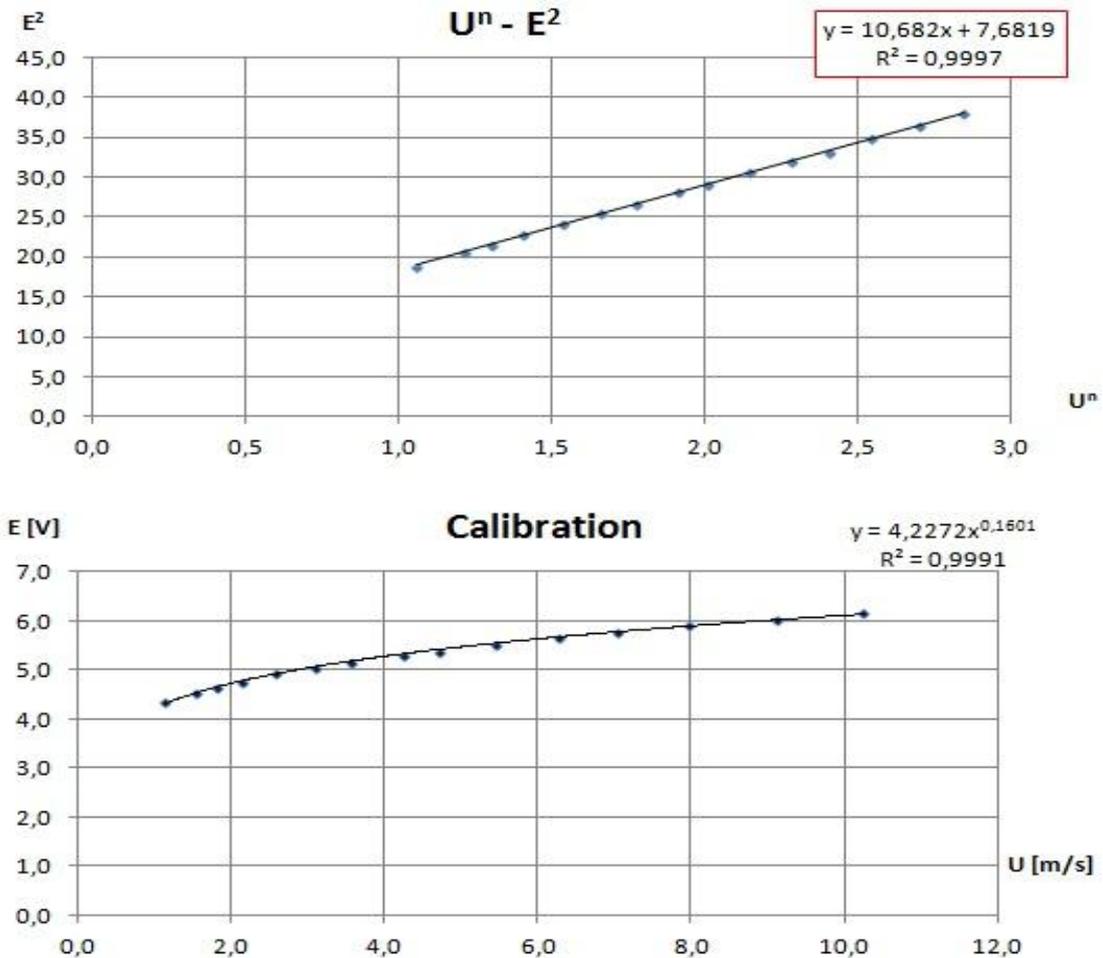


Gráfico 1: Curvas de calibración con la ley de King

Donde se observa que se consigue un R^2 muy cercano a uno, asegurando así la calidad del ajuste. Sustituyendo en la ley de King $A=7,6819$; $B=10,862$; $n=0,45$, se obtiene tras la linealización:

$$E^2 = 7,6819 + 10,682U^{0,45} \quad (4.11)$$

$$U = \left(\frac{E^2 - 7,6819}{10,682} \right)^{2,2} \quad (4.12)$$

En conclusión, (4.12) es la relación velocidad-voltaje para los experimentos.

4.2.6 Software de medidas

Para concluir con la preparación del experimento es necesario crear un software que registre los datos de voltaje medidos por el hotwire. La programación de este software se realizó mediante la herramienta *LabVIEW VI*. El interfaz, mostrado en la siguiente figura, se crea de tal manera que permite el control de tiempo de duración del experimento, la frecuencia de la recogida de datos, número de muestras y una representación gráfica de los datos recogidos.

Este software además se programa para obtener la media de los voltajes (velocidades) recogidos así como su desviación estándar para conocer la exactitud de los datos. Finalmente permite guardar con facilidad los datos procesados en una carpeta para su posterior transformación en velocidades (Ecuación (4.12)) y tratamiento mediante la herramienta MATLAB cuya programación se encuentra incluida en el Anexo IV (a) y (b).

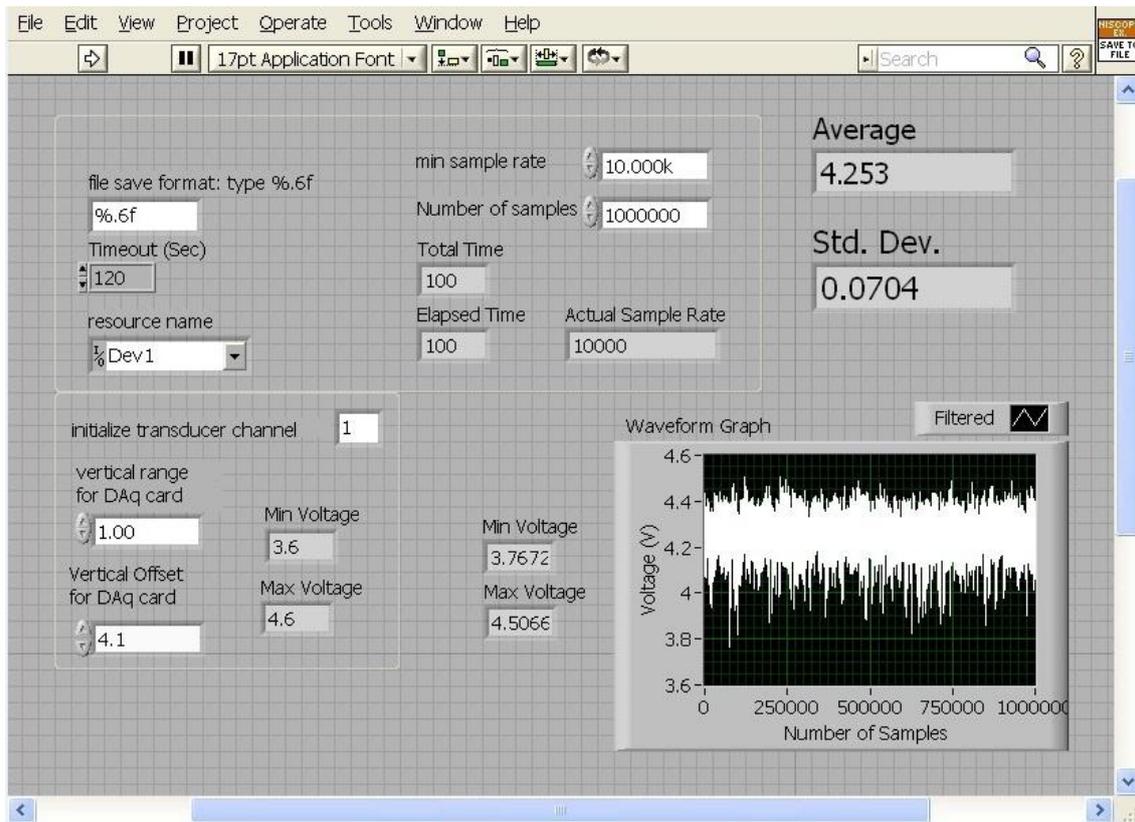


Figura 31: Interfaz programado en LabView VI

4.3 Preliminares de la experimentación

Una vez realizada la calibración, se procede a la realización de una experimentación de prueba en el túnel de viento. Para ello se pondrá en funcionamiento el túnel de viento y los inyectores pero sin caudal de agua, para no dañar el equipo de anemometría. El resto de parámetros también serán iguales a los que se utilizarán para la caracterización experimental, tratando de recrear de manera exacta las condiciones que se darán durante los experimentos.

Para la experimentación con hotwire, se han definido una serie de estaciones a lo largo del túnel donde se realizarán las medidas. Para la posición de las diferentes estaciones se han tenido en cuenta diferentes factores como las limitaciones de las ventanas de acceso del túnel de viento a su interior o las posiciones que se consideran representativas para definir el desarrollo del flujo turbulento. Las estaciones finalmente son las que se muestran en rojo en la siguiente figura. También se muestra su distancia desde el origen del túnel en función de su tamaño característico M a lo largo del *eje x*.

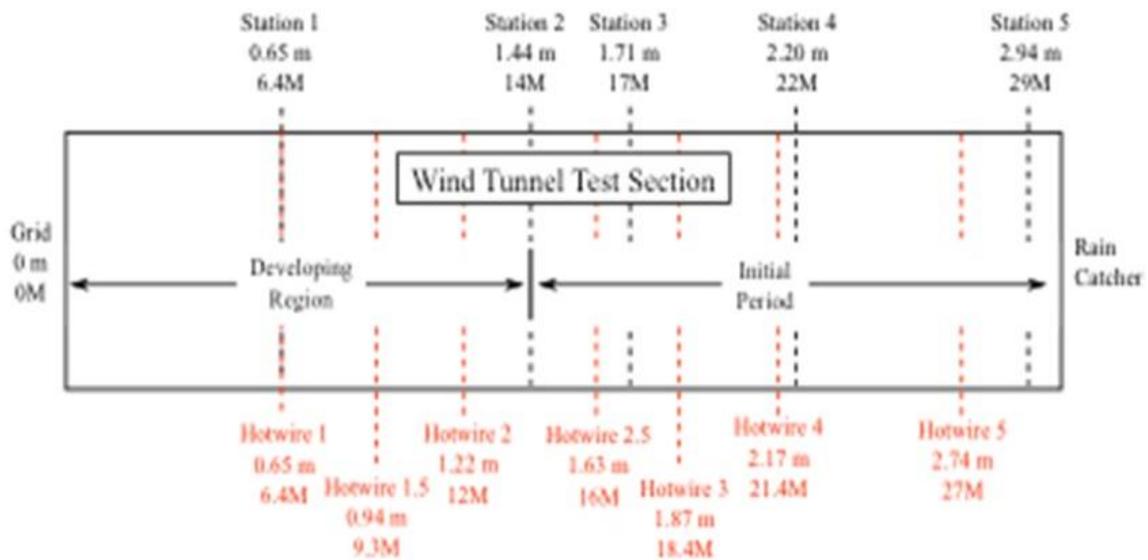


Figura 32: Estaciones de medida con hotwire

4.3.1 Caracterización inicial

En primer lugar, con el objetivo de comprobar el buen funcionamiento del hotwire tras la calibración y hacer una primera barrida de mediciones que defina a grandes rasgos el perfil de velocidades del túnel, se realiza una caracterización inicial. Esta caracterización se realiza en la Estación 3 ($x=1,87m=18,4M$) (Figura 32) en el punto medio de su sección según el eje y y a lo largo de todo el eje z , es decir, desde la parte superior a la inferior del túnel de viento. Se ha elegido la Estación 3 ($x=1,7M$) ya que según la literatura, es la primera estación donde se debería esperar un flujo turbulento homogéneo e isotrópico.

Esta caracterización inicial se realiza, al igual que todos los experimentos que se harán a partir de este momento, con una velocidad de $1,5m/s$ del flujo de aire del túnel de viento (1396rpm del compresor) y con la llave del aire de los inyectores completamente abierta.

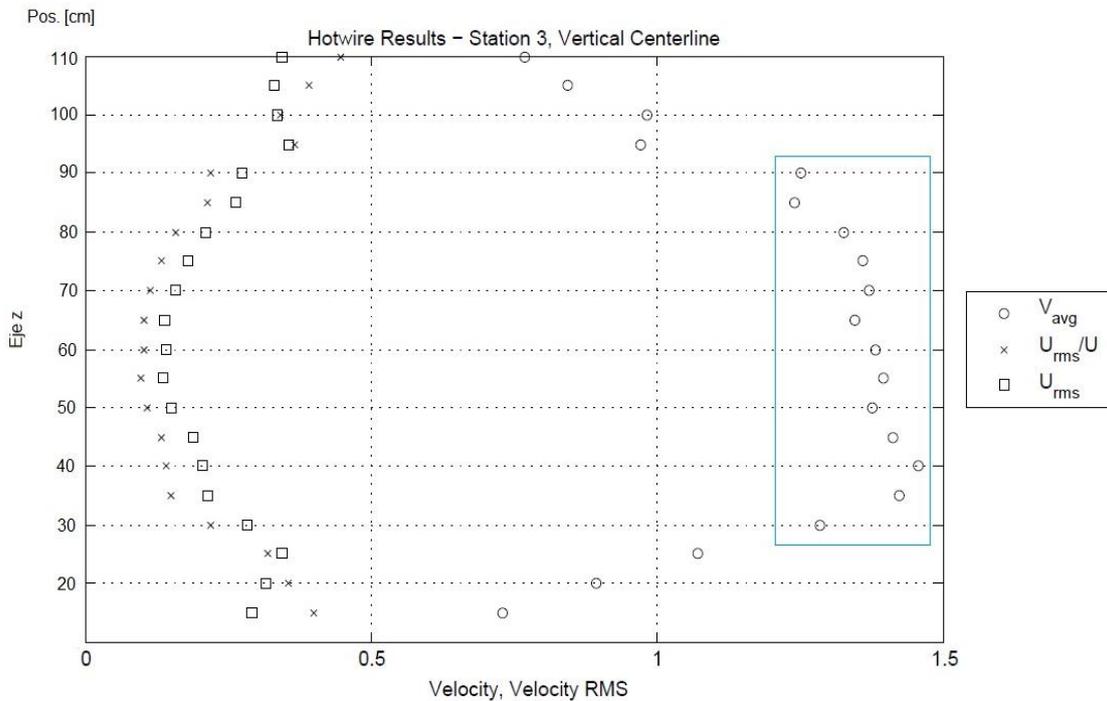


Gráfico 2: Caracterización inicial hotwire

En el Gráfico 2 se presentan los resultados obtenidos para la velocidad media y su RMS así como la relación entre ambas, durante la caracterización inicial. La duración de cada medición es de $t=100s$ y la frecuencia es $f=10kHz$. El espacio de medición va de $h=10cm$ hasta $h=110cm$ en el eje z , con un espaciado de $5cm$ entre puntos.

Tras recoger 10^6 datos por posición y hallar su media gracias al software diseñado, de la curva de velocidades medias, se observa que la región donde se obtienen las velocidades válidas para la experimentación se encuentran en la región central del túnel de viento que se sitúa entre $z=35cm$ hasta $z=80cm$. A partir de los extremos de esta región la velocidad del flujo decae drásticamente debido principalmente al efecto de la pared. A la luz de estos resultados y de cara a la realización de los experimentos, la zona de interés se enmarcará entre $z=30cm$ hasta $z=90cm$, zona delimitada por el cuadro azul en la figura anterior.

El motivo de abarcar unos cuantos centímetros más de la región propiamente de interés, es que en todo momento se quiere comprobar cuál es la posición en la que el efecto de las paredes concluye y donde comienza realmente el flujo turbulento homogéneo.

Se tiene, en definitiva, una sección de experimentación de $60 \times 60cm$ centrada en el túnel de viento. Esta sección que se utilizará en todas las estaciones a lo largo del túnel se representa esquemáticamente en la Figura 33.

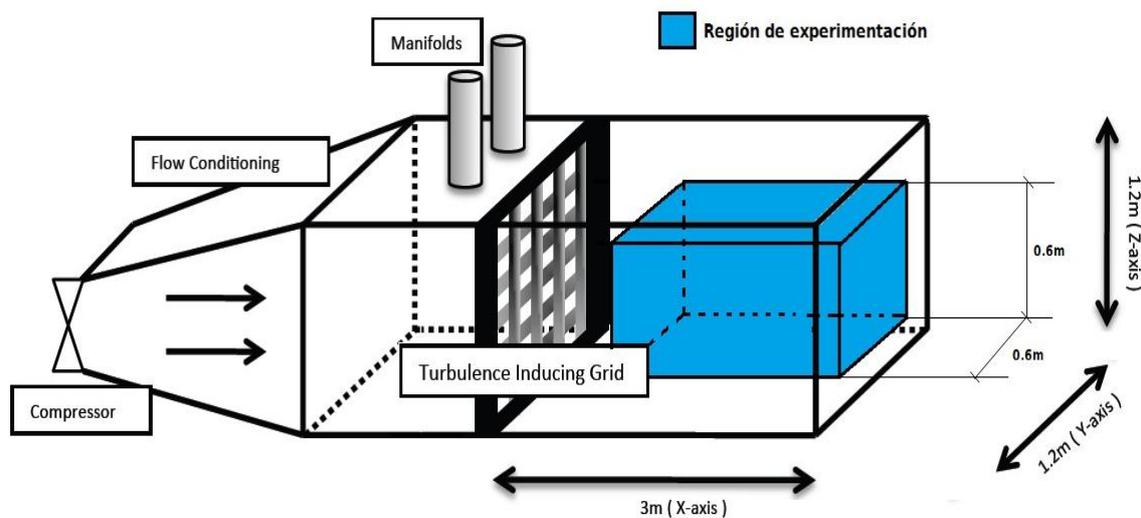


Figura 33: Esquema de región de experimentación

4.3.2 Nuevo soporte de aluminio

La caracterización inicial, además de para comprobar el funcionamiento de la calibración realizada, el software programado y para definir la región de interés en la que se realizarán los experimentos, ha servido para probar la eficacia del soporte del hotwire.

Durante su uso se han observado vibraciones del soporte de madera debido a la turbulencia creada por el túnel de viento y los inyectores, lo que ha requerido de una sujeción adicional para mantener el sensor fijo y asegurar la calidad de las mediciones. Sin embargo, en el futuro, las mediciones serán a lo largo y ancho de la sección previamente definida y no sólo en el eje vertical, por lo que el uso de este sistema de sujeción adicional no va a ser útil. Por ello, se ha tenido que diseñar un nuevo soporte más resistente y con una geometría diferente para mantener el sensor fijo durante las mediciones sin necesidad de dispositivos adicionales.

Para el nuevo soporte se ha manteniendo la geometría y forma del soporte anterior y se han cambiado las dimensiones y el material utilizado, que en este caso será el Aluminio. Su sección transversal es de 1,27x2,54cm (0,5x1”) y de interior hueco. Su longitud es de 146,05cm (57,5”).

Con estas nuevas dimensiones se consigue reducir la superficie enfrentada al flujo turbulento de aire reduciendo las vibraciones producidas por el mismo gracias a la mayor aerodinámica de la nueva pieza.

El montaje final del nuevo soporte se muestra en la Figura 34. También se dispone de una ilustración realizada a mano del nuevo soporte, así como de sus dimensiones básicas que sirvieron para la fabricación del mismo, en la sección *Anexo V*.

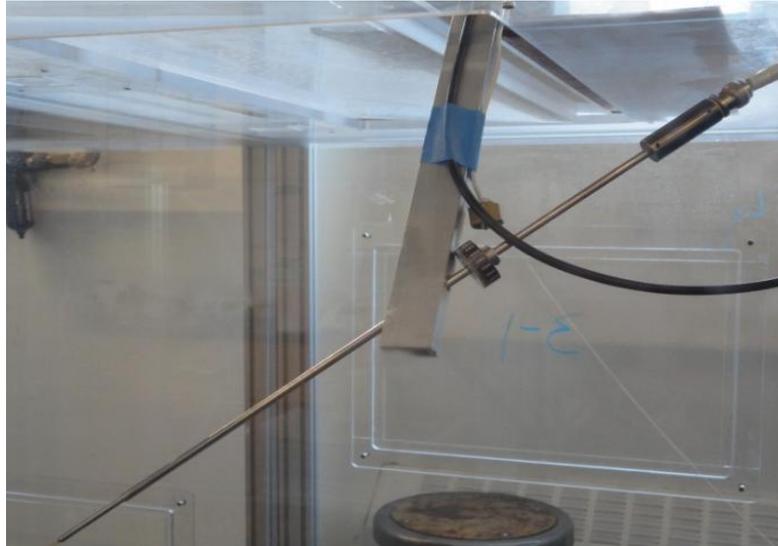


Figura 34: Nuevo soporte de Aluminio

4.3.3 Definición de las posiciones del brazo robótico

Finalmente, construido el nuevo soporte de aluminio y definidas las estaciones y el área de las mismas donde se van a tomar las medidas, queda abordar un gran problema desde el punto de vista práctico.

Como ya se ha mencionado, se tiene una gran limitación a la hora de acceder al interior del túnel de viento debido a las posiciones y tamaños fijos de las ventanas de acceso construidas en él. Hay que tener en cuenta además, que el brazo robótico, aunque es una herramienta de tremenda utilidad, tiene una capacidad de movimiento limitada y existen ciertas regiones del túnel de viento de muy difícil acceso.

Por eso, una de las tareas a la que más tiempo se dedicó durante la realización de este proyecto, fue la de programar las posiciones del brazo robótico, soporte y ángulo del soporte para alcanzar todos los puntos deseados.

La malla de medida es de 13x13 puntos, por tanto, 169 posiciones, separadas entre sí por 5cm, que han de ser definidas individualmente para cada una de las 5 estaciones en las que se experimentará.

Tras varias horas de trabajo, el resultado final de estas posiciones se muestra a continuación.

4. Caracterización del flujo con hotwire

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	4;100;0;450	4;100;50;450	4;100;100;450	4;100;150;450	4;100;200;450	3;90;20;310	3;90;70;310	3;90;120;310	3;90;170;310	3;90;220;310	3;90;270;310	3;90;320;310	3;90;370;310
2	4;100;0;400	4;100;50;400	4;100;100;400	4;100;150;400	4;100;200;400	3;90;20;260	3;90;70;260	3;90;120;260	3;90;170;260	3;90;220;260	3;90;270;260	3;90;320;260	3;90;370;260
3	4;100;0;350	4;100;50;350	4;100;100;350	4;100;150;350	4;100;200;350	3;90;20;210	3;90;70;210	3;90;120;210	3;90;170;210	3;90;220;210	3;90;270;210	3;90;320;210	3;90;370;210
4	4;100;0;300	4;100;50;300	4;100;100;300	4;100;150;300	4;100;200;300	3;90;20;160	3;90;70;160	3;90;120;160	3;90;170;160	3;90;220;160	3;90;270;160	3;90;320;160	3;90;370;160
5	4;100;0;250	4;100;50;250	4;100;100;250	4;100;150;250	4;100;200;250	3;90;20;110	3;90;70;110	3;90;120;110	3;90;170;110	3;90;220;110	3;90;270;110	3;90;320;110	3;90;370;110
6	4;100;0;200	4;100;50;200	4;100;100;200	4;100;150;200	4;100;200;200	3;90;20;60	3;90;70;60	3;90;120;60	3;90;170;60	3;90;220;60	3;90;270;60	3;90;320;60	3;90;370;60
7	4;100;0;150	4;100;50;150	4;100;100;150	4;100;150;150	4;100;200;150	3;90;20;10	3;90;70;10	3;90;120;10	3;90;170;10	3;90;220;10	3;90;270;10	3;90;320;10	3;90;370;10
8	4;100;0;100	4;100;50;100	4;100;100;100	4;100;150;100	4;100;200;100	2;120;50;570	2;120;100;570	2;120;150;570	2;100;30;225	2;100;80;225	2;100;130;225	2;100;180;225	2;100;230;225
9	1;135;200;550	1;135;250;550	1;135;300;550	1;135;350;550	1;135;400;550	2;120;50;520	2;120;100;520	2;120;150;520	2;100;30;175	2;100;80;175	2;100;130;175	2;100;180;175	2;100;230;175
10	1;135;200;500	1;135;250;500	1;135;300;500	1;135;350;500	1;135;400;500	2;120;50;470	2;120;100;470	2;120;150;470	2;120;200;470	2;120;250;470	2;120;300;470	2;120;350;470	2;120;400;470
11	1;135;200;450	1;135;250;450	1;135;300;450	1;135;350;450	1;135;400;450	2;120;50;420	2;120;100;420	2;120;150;420	2;120;200;420	2;120;250;420	2;120;300;420	2;120;350;420	2;120;400;420
12	1;135;200;400	1;135;250;400	1;135;300;400	1;135;350;400	1;135;400;400	2;120;50;370	2;120;100;370	2;120;150;370	2;120;200;370	2;120;250;370	2;120;300;370	2;120;350;370	2;120;400;370
13	1;135;200;350	1;135;250;350	1;135;300;350	1;135;350;350	1;135;400;350	2;120;50;320	2;120;100;320	2;120;150;320	2;120;200;320	2;120;250;320	2;120;300;320	2;120;350;320	2;120;400;320
	Position ; Angle ; X ; Y												

Cuadro 3: Posiciones para la Estación 1

Esta tabla además de describir la posición de cada punto, da una imagen visual de la situación de las mismas en la sección de medida vista aguas arriba del flujo.

La leyenda describe (Posición; ángulo; X; Y) donde:

- Posición: es la posición de la barra de soporte con respecto al brazo robótico. Ésta sólo permite un grado de libertad, que es su desplazamiento longitudinal sobre el brazo.
- Ángulo: se refiere a la posición de la rueda de soporte del brazo robótico medida en grados (Figura 35).
- X e Y: posiciones en ejes locales del brazo robótico, siendo $X=eje$ y $Y=eje$ z en ejes globales del túnel de viento.



Figura 35: Detalle de diferentes posiciones del soporte del hotwire

Las posiciones para el resto de estaciones se muestran en *Anexos III*.

4.4 Experimentación con hotwire

Después de una caracterización inicial y de haber corregido los problemas que han surgido durante la preparación del experimento, el equipo está listo para comenzar con la caracterización experimental del flujo turbulento.

Se recuerda que para la caracterización se tendrá un flujo compuesto únicamente por el aire del túnel de viento y el aire de los inyectores, sin la atomización de gotas de agua desde estos últimos que se considera despreciable a la hora de modificar el flujo turbulento. Como ya se explicó, el motivo de no atomizar el agua es para la conservación y buen uso de este tipo de hotwire.

Así mismo, en todos los experimentos se lleva un control constante de temperatura y presión para cumplir con las condiciones de set up antes mencionadas.

4.4.1 Parámetros a caracterizar

Para caracterizar correctamente el flujo turbulento del túnel de viento, se recogerá una colección de datos de la velocidad en múltiples puntos de la sección del túnel en 5 estaciones diferentes a lo largo de éste. Con el objetivo de corroborar que en el corazón del túnel se tiene un flujo turbulento que es homogéneo e isotrópico, se recogerán y analizarán los siguientes parámetros.

Velocidad media del flujo (U):

Se tomará la velocidad media con anemometría hotwire en 169 localizaciones diferentes (13x13) cubriendo la sección de experimentación, antes mencionada, del túnel de viento. Se espera que para el flujo completamente desarrollado, la velocidad media varíe menos del 11-13%.

Media cuadrática (u'):

La media cuadrática normalizada RMS (*Root Mean Square*) de las fluctuaciones de la velocidad se puede utilizar para caracterizar la intensidad de la turbulencia y cómo la intensidad de la misma decae a medida que el flujo se mueve alejándose de la malla inductora de turbulencia. Según la bibliografía [46], este decaimiento de la intensidad de la turbulencia se puede expresar:

$$\left(\frac{u'}{U}\right)^2 = a \left(\frac{x}{M} - \frac{x_0}{M}\right)^{-n} \quad (4.13)$$

Donde a es el coeficiente de decaimiento, x_0 el origen en el eje longitudinal y n el exponente de decaimiento. En base a estudios como [47] (entre otros), debido a las condiciones de experimentación y al pequeño tamaño característico de los experimentos ($x=14M - 29M$) de este proyecto, se define $n=1$. Por tanto, en los experimentos que se realicen se espera que el decaimiento de la turbulencia sea lineal.

Energía unidimensional (E_{11}):

La energía unidimensional longitudinal de la turbulencia [m^2/s] se calculará a través de la velocidad medida con el hotwire. Esta energía representada en función de la frecuencia (ω), según la teoría de Kolmogorov, debe presentar una pendiente de -5/3.

Disipación turbulenta (ε):

Asumiendo el flujo isotrópico y homogéneo, el índice de disipación turbulenta se define como:

$$\varepsilon = 15\nu \int_0^\infty k^2 E_{11}(k) dk \quad (4.14)$$

Como se expuso en la condiciones del flujo (2. *Estado del arte*), en nubes del tipo cumulus se tienen valores de $\varepsilon=10^{-4} - 10^{-2}$ aunque en los experimentos cabe esperar valores de hasta la unidad ($\varepsilon=10^{-4} - 1$).

Escalas Kolmogorov:

$$\text{Longitud:} \quad \eta = (v^3/\varepsilon)^{1/4} \quad (4.15)$$

$$\text{Tiempo:} \quad \tau = (v/\varepsilon)^{1/2} \quad (4.16)$$

$$\text{Velocidad:} \quad u_\eta = (v\varepsilon)^{1/4} \quad (4.17)$$

4.4.2 Caracterización de las estaciones

A continuación se presentan los experimentos realizados en cada una de las estaciones así como sus resultados.

Todos los experimentos se han realizado a una frecuencia de toma de datos $f=10kHz$ para un número de muestras por posición de $N=10^6$. Por tanto, en cada posición el tiempo de medida ha sido de 100 segundos. Los datos recogidos se han procesado mediante MATLAB (*Anexo IV*) para su posterior representación.

Los tiempos necesarios para realizar cada experimento constan de 45-60 minutos iniciales de puesta a punto y preparación de los equipos, 100 segundos para cada posición (para un total de 169 posiciones por estación), tiempos de maniobra del brazo robótico y cambios de la posición del soporte (variables en función de la dificultad de los mismos). Debido a la cantidad de tiempos ineludibles para la realización de cada una de las medidas, no ha sido posible llevar a cabo todos los experimentos correspondientes a una misma estación en un mismo día. Por ello, se presentan las condiciones particulares de cada uno de ellos, aunque finalmente se representen como un mismo conjunto de datos.

P es la presión del aire de los inyectores y FR (*Flow Rate*) su caudal (adimensional porque se toman los datos de un marcador en el panel de control). R_w es la resistencia de trabajo del CTA tras el *overheat adjustment* realizado a diario para las condiciones de temperatura de ese momento. Finalmente, T_{01} y T_{02} son las temperaturas iniciales y finales del túnel de viento en el experimento.

* En lugar de mostrar los experimentos cronológicamente, se muestran en orden ascendente de las estaciones para exponer de una manera más visual la evolución del flujo a lo largo del túnel.

Estación 1

Fecha: 11/03/2011

Fecha: 14/03/2011

P=580kPa $R_w= 8,32\Omega$

P=600kPa $R_w=8,32\Omega$

$T_{01}=27^\circ\text{C}$ $T_{02}=27,8^\circ\text{C}$

$T_{01}=26,6^\circ\text{C}$ $T_{02}=27,3^\circ\text{C}$

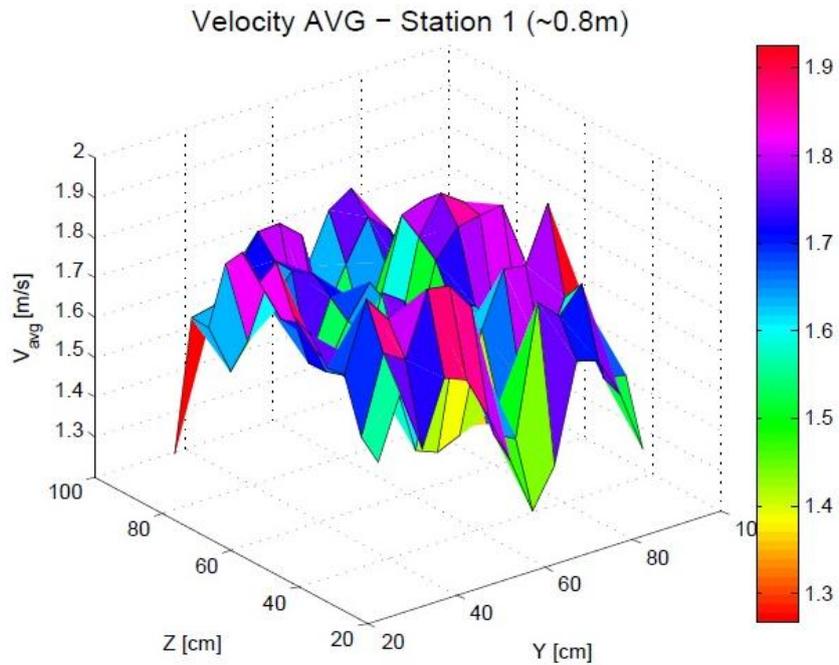


Gráfico 3: Estación 1. Velocidades

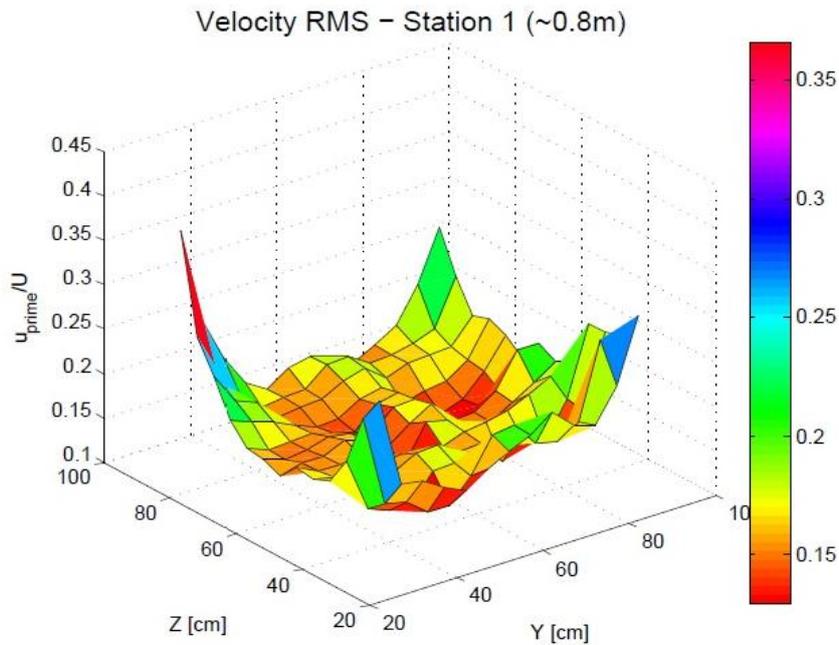


Gráfico 4: Estación 1. RMS

Estación 2

Fecha: 8/03/2011

Fecha: 9/03/2011

P=580kPa $R_w= 8,32\Omega$

P=580kPa $R_w=8,32\Omega$

$T_{01}=27,2^\circ\text{C}$ $T_{02}=27,1^\circ\text{C}$

$T_{01}=26,8^\circ\text{C}$ $T_{02}=27,4^\circ\text{C}$

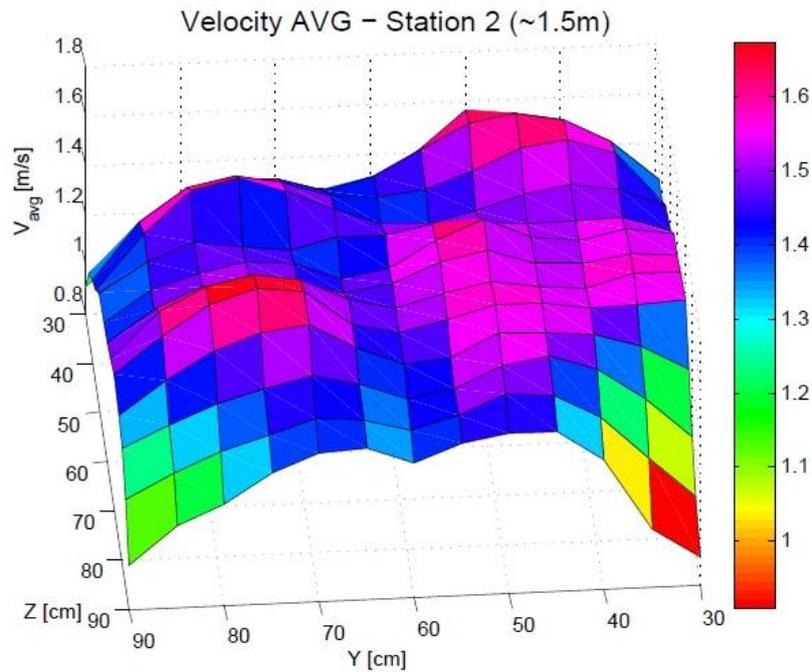


Gráfico 5: Estación 2. Velocidades

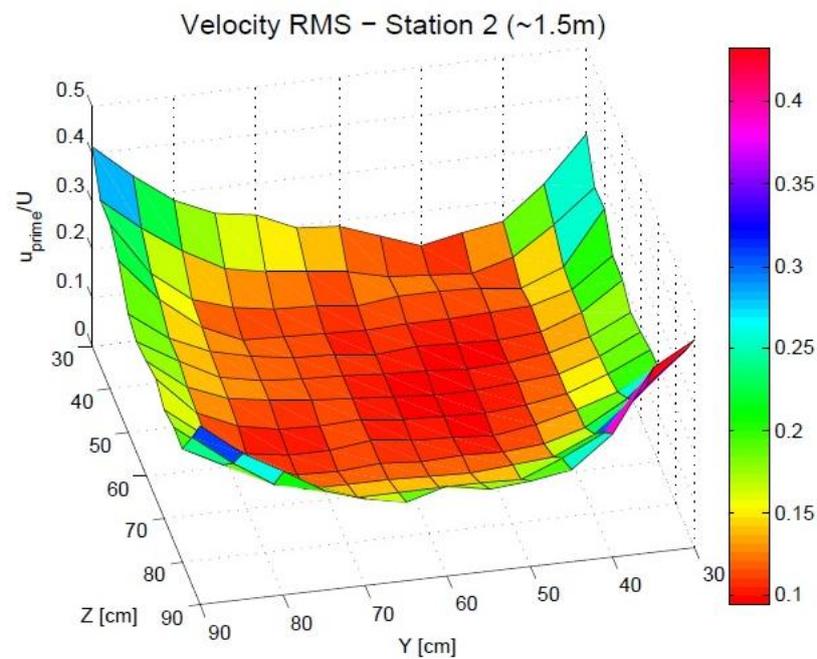


Gráfico 6: Estación 2. RMS

Estación 3

Fecha: 2/03/2011

P=610kPa $R_w=8,32\Omega$

$T_{01}=27,1^\circ\text{C}$ $T_{02}=27,6^\circ\text{C}$

Fecha: 3/03/2011

P=600kPa $R_w=8,32\Omega$

$T_{01}=26,8^\circ\text{C}$ $T_{02}=27,8^\circ\text{C}$

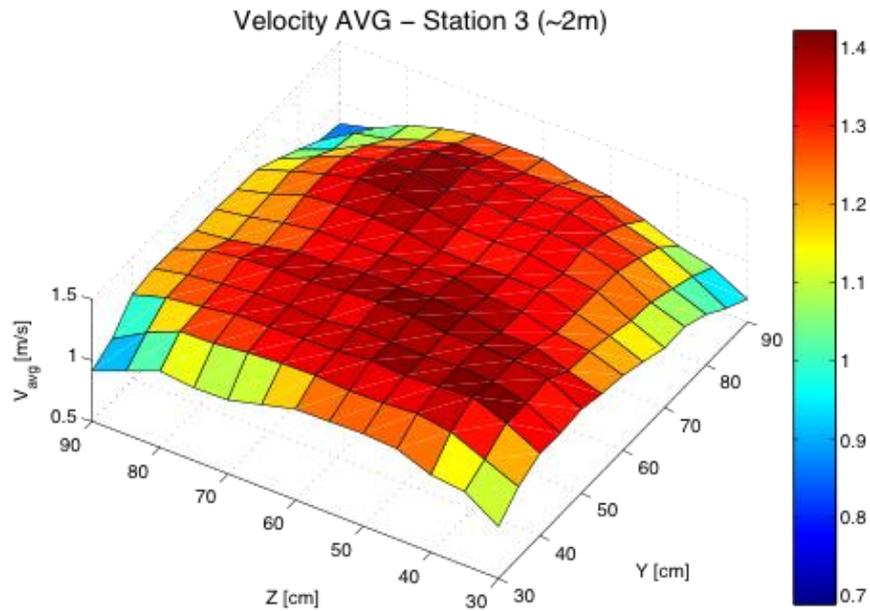


Gráfico 7: Estación 3. Velocidades

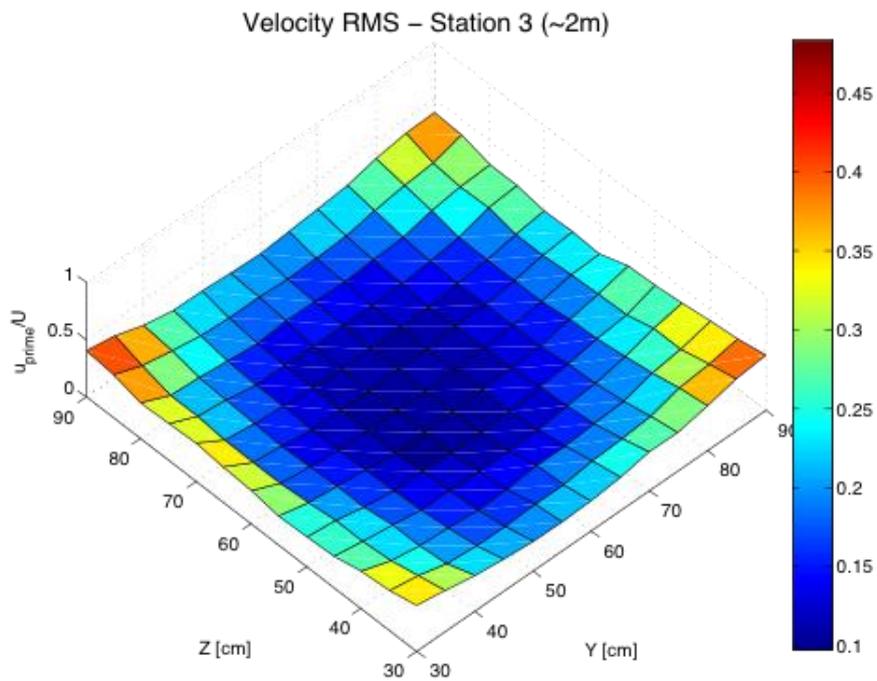


Gráfico 8: Estación 3. RMS

4.4.3 Análisis de los resultados

Las figuras anteriores representan visualmente la evolución del flujo turbulento a lo largo del túnel de viento. Se puede ver como a medida que se aleja de la malla inductora de turbulencia y de los inyectores, el flujo se va homogeneizando gradualmente hasta que, finalmente, en la Estación 3, a una distancia de aproximadamente 2 metros desde la malla, el flujo se estabiliza.

Por tanto, de cara a los resultados prácticos y que son útiles para este estudio, la Estación 3 es la primera en la que se puede asegurar que se obtiene un flujo desarrollado, como así predecía la literatura y se ponía como objetivo.

Analizando con mayor profundidad los gráficos de la Estación 3, se observan algunos picos en las velocidades. Estos se pueden deber que algunos inyectores pueden inyectar más aire que otros, pero se puede considerar despreciable. En las siguientes gráficas se representan los perfiles de velocidad y RMS en 2D de la Estación 3 para ayudar al análisis de las características del flujo.

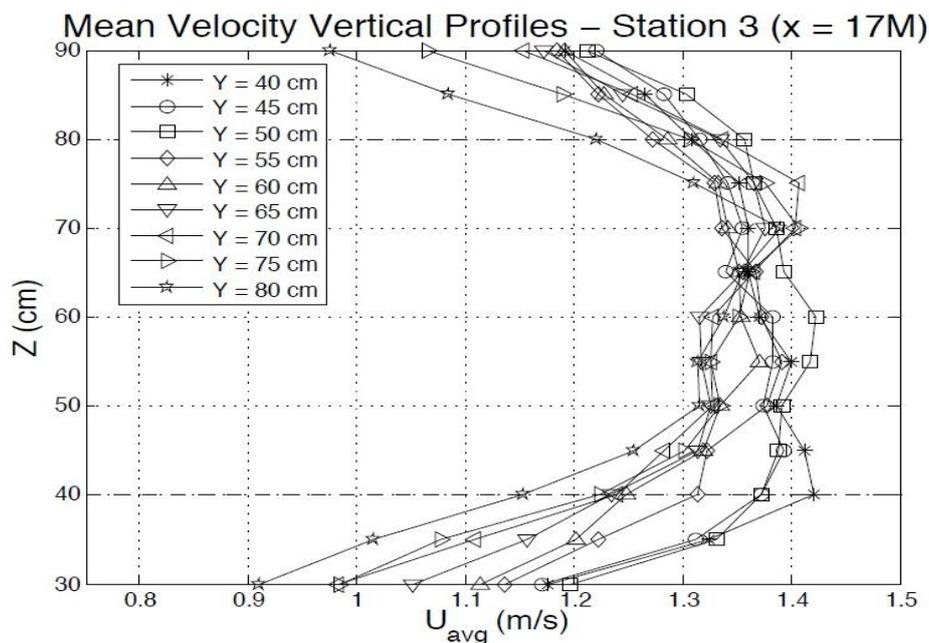


Gráfico 9: Estación 3. Perfil de velocidades.

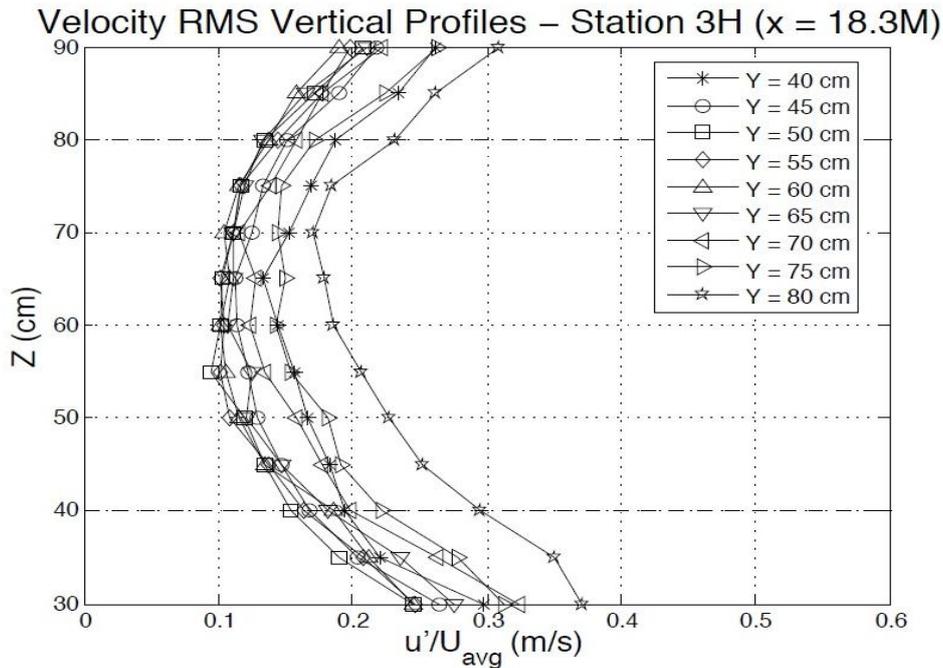


Gráfico 10: Estación 3. Perfil RMS de velocidades.

Se puede asegurar que el flujo está completamente desarrollado porque la homogeneidad en esta región es bastante buena. Se cumple uno de los objetivos iniciales que es que las velocidades medias se mantienen con una variación menor al 10%. Esta baja variación asegura la repetibilidad de los experimentos con la suficiente confianza de obtener resultados muy semejantes.

Destacar que estos fenómenos ocurren en toda la sección de la Estación 3 a excepción, evidentemente, de los bordes (línea discontinua en los Gráficos 9 y 10) de la misma que, como ya se comentó, se desprecian debido a que están influidos por el efecto pared. Sin embargo, se consigue con ello el resultado deseado, es decir, delimitar en qué región los datos son aceptables hasta que empieza a influir dicho efecto.

Aunque no se han representado en los gráficos anteriores, ya que con ellos se buscaba simplemente ver la evolución del flujo hasta que fuese homogéneo, también se han estudiado las Estaciones 4 y 5 que serán de gran utilidad para el próximo análisis.

A continuación se presentan los parámetros más relevantes de las condiciones obtenidas dentro del túnel de viento en las diferentes estaciones. En el cuadro se describen el RMS de las fluctuaciones de la velocidad (u'), el índice de disipación

turbulenta, la longitud (η_k), tiempo (τ_k) y velocidad (u_k) Kolmogorov, la microescala de Taylor (λ) y el número de Reynolds basado en esta escala (Re_λ).

Estación	x/M	x (m)	u' (m/s)	ε (m ² /s ³)	η_k (μ m)	τ_k (ms)	u_k (m/s)	λ (mm)	Re_λ
1	6.4	0.65	1.00	1.230	235	3.55	0.0661	-	-
2	14	1.44	0.59	0.169	385	9.58	0.0402	9.8	373
3	17	1.71	0.56	0.126	415	11.1	0.0374	8.8	318
4	22	2.19	0.46	0.095	445	12.8	0.0348	8.5	252
5	29	2.94	0.41	0.078	467	14.1	0.0332	8.7	230

Cuadro 4: Parámetros relevantes de las condiciones en las estaciones

A partir de los resultados presentados en el cuadro anterior, se puede representar el decaimiento de la turbulencia.

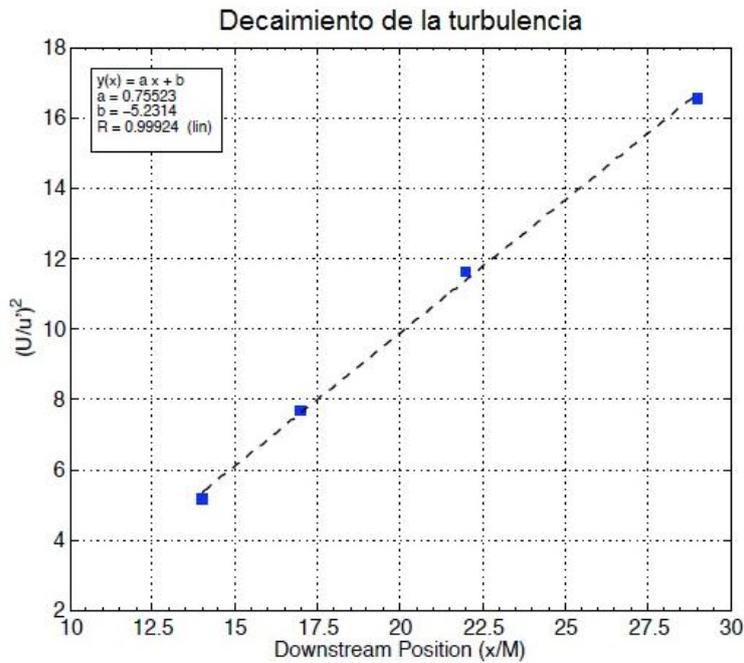


Gráfico 11: Decaimiento de la turbulencia

Se puede observar como el decaimiento cumple la condición esperada y es prácticamente lineal ($n=1$), lo que encaja perfectamente con una de las características distintivas del flujo turbulento homogéneo e isotrópico.

El índice de disipación turbulenta (ε) en el túnel de viento es mayor que el encontrado en nubes del tipo cumulus. Sin embargo, su orden de magnitud es suficientemente bueno para no influir en la física de las interacciones entre gotas de agua por turbulencia y colisiones.

En el siguiente gráfico se muestra la evolución de la energía turbulenta unidimensional, calculada a partir de las medidas de frecuencia en la Estación 3, en función de la frecuencia.

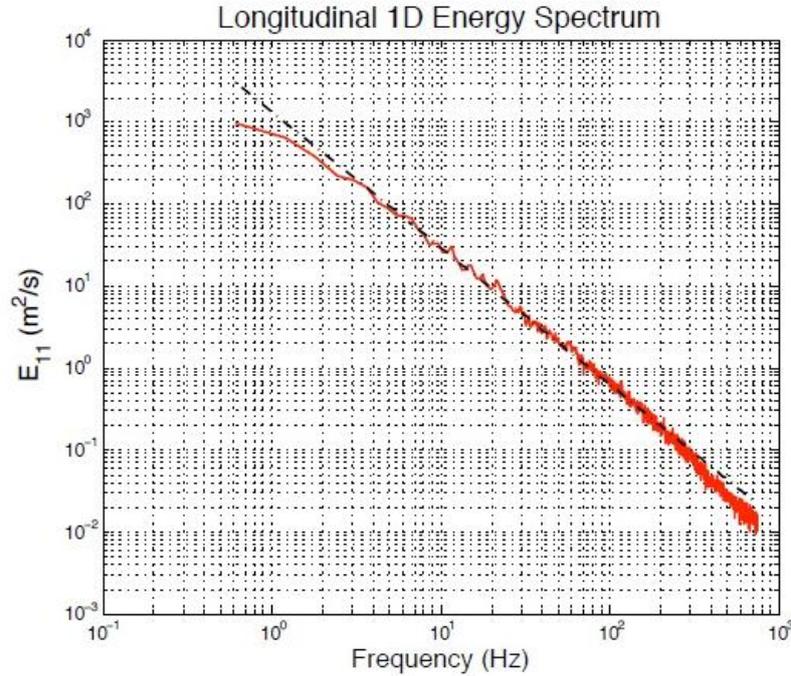


Gráfico 12: Energía turbulenta longitudinal 1D en la Estación 3 ($x/M=17$)

Se observa que su comportamiento sigue el predicho por la teoría de Kolmogorov para el rango inercial de la energía turbulenta. Esta teoría está representada con la línea discontinua del gráfico, que tiene pendiente $-5/3$.

Finalmente, como ya se comentó en 2.3 *Características del flujo*, el número de Reynolds presente en las nubes reales ($Re_\lambda=10^3-10^4$) no es posible reproducirlo en el laboratorio. Sin embargo, en los experimentos se han alcanzado valores suficientemente altos ($Re_\lambda \approx 400$) para considerar que los resultados son característicos y se pueden utilizar para la interpolación con reglas asintóticas mediante métodos computacionales para alcanzar las condiciones reales en nubes cálidas, es decir, flujos con números de Reynolds muy altos.

Capítulo 5

Conclusiones

En este Proyecto Fin de Carrea se ha descrito la caracterización del flujo turbulento en un túnel de viento mediante tecnología anemométrica hotwire. Para ello ha sido necesario llevar a cabo un largo proceso de investigación y experimentación.

Se han establecido una serie parámetros para recrear de manera fidedigna las condiciones reales en nubes cálidas y así, a través de técnicas experimentales y computacionales, alcanzar un mayor entendimiento sobre los procesos que intervienen en el rápido crecimiento de las gotas presentes en ellas y su posterior precipitación. De éste modo, se intenta demostrar la hipótesis de que la turbulencia juega un papel fundamental en estos fenómenos.

Para la caracterización experimental del flujo turbulento, se han tenido que diseñar y fabricar diferentes elementos para la realización de las medidas. Así mismo, se han seleccionado y calibrado los dispositivos anemométricos (hotwire) para obtener unos resultados que describan correctamente las condiciones de contorno referentes a la turbulencia en el túnel de viento.

Para ello, se han realizado una colección de medidas, a lo largo del eje longitudinal del túnel de viento, de la velocidad que han permitido desarrollar una serie de parámetros con los que se pretende asegurar la reproducción de las condiciones de turbulencia reales.

5.1 Conclusiones

A la luz de los resultados, se comprueba que a partir de la Estación 3 se tiene un flujo turbulento completamente desarrollado y con una homogeneidad bastante buena ya que se obtienen variaciones en las velocidades menores al 10%. También se han demostrado los límites de la región de estudio a partir de los cuales el efecto pared se hace patente (Gráficos 7 y 9).

A través de las velocidades medias y de su media cuadrática (U/u'), se ha justificado que el decaimiento de la turbulencia en el túnel de viento es prácticamente lineal, debido a la corta longitud de la zona de flujo desarrollado de nuestro

experimento, lo que encaja con las características de isotrópicas y homogéneas encontradas en la literatura (Gráfico 11).

Se ha conseguido un índice de disipación turbulenta (ε) lo suficientemente bueno para la recreación del flujo turbulento.

La representación de la energía turbulenta unidimensional (E_{11}) ha mostrado como sigue la pendiente ($-5/3$) predicha por la teoría Kolmogorov (Gráfico 12).

Por último, el número de Reynolds, como ya se pronosticó, no se ha podido alcanzar para los niveles presentes en nubes reales. Sin embargo, su valor es suficiente para poder asegurar que los datos son representativos y para permitir su interpolación mediante reglas asintóticas por medios computacionales.

Con todo esto, se han alcanzado los subobjetivos iniciales, ya que se han diseñado y fabricado los elementos necesarios para la toma de medidas con hotwire. También se ha hecho una correcta y justificada selección del tipo de anemómetro utilizado y se ha llevado a cabo una batería de experimentos que han conseguido describir el flujo turbulento y su evolución en el túnel de viento.

En conclusión, a través de los parámetros que se han mencionado, se ha conseguido el objetivo principal del este estudio, llevándose a cabo la caracterización del flujo turbulento y comprobándose que recrea las características fijadas con anterioridad para la recreación de las condiciones de turbulencia en nubes cálidas reales.

Sin embargo, aquí no termina el camino hacia el entendimiento de los mecanismos implicados en la rápida formación de precipitaciones en las nubes cálidas. Por tanto, es necesario seguir avanzando y trabajando con nuevas técnicas y tecnologías. En el siguiente capítulo se proponen algunas vías de trabajo con las que se puede continuar esta investigación.

5.2 Lecciones aprendidas

A parte del análisis de los resultados y las conclusiones que se han reflexionado en el apartado anterior, la realización de este proyecto ha conllevado una serie de lecciones aprendidas.

En primer lugar, la dificultad de cualquier proceso experimental ante el reto de solucionar los problemas que surgen constantemente con el objetivo de tener la rigurosidad suficiente a la hora de la realización de los experimentos.

La importancia de la investigación previa antes de acometer un proyecto con el fin de tener toda la información posible y poder basar los siguientes pasos y decisiones que se tomen en bases sólidas implantadas con anterioridad.

En tercer lugar, y no por ello menos importante, la enseñanza de que, a pesar de todos los esfuerzos que se pongan, cometer errores es inevitable y que lejos de que estos sirvan para desanimar o frustrar han de servir de lección para no volver a repetirlos y como motivación para aprender de ellos e intentar superarse continuamente.

Finalmente, es preciso destacar que una gran parte del esfuerzo invertido en la realización de este Proyecto Fin de Carrera ha sido en la preparación, montaje y puesta a punto de los equipos y procesos experimentales, así como la solución de los problemas que han ido surgiendo durante el transcurso de estos procesos y que son inherentes a cualquier actividad de experimentación.

Capítulo 6

Trabajos futuros

A continuación se proponen posibles vías por las que continuar la investigación. Evidentemente, se recomienda seguir la planificación del proyecto global de investigación (*Anexo II*) con la siguiente etapa del mismo que sería la utilización de técnicas PDPA y PIV que se van a exponer brevemente en este capítulo.

Alguna de ellas ya se ha comenzado durante la realización de este proyecto, aunque no se hayan reflejado en la memoria, como es el ejemplo del montaje y la calibración del sistema PDPA.

6.1 Rediseño del túnel de viento

A pesar de que se ha logrado un gran éxito caracterizando el flujo turbulento en el túnel de viento, el diseño actual del mismo presenta una serie de problemas.

En primer lugar, entre la malla inductora de turbulencia y el comienzo de la pared de Plexiglás hay una distancia de unos 7,5cm por lo que, esa región no es posible estudiarla. Además, la propia malla inductora está acoplada al interior del túnel por un marco de aluminio de 7cm de ancho, haciendo que este marco crea una obstrucción significativa del flujo que corre a lo largo del túnel, creando corrientes de recirculación que dificultan el desarrollo de la homogeneidad de la turbulencia en las primeras estaciones del túnel.

Para resolver este problema, se recomienda retirar el marco del interior del túnel de viento reduciendo la sección transversal del mismo de manera que se ajuste a las dimensiones de la malla tan solamente, alineando las paredes del túnel a los bordes de la misma.

Otros problemas de menor envergadura deben de ser tenidos en cuenta a la hora de rediseñar el túnel. Entre ellos destacan el pequeño tamaño de la ventana de acceso para las personas al interior del túnel, la estructura de soporte de las paredes no aguanta el peso suficiente, las paredes acrílicas deben de asegurar con mayor confianza su estanqueidad para evitar pérdidas de agua y, por último, la corta longitud del túnel.

6.2 Experimentación con PDPA

Con el objetivo de calcular la distribución del tamaño de gotas y calcular dos componentes de su velocidad, se podría utilizar un sistema PDPA (*Phase Doppler Particle Analysis*).

Éste es un sistema no intrusivo para medir el movimiento de partículas inmersas en un flujo a través de un par de haces de laser. Para los detalles de su funcionamiento y operación se pueden consultar la literatura [48; 49]. Básicamente, las medidas tomadas en diferentes localizaciones a lo largo del túnel, se podrían convertir en la evolución temporal de la colisión coalescencia a través de estimaciones estadísticas como RDF explicada en el apartado 2.2.3 *La turbulencia en partículas*.

Concretamente, la instalación de este dispositivo y su calibración, se llevaron a cabo durante la realización de este Proyecto Fin de Carrera aunque no se haya explicado en profundidad en esta memoria.

Se realizó la instalación sobre el brazo robótico del sistema PDPA así como un sistema auxiliar que crea una cortina de aire en la pared, que evita la condensación de las gotas inyectadas sobre la misma, permitiendo el correcto funcionamiento del laser. También se instalaron una serie de prismas para reorientar el ángulo del *Receiver* (70°) y así evitar la refracción de los haces (Figura 36).

Por último se realizó una calibración de la potencia y enfoque de los haces de luz aunque desgraciadamente, debido a problemas de tiempo, no se pudo continuar con la investigación en este sentido. Por tanto, se anima a continuar con esta vía de investigación.

En la figura de la siguiente página se muestra en (a) detalle del prisma para la reorientación de los haces, en (b) la cortina de aire en funcionamiento para eliminar las gotas que se depositan en la pared de Plexiglás, en (c) una imagen del montaje final del sistema PDPA sobre el brazo robótico mientras el túnel de viento y los inyectores están en funcionamiento y, finalmente, en (d) un esquema del funcionamiento del PDPA.



Figura 36: Montaje del PDPA. (a) prisma; (b) cortina de aire; (c) sistema PDPA; (d) esquema de funcionamiento

Este sistema se puede utilizar conjuntamente con una cámara de alta velocidad equipada con un microscopio de larga distancia que permite observar las gotas y sus interacciones con la turbulencia y con otras gotas vecinas.

Capítulo 7

Fases y Presupuesto

Para la realización de este Proyecto Fin de Carrera se ha seguido un proceso cronológico y lineal que se expone a continuación. En él se detalla el tiempo invertido en cada una de las fases de realización del proyecto, así como una breve descripción de las tareas de las mismas.

A continuación se abordarán los costes y el presupuesto para la realización de las mencionadas fases.

7.1 Fases del Proyecto Fin de Carrera

Las fases y subfases que envuelven este Proyecto Fin de Carrera se pueden dividir en dos grandes grupos: aquellas que conciernen al trabajo en el laboratorio y aquellas que se refieren a la investigación y redacción de la presente memoria.

7.1.1 Fase de trabajo en laboratorio

Esta fase se realizó en la *University of Washington*, Seattle (Estados Unidos), en el laboratorio del departamento de ingeniería mecánica supervisado por el Dr. Alberto Aliseda. El periodo de trabajo comprende desde el mes de Octubre de 2010 hasta el mes de Mayo de 2011 haciendo un total de 7 meses. Las fases (tareas) son:

1. Planteamiento de los objetivos del Proyecto Fin de Carrera (1 semana)

Reuniones con el tutor y compañeros de trabajo para organizar los próximos meses de trabajo y establecer los objetivos.

2. Documentación general (1 semana)

Lectura y documentación sobre los progresos ya hechos en el laboratorio así de los experimentos ya desarrollados acerca del tema.

3. Toma de contacto con los equipos del laboratorio (1 semana)

Familiarización y acondicionamiento de los diversos equipos y adecuación de las normas de seguridad para su futuro manejo.

4. Preparación del experimento (6 semanas)

Puesta a punto de los equipos necesarios para el experimento y fabricación de nuevos dispositivos.

4.1. Selección de hotwire (1 semana)

Investigación sobre las diferentes opciones de hotwire y demostración de la validez del tipo seleccionado mediante la consulta en bibliografías y demostraciones físicas-matemáticas.

4.2. Fabricación del soporte del hotwire (2 semanas)

Diseño y fabricación en madera del soporte del hotwire. Estudio de las diferentes posibilidades de diseño y fabricación en el taller de la opción elegida. Comprobación de su utilidad. Fabricación del anexo para soportar el tubo de pitot.

4.3. Puesta a punto de CTA (3 semanas)

4.3.1. Investigación en el manual sobre su puesta a punto y reparación previa del equipo CTA (1 semana)

4.3.2. Puesta a punto final. Realización de *overheat adjustment* (1 semana)

4.3.3. Pruebas de control y comprobación (1 semana)

5. Calibración del hotwire (3 semanas)

Calibración y preparación del hotwire para la realización de experimentos

5.1. Instalación del tubo de pitot (0,5 semanas)

Ajuste del soporte anexo (ya fabricado) en el soporte principal e instalación del tubo de pitot en él.

5.2. Tanda de prueba de calibración (1,5 semanas)

Pruebas sobre el funcionamiento de los soportes fabricados y sobre la calibración. Solución de diversos problemas (imprecisiones, fluctuaciones de la presión, etc.).

5.3. Tanda de calibración definitiva (0,5 semanas)

Calibración definitiva obteniendo los resultados válidos.

5.4. Ajuste de curvas (0,5 semanas)

Ajuste de las curvas realizando pruebas con los diversos modelos matemáticos para comprobar cuál es el que mejor se ajusta a los datos obtenidos.

6. Programación del software (1 semana)

Diseño y posterior programación del software para la toma de medidas mediante LabView y test de pruebas. Solución de problemas (almacenamiento de datos, tarjeta de memoria, display, etc.)

7. Caracterización inicial (1 semana)

Caracterización inicial del túnel en la Estación 3 en su sección media. Toma de medidas y procesamiento de las mismas.

8. Construcción del soporte de aluminio (1 semana)

Solución de problemas encontrados en la Fase 7. Diseño y fabricación del nuevo soporte que satisfaga las condiciones requeridas.

9. Definición de posiciones del brazo robótico (2,5 semanas)

Estudio de las posiciones que ha de adoptar el brazo robótico así como los diferentes elementos para alcanzar todos los puntos de medida a lo largo del túnel de viento a través de las ventanas de acceso.

10. Experimentación en las estaciones (3 semanas)

Toma de medidas experimentales a lo largo de las 5 estaciones en el túnel de viento, solucionando los numerosos problemas inherentes a la experimentación que han surgido.

10.1. Estación 3 (3 días)

Preparación del experimento y experimentación. Solución de problemas.

10.2. Estación 2 (3 días)

Preparación del experimento y experimentación. Solución de problemas.

10.3. Estación 1 (3 días)

Preparación del experimento y experimentación. Solución de problemas.

10.4. Estación 4 (3 días)

Preparación del experimento y experimentación. Solución de problemas.

10.5. Estación 5 (3 días)

Preparación del experimento y experimentación. Solución de problemas.

7.1.2 Fase de investigación y redacción de la memoria

En esta sección se comenta las investigaciones realizadas así como las etapas de redacción. Aunque esta fase se enmarca principalmente después de la realización de la experimentación, una parte de ella se realizó con anterioridad. Exceptuando las 2 primeras semanas de investigación que se realizaron en Septiembre 2010, el resto han transcurrido desde Octubre 2011 hasta Diciembre 2011.

Debido a la sencillez de estas fases, se expondrán con menor nivel de detalles que las pertenecientes a los trabajos realizados en el laboratorio.

1. Investigación previa (2 semanas)

Puesta en antecedentes de los fenómenos físicos que involucran la creación de lluvia así como los efectos de la turbulencia.

2. Estado del arte (3 semanas)

Investigación sobre los antecedentes, recopilación de información en las diferentes bibliografías y literatura existente acerca de los conceptos teóricos como la física de las nubes, conceptos de turbulencia, etc.

Redacción de todos estos elementos.

3. Descripción de los experimentos y sus componentes (4 semanas)

Repaso de notas y estructuración de las mismas. Realización de las diferentes gráficas y esquemas así como ampliación de los conceptos teóricos para la correcta descripción de los experimentos y sus componentes. Redacción.

*Baja por enfermedad

4. Conclusiones y trabajos futuros (1 semana)

Reflexión sobre los trabajos realizados y lecciones aprendidas. Sugerencia de trabajos futuros. Redacción.

5. Revisiones y correcciones de la memoria (2 semanas)

Modificación y revisión del conjunto de la memoria.

6. Preparación de la defensa del Proyecto Fin de Carrera (2 semanas)

Realización de las diapositivas de la presentación así como el ensayo de la misma.



Figura 38: Calendario fases de redacción

7.2 Presupuesto

A continuación se presentan los costes económicos asociados al proyecto

7.2.1 Desglose presupuestario

PERSONAL			
DESCRIPCIÓN	HORAS (h)	COSTE HORA (€/h)	COSTE IMPUTABLE (€)
Diseño / fabricación de equipos	80	40	3200
Calibración y puesta a punto	250	30	7500
Experimentación	160	25	4000
Programación (MATLAB/LabView)	40	40	1600
Montaje / Desmontaje de equipos	100	20	2000
Investigación y redacción	150	25	3750
TOTAL			22050
EQUIPO⁽¹⁾			
DESCRIPCIÓN	COSTE (€)		COSTE IMPUTABLE⁽²⁾ (€)
Túnel de viento	30000		2500
hotwire / CTA	5000		416
Taller	30000		500
Brazo robótico	50000		833
Ordenador	2000		166
TOTAL			4415
SOFTWARE⁽³⁾			
PROGRAMA	COSTE ANUAL LICENCIA (€/año)		COSTE IMPUTABLE (€)
Licencia LabView	6000		1000
Licencia Matlab	12000		2000
TOTAL			3000
SUBCONTRATA DE TAREAS			
DESCRIPCIÓN			COSTE COMPUTABLE (€)
Material de oficina e impresión			280
TOTAL			280
COSTES INDIRECTOS (12%)			3930
TOTAL PROYECTO			36675

(1) Depreciación del equipo en 24 meses, dedicándole un uso máximo de 6 meses.

(2) Precio del equipo según el uso en función de la depreciación

(3) Amortización para software: 1/6

Puesto que la gran mayoría del proyecto se ha realizado en Estados Unidos, el precio de algunos elementos, por ejemplo los equipos o las licencias de software, se han convertido de dólares (\$) a euros (€) para la presentación de este proyecto.

Alguno equipos son de cierta antigüedad (túnel de viento, CTA...), por lo que sus precios pueden no corresponder con artículos semejantes en la actualidad.

Se ha considerado un valor de costes indirectos del 12%.

7.2.2 Resumen de costes

Por tanto, los costes para realizar la “*Caracterización experimental del un flujo turbulento en túnel de viento para la recreación de las condiciones en nubes cálidas*” se resumen en la siguiente tabla.

Descripción	Presupuesto Costes Totales (€)
Personal	22.050
Equipo	4.415
Software	3.000
Subcontrata de tareas	280
Costes indirectos	3.930
TOTAL	36.675

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 36.675€.

Leganés, a 22 de Diciembre de 2011.

El ingeniero proyectista.

Fdo. Ricardo Jordán de Urries Fontanellas

Capítulo 8

Bibliografía

- [1] ALISEDA, Alberto, WANG, L.P. y GRABOWSKI, W.W. *Turbulence enhanced droplet growth by collision-coalescence*. Collaborative research. U. of Washington, U. of Delaware, NCAR: 2007. 15p.
- [2] LAU, K.M. y WU, H.T. *Warm rain processes over tropical oceans and climate implications*. Geophys. Res. Lett., 2003, p. 2290-2294.
- [3] BEARD, K.V. y OCHS, H.T. III. *Warm-rain initiation: An overview of microphysical mechanisms*. J. Appl. Meteor., 1993. p. 608-625.
- [4] SHAW, R.A. *Particle-turbulence interactions in atmospheric clouds*. Annu. Rev. Fluid. Mech., 2003. p. 183-227.
- [5] SUNDARAM, S. y COLLINS, L.R. *Collision Statistics in an Isotropic, Particle-Laden Turbulence Suspension*. J. Fluid Mech., 1997. 335p.
- [6] WANG, L.P. y MAXEY M.R. *Settling velocity and concentration distribution of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence*. J. Fluid Mech. 1993. 256p.
- [7] PINSKY, M.B., KHAIN, A.P. y SHAPIRO, M. *Collision of small drops in a turbulent flow. Part I: Collision efficiency. Problem formulation and preliminary results*. J. Atmos. Sci., 1999. p. 2585-2600.
- [8] GRABOWSKI, W.W. y VAILLANCOURT, P. *Preferential concentration of clouds droplets in turbulence: effects on early evolution of cumulus cloud droplet spectra*. J. Atmos. Sci., 1999. p. 1433-1436.
- [9] KLETT, J.D. y DAVIS, M.H. *Theoretical collision efficiencies of cloud droplets at small Reynolds numbers*. J. Atmos. Sci., 1973. p. 107-177.
- [10] PINSKY, M.B. y KHAIN, A.P. *Collisions of small drops in a turbulent flow. Part II: Effects of flow accelerations*. J. Atmos. Sci., 2004. p. 1926 – 1939.
- [11] PINSKY, M.B., KHAIN, A.P., GRITS, B. y SHAPIRO, M. *Collisions of small drops in a turbulent flow. Part III: Relative Droplet fluxes and swept volumes*. J. Atmos. Sci., 2006. p. 2123 – 2139.

- [12] ARENBERG, D. *Turbulence as the major factor in the growth of cloud drops*. Bull Am. Meteorol. Soc. 20, 1939. p. 444 – 448.
- [13] EAST, T., MARSHALL, J. *Turbulence in clouds as a factor in precipitation*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 80, 1954. p. 26 – 47.
- [14] LANGMUIR I. *The production of rain by a chain reaction in cumulus clouds at temperatures above freezing*. J. Atmospher. Sci. 5, 1948. p. 175 – 192.
- [15] SAFFMAN, P., TURNER. J. *On the collision of drops in turbulent clouds*. J. Fluid. Mech. 1, 1956. p. 16 – 30.
- [16] ALMEIDA, F.C. *The collision problem of cloud droplets moving in a turbulent environment, Part I. A method of solution*. J. Atmosphere. Sci. 33. 1976.
- [17] MAXEY, M., RILEY, J. *Equation of motion for a small rigid sphere in a non uniform flow*. Phys. Fluids. 26(4). 1983. p. 883 – 889.
- [18] SQUIRES, K., EATON, J. *Preferential concentration of particles by turbulence*. Phys. Fluids. 3(5). 1991. p. 1169 – 1178.
- [19] TRUESDELL, G., ELGHOBASHI, S. *On the two way interaction between homogeneous turbulence and dispersed solid particles. II. Particle dispersion*. Phys. Fluids. 6(3). 1994. p. 1405 – 1407.
- [20] SHAW, READE, W.C., COLLINS, L.R., VERLINDE, J. *Preferential concentration of cloud droplets by turbulence: Effects on the early evolution of cumulus cloud droplet spectra*. J. Atmospher. Sci. 55. 1998. p. 1965 – 1976.
- [21] ZAICHIK, L., ALIPCHENKON, V., AVETISSIAN, A. *Modeling turbulent collision rates of inertial particles*. Int. J. Heat. Fl. Flow. 27(5). 2006. p. 937 – 944.
- [22] REUTER, G.W., DE VILLIERS, R., YAVIN, Y. *The collection kernel for two falling cloud drops subjected to random perturbations in a turbulent air flow: A stochastic model*. J. Atmospher. Sci. 45. 1988. p. 765 – 773.

- [23] PINSKY, M., SHAPIRO, M., KHAIN, A. *Collision efficiency of drops in a wide range of Reynolds numbers: Effect of pressure on spectrum evolution*. J. Atmospher. Sci. 58(17). 2001. p. 742 – 764.
- [24] WANG, L., WEXLER, A., ZHOU, Y. *Statistical mechanical description and modeling of turbulent collision of inertial particles*. J. Fluid. Mech. 415. 2000.
- [25] STRAHLER, A. N. *The earth Sciences*. Harper & Row Publishers. 1971.
- [26] KSHUDIRAM, SAHA. *The Earth's atmosphere: Its physics and dynamics*. Spriner. 2008.
- [27] ROGERS, R. R., YAU, M. K. *A short course in clouds physics*. Butterworth Heinemann. 1996.
- [28] WALLACE, J. M., HOBBS, P. V. *Atmospheric science: an introduction survey*. Academic Press. 1977.
- [29] PINSKY, M. B., KHAIN, A. P. *Turbulence effects on droplet growth and size distribution in clouds*. Pergamon. 1997.
- [30] PRUPPACHER, H. R., KLETT, J.D. *Microphysics of clouds and precipitation*. Kluwer Academic Publishers. 1997.
- [31] MAXEY, M. *The gravitational settling of aerosol particles in homogeneous turbulence and random flow fields*. J. Fluid. Mech. 174. 1987. p. 441 – 465.
- [32] MAXEY, M., CORRSIN, S. *Gravitational settling of aerosol particles in randomly oriented cellular flows*. J. Atmospher. Sci. 43. 1986. p. 1112 – 1134.
- [33] WANG, L., MAXEY, M. *Settling velocity and concentration distribution of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence*. J. Fluid. Mech. 256. 1993. p. 27 – 68.
- [34] SUNDARMAN, S., COLLINS, L. *Collision statistics in an isotropic particle-laden turbulent suspension. Part 1. Direct numerical simulations*. J. Fluid. Mech. 335. 1997.

- [35] BATESON, COLIN, ALISEDA, ALBERTO. *Wind tunnel measurements of preferential concentration of inertial droplets in homogeneous isotropic turbulence*. 2011.
- [36] BAINES, W., PETERSON, E. *An investigation of flow through screens*. Trans. ASME 12. 1951. p. 467 – 480.
- [37] CORRINS, S. *Turbulence: Experimental Methods. Vol: VIII*. Springer – Verlag. 1963. p. 524 – 590.
- [38] GAD-EL HAK, M., CORRSIN, S. *Measurements of the nearly isotropic turbulence behind an uniform jet grid*. J. Fluid. Mech. 62. 1974. p. 115 – 143.
- [39] WELLS, M., STOCK, D. *The effect of crossing trajectories on the dispersion of particles in a turbulent flow*. J. Fluid. Mech. 136. 1983. p. 31 – 62.
- [40] MOLINA, ALBERTO A. *Acondicionamiento e implementación de un laboratorio para el estudio del crecimiento de gotas de lluvia en nubes cálidas*. Universidad Carlos III. 2009.
- [41] FREYMUTH, P. *Frequency response and electronic testing for constant temperature hot-wire anemometers*. Journal of Physics E.:Scientific Instruments. 1977.
- [42] DANTEC DYNAMICS. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers – practical guide*. Finn E. Jorgensen. 2002
- [43] BATESON, COLIN P. *The radial distribution function as a quantification of the preferential concentration of cloud droplets in a turbulent flow*. PhD. University of Washington. 2010.
- [44] FRIEHE, C.A. *Deviations from the cosine law for yawed cylindrical anemometer sensor*. Journal of Applied Mechanics.
- [45] JORGENSEN, F. E. *Directional sensitivity of wire and fiber-films probes*. DISA Information, 11. 1971.

[46] COMTE – BELLOT, G., CORRSIN, S. *The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence.* J. Fluid. Mech. 25. 1966. p. 657 – 682.

[47] MOHAMED, M.S., LARUE, J.C. *The decay power law in grid-generated turbulence.* J. Fluid. Mech 219. 1990.

[48] BCAHALO, W. *Experimental methods in multiphase flows.* Int J Multiphase Flow 20. 1994.

[49] ALBRECHT, H. *Laser Doppler and phase Doppler measurements techniques.* Experimental fluid mechanics. New York. 2003.

Capítulo 9

Anexos

ANEXO I: Guía rápida de selección de sondas

Free and Confined Flows		
Type of flow	Medium	Recommended Probes
1-Dimensional		
Uni-directional	Gas	Single sensor Wire Single sensor Fiber, thin coat. Wedge-shaped Film, thin coat. Conical Film, thin coat.
	Liquid	Single sensor Fiber, heavy coat. Wedge-shaped Film, heavy coat. Conical Film, heavy coat.
Bi-directional	Gas	Split-fibers, thin coat.
	Liquid	Split-fibers, heavy coat.
2-Dimensional		
One Quadrant	Gas	X-array Wires X-array Fibers, thin coat. V-wedge Film, thin coat.
	Liquids	X-array Fibers, heavy coat. V-wedge Film, heavy coat.
Half Plane	Gas	Split-fibers, thin coat.
	Liquids	Split-fibers, heavy coat.
Full Plane	Gas	Triple-split Fibers, thin coat. X-array Wire, flying hot-wire
	Liquids	Triple-split Fibers, <i>special</i>
3-Dimensional		
One Octant (70° Cone)	Gas	Tri-axial Wire Tri-axial Fiber, thin coat.
	Liquids	Tri-axial Fiber, <i>Special</i>
90° Cone	Gas	Slanted Wire, rotated probe
	Liquids	Slanted Fiber, heavy coat.
Full Space	Gas	Omnidirectional Film
Wall Flows (Shear Stress)		
Type of flow	Medium	Recommended Probes
1-Dimensional		
Unidirectional	Gas	Flush-mounting Film, thin coat. Glue-on Film, thin coat.
	Liquids	Flush-mounting Film, heavy coat. Glue-on Film, <i>special</i>

ANEXO II: Tareas del proyecto de investigación global

Primer año:

· **Experimental:** Ajuste del túnel de viento, la malla y los inyectores para trabajar en las condiciones de operación descritas para la recreación de nubes convectivas.

Ajustar los sistemas experimentales PIV y PDPA mediante el uso de partículas de tamaño y propiedades conocidas para establecer la precisión y fiabilidad de las técnicas de medida.

Realizar las medidas del flujo turbulento de una fase y dos fases para caracterizar la turbulencia, el tamaño de las gotas y la densidad de distribución.

· **Computacional:** Probar y optimizar la aproximación SDHS (Stokes-Disturbance Hybrid Simulation).

Desarrollar la aproximación FRHS (Fully-Resolved Hybrid Method) para dos gotas en aire sin turbulencia.

· **Integración:** Realizar informes adicionales.

Simular numéricamente la pérdida de turbulencia en el túnel de viento.

Desarrollar simulaciones que puedan ayudar al diseño de los experimentos.

Comparar los resultados con los experimentos preliminares obtenidos con simulaciones numéricas y validar las aproximaciones realizadas.

Documentar.

Segundo año:

· **Experimental:** Caracterizar la turbulencia en el túnel de viento.

Realizar experimentos cubriendo un gran rango de condiciones distintas, tanto en flujos turbulentos como en radios de gotas dentro del *gap size*.

Procesado preliminar de los datos y crear una base de datos.

Extender la sección experimental para obtener un rango de disipación turbulenta menor en el túnel de viento a un orden de $\epsilon=10^{-4}$, para poder captar las interacciones de

las gotas en flujos turbulentos con baja disipación, minimizando así la disminución del número de *Reynolds* en el túnel de viento.

· **Computacional:** Probar y optimizar la aproximación FRHS para un flujo turbulento.

Desarrollar diferentes casos para el SDHS con el objetivo de procesar distintas velocidades relativas, distribuciones de tamaño de gotas y velocidad de asentamiento de las mismas.

· **Integración:** Desarrollar modelos teóricos para la distribución del tamaño de gotas $g_{12}(R)$ y velocidad radial relativa de contacto $\langle \omega_r(R) \rangle$.

Comparar las simulaciones con las estadísticas experimentales.

Documentar.

Tercer año:

· **Experimental:** Calcular estadísticas preliminares de la velocidad relativa de la función de distribución radial en una y dos dimensiones y caracterizar los mecanismos inerciales. Postprocesado de los resultados.

Adquisición complementaria de datos impulsada por el postproceso y la simulación de los resultados.

· **Computacional:** Realizar cálculos FRHS y analizar los datos. Aplicar los resultados de FRHS para mejorar la aproximación SDHS. Explorar diferentes rangos de parámetros usando FRHS y SDHS.

· **Integración:** Desarrollar modelos teóricos o empíricos para la eficiencia de las colisiones y el kernel de colisión turbulenta.

Investigar acerca de la importancia relativa de la sedimentación gravitacional en el agrupamiento, estadísticas cinemáticas, ratio de colisiones y eficiencia de la coalescencia.

Realizar un estudio del impacto de la distribución del tamaño de las gotas en la iniciación de la lluvia usando modelos de nubes.

Proponer la siguiente fase a realizar en la investigación.

Documentar

ANEXO III: Posiciones del brazo robótico

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	4;100;0;450	4;100;50;450	4;100;100;450	4;100;150;450	4;100;200;450	3;90;20;310	3;90;70;310	3;90;120;310	3;90;170;310	3;90;220;310	3;90;270;310	3;90;320;310	3;90;370;310
2	4;100;0;400	4;100;50;400	4;100;100;400	4;100;150;400	4;100;200;400	3;90;20;260	3;90;70;260	3;90;120;260	3;90;170;260	3;90;220;260	3;90;270;260	3;90;320;260	3;90;370;260
3	4;100;0;350	4;100;50;350	4;100;100;350	4;100;150;350	4;100;200;350	3;90;20;210	3;90;70;210	3;90;120;210	3;90;170;210	3;90;220;210	3;90;270;210	3;90;320;210	3;90;370;210
4	4;100;0;300	4;100;50;300	4;100;100;300	4;100;150;300	4;100;200;300	3;90;20;160	3;90;70;160	3;90;120;160	3;90;170;160	3;90;220;160	3;90;270;160	3;90;320;160	3;90;370;160
5	4;100;0;250	4;100;50;250	4;100;100;250	4;100;150;250	4;100;200;250	3;90;20;110	3;90;70;110	3;90;120;110	3;90;170;110	3;90;220;110	3;90;270;110	3;90;320;110	3;90;370;110
6	4;100;0;200	4;100;50;200	4;100;100;200	4;100;150;200	4;100;200;200	3;90;20;60	3;90;70;60	3;90;120;60	3;90;170;60	3;90;220;60	3;90;270;60	3;90;320;60	3;90;370;60
7	4;100;0;150	4;100;50;150	4;100;100;150	4;100;150;150	4;100;200;150	3;90;20;10	3;90;70;10	3;90;120;10	3;90;170;10	3;90;220;10	3;90;270;10	3;90;320;10	3;90;370;10
8	4;100;0;100	4;100;50;100	4;100;100;100	4;100;150;100	4;100;200;100	2;120;50;570	2;120;100;570	2;120;150;570	2;100;30;225	2;100;80;225	2;100;130;225	2;100;180;225	2;100;230;225
9	1;135;200;550	1;135;250;550	1;135;300;550	1;135;350;550	1;135;400;550	2;120;50;520	2;120;100;520	2;120;150;520	2;100;30;175	2;100;80;175	2;100;130;175	2;100;180;175	2;100;230;175
10	1;135;200;500	1;135;250;500	1;135;300;500	1;135;350;500	1;135;400;500	2;120;50;470	2;120;100;470	2;120;150;470	2;120;200;470	2;120;250;470	2;120;300;470	2;120;350;470	2;120;400;470
11	1;135;200;450	1;135;250;450	1;135;300;450	1;135;350;450	1;135;400;450	2;120;50;420	2;120;100;420	2;120;150;420	2;120;200;420	2;120;250;420	2;120;300;420	2;120;350;420	2;120;400;420
12	1;135;200;400	1;135;250;400	1;135;300;400	1;135;350;400	1;135;400;400	2;120;50;370	2;120;100;370	2;120;150;370	2;120;200;370	2;120;250;370	2;120;300;370	2;120;350;370	2;120;400;370
13	1;135;200;350	1;135;250;350	1;135;300;350	1;135;350;350	1;135;400;350	2;120;50;320	2;120;100;320	2;120;150;320	2;120;200;320	2;120;250;320	2;120;300;320	2;120;350;320	2;120;400;320
Position ; Angle ; X ; Y													

Estación 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	TL;30;400;320	TL;30;450;320	BL;15;325;600	BL;0;75;630	BL;0;125;630	BL;0;175;630	BL;0;225;630	BL;0;275;630	BL;0;325;630	BL;0;375;630	BL;345;135;600	BL;345;185;600	BL;345;235;600
2	TL;30;400;270	BL;15;275;550	BL;15;325;550	BL;0;75;580	BL;0;125;580	BL;0;175;580	BL;0;225;580	BL;0;275;580	BL;0;325;580	BL;0;375;580	BL;345;135;550	BL;345;185;550	BL;345;235;550
3	TL;30;400;220	BL;15;275;500	BL;15;325;500	BL;0;75;530	BL;0;125;530	BL;0;175;530	BL;0;225;530	BL;0;275;530	BL;0;325;530	BL;0;375;530	BL;345;135;500	BL;345;185;500	BL;345;235;500
4	TL;30;400;170	BL;15;275;450	BL;15;325;450	BL;0;75;480	BL;0;125;480	BL;0;175;480	BL;0;225;480	BL;0;275;480	BL;0;325;480	BL;0;375;480	BL;345;135;450	BL;345;185;450	BL;345;235;450
5	TL;30;400;120	BL;15;275;400	BL;15;325;400	BL;0;75;430	BL;0;125;430	BL;0;175;430	BL;0;225;430	BL;0;275;430	BL;0;325;430	BL;0;375;430	BL;345;135;400	BL;345;185;400	BL;345;235;400
6	TL;30;400;70	BL;15;275;350	BL;15;325;350	BL;0;75;380	BL;0;125;380	BL;0;175;380	BL;0;225;380	BL;0;275;380	BL;0;325;380	BL;0;375;380	BL;345;135;350	BL;345;185;350	BL;345;235;350
7	TL;30;400;20	BL;15;275;300	BL;15;325;300	BL;0;75;330	BL;0;125;330	BL;0;175;330	BL;0;225;330	BL;0;275;330	BL;0;325;330	BL;0;375;330	BL;345;135;300	BL;345;185;300	BL;345;235;300
8	BL;15;225;250	BL;15;275;250	BL;15;325;250	BL;0;75;280	BL;0;125;280	BL;0;175;280	BL;0;225;280	BL;0;275;280	BL;0;325;280	BL;0;375;280	BL;345;135;250	BL;345;185;250	BL;345;235;250
9	BL;15;225;200	BL;15;275;200	BL;15;325;200	BL;0;75;230	BL;0;125;230	BL;0;175;230	BL;0;225;230	BL;0;275;230	BL;0;325;230	BL;0;375;230	BL;345;135;200	BL;345;185;200	BL;345;235;200
10	BL;15;225;150	BL;15;275;150	BL;15;325;150	BL;0;75;180	BL;0;125;180	BL;0;175;180	BL;0;225;180	BL;0;275;180	BL;0;325;180	BL;0;375;180	BL;345;135;150	BL;345;185;150	BL;345;235;150
11	BL;15;225;100	BL;15;275;100	BL;15;325;100	BL;0;75;130	BL;0;125;130	BL;0;175;130	BL;0;225;130	BL;0;275;130	BL;0;325;130	BL;0;375;130	BL;345;135;100	BL;345;185;100	BL;345;235;100
12	BL;15;225;50	BL;15;275;50	BL;15;325;50	BL;0;75;80	BL;0;125;80	BL;0;175;80	BL;0;225;80	BL;0;275;80	BL;0;325;80	BL;0;375;80	BL;345;135;50	BL;345;185;50	BL;345;235;50
13	BL;15;225;0	BL;15;275;0	BL;15;325;0	BL;0;75;30	BL;0;125;30	BL;0;175;30	BL;0;225;30	BL;0;275;30	BL;0;325;30	BL;0;375;30	BL;345;135;0	BL;345;185;0	BL;345;235;0
Position ; Angle ; X ; Y													

Estación 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	R, 45,455,0	R, 40,450,55	P, 36,455,90	D, 29,405,110	D, 29,455,110	Q, 10,347,600	Q, 10,397,600	N, 2,207,600	N, 2,257,600	N, 2,307,600	N, 2,357,600	N, 2,407,600	N, 2,457,600
2	P, 40,450,60	R, 40,450,55	P, 30,420,150	D, 29,405,60	D, 29,455,60	Q, 10,347,550	Q, 10,397,550	N, 2,207,550	N, 2,257,550	N, 2,307,550	N, 2,357,550	N, 2,407,550	N, 2,457,550
3	P, 40,450,10	P, 36,450,50	P, 30,420,100	D, 29,405,10	D, 29,455,10	Q, 10,347,500	Q, 10,397,500	N, 2,207,500	N, 2,257,500	N, 2,307,500	N, 2,357,500	N, 2,407,500	N, 2,457,500
4	P, 30,385,10	P, 30,370,50	P, 30,420,50	M, 20,455,450	Q, 15,390,420	Q, 10,347,450	Q, 10,397,450	N, 2,207,450	N, 2,257,450	N, 2,307,450	N, 2,357,450	N, 2,407,450	N, 2,457,450
5	FU, 33,375,0	P, 30,370,0	P, 30,420,0	M, 20,455,400	Q, 15,390,370	Q, 10,347,400	Q, 10,397,400	N, 2,207,400	N, 2,257,400	N, 2,307,400	N, 2,357,400	N, 2,407,400	N, 2,457,400
6	Q, 29,450,225	N, 27,455,272	M, 20,405,350	M, 20,455,350	Q, 10,297,350	Q, 10,347,350	Q, 10,397,350	N, 2,207,350	N, 2,257,350	N, 2,307,350	N, 2,357,350	N, 2,407,350	N, 2,457,350
7	Q, 29,450,175	N, 27,455,225	M, 20,405,300	M, 20,455,300	Q, 10,297,300	Q, 10,347,300	Q, 10,397,300	N, 2,207,300	N, 2,257,300	N, 2,307,300	N, 2,357,300	N, 2,407,300	N, 2,457,300
8	T, 25,435,250	N, 27,455,175	M, 20,405,250	M, 20,455,250	Q, 10,297,250	Q, 10,347,250	Q, 10,397,250	N, 2,207,250	N, 2,257,250	N, 2,307,250	N, 2,357,250	N, 2,407,250	N, 2,457,250
9	T, 25,435,200	M, 20,355,200	M, 20,405,200	M, 20,455,200	Q, 10,297,200	Q, 10,347,200	Q, 10,397,200	N, 2,207,200	N, 2,257,200	N, 2,307,200	N, 2,357,200	N, 2,407,200	N, 2,457,200
10	T, 25,435,150	M, 20,355,150	M, 20,405,150	M, 20,455,150	Q, 10,297,150	Q, 10,347,150	Q, 10,397,150	N, 2,207,150	N, 2,257,150	N, 2,307,150	N, 2,357,150	N, 2,407,150	N, 2,457,150
11	T, 25,435,100	M, 20,355,100	M, 20,405,100	M, 20,455,100	Q, 10,297,100	Q, 10,347,100	Q, 10,397,100	N, 2,207,100	N, 2,257,100	N, 2,307,100	N, 2,357,100	N, 2,407,100	N, 2,457,100
12	M, 20,305,50	M, 20,355,50	M, 20,405,50	M, 20,455,50	Q, 10,297,50	Q, 10,347,50	Q, 10,397,50	N, 2,207,50	N, 2,257,50	N, 2,307,50	N, 2,357,50	N, 2,407,50	N, 2,457,50
13	M, 20,305,0	M, 20,355,0	M, 20,405,0	M, 20,455,0	Q, 10,297,0	Q, 10,347,0	Q, 10,397,0	N, 2,207,0	N, 2,257,0	N, 2,307,0	N, 2,357,0	N, 2,407,0	N, 2,457,0
Position ; Angle ; X ; Y													

Estaciones 4 y 5

ANEXO IV (a): Programas creados en MATLAB

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   hotwire Data Processing 2D           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

close all; clear all; clc;

tic

%%%%%%%% INPUTS %%%%%%%%%%
File_Handle = 'May18_Station4_6k_pos_';
Ext = '.txt';
Number_of_Rows = 13;
Number_of_Columns = 13;

Location_Name = 'Station 4'; % Station 1, Station 2, etc.
Location_Position = '(2.17m)'; % position in meters

Z(1) = 90; % Z-location of first measurement [cm]
Y(1) = 30; % Y-location of first measurement [cm]
dz = 5;
dy = 5;

% Calibration Parameters (y = M * x + B)
M = 7.0449;
B = 7.2602;
N = 0.45;

% Old Calibration Parameters
% M = 10.682;
% B = 7.6819;
% N = 0.45;

%%%%%%%% The Rest %%%%%%%%%%
```

```
z_pos=1:Number_of_Rows;
y_pos=1:Number_of_Columns;

AVG=zeros(Number_of_Rows,Number_of_Columns);
RMS=zeros(Number_of_Rows,Number_of_Columns);

for j = 1:Number_of_Rows;
    for k = 1:Number_of_Columns;

        % read in data from file
        [Raw] =
textread([File_Handle,num2str(j),'_',num2str(k),Ext], '%f');

        % calculate velocity from hotwire voltage using
calibration values
        Vel = (((Raw.^2) - B) ./ M).^ (1/N);

        % Velocity Statistics
        AVG(j,k) = mean(Vel);
        RMS_ND(j,k) = std(Vel)/AVG(j,k);

        Z(k)=Z(1)-(k-1)*dz;
    end
    Y(j)=Y(1)+(j-1)*dy;
end

[Y,Z]=meshgrid(Y,Z);

% Plot

figure
surf(Y,Z,AVG)
colormap jet
```

```
colorbar
title(['Velocity AVG - ',Location_Name,' ',
Location_Position],...
      'FontSize',[14])
xlabel('Y [cm]'),ylabel('Z [cm]'), zlabel('V_{avg} [m/s]')
saveas(gcf,['Velocity AVG - ',Location_Name],'fig')

figure
surf(Y,Z,RMS_ND)
colormap jet
colorbar
title(['Velocity RMS - ',Location_Name,' ',
Location_Position],...
      'FontSize',[14])
xlabel('Y [cm]'),ylabel('Z [cm]'), zlabel('u_{prime}/U')
saveas(gcf,['Velocity RMS_ND - ',Location_Name],'fig')

save 'input_variables_for_hotwire_Plots_2d_m-file.mat' AVG
RMS_ND Y Z
toc
```

ANEXO IV (b): Programas creados en MATLAB

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   hotwire Data Processing 2D Plots   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

close all; clear all; clc;

load input_variables_for_hotwire_Plots_2d_m-file.mat

bl = 2;      % number of data points inside boundary layer
var = 10;    % percentage of mean used to draw variation
lines

marks = char('-k+', '-kx', '-k*', '-ko', '-ks', ...
             '-kd', '-k^', '-kv', '-k<', '-k>', '-kp');
% AVG_save=AVG;
% AVG(:,end-bl+1:end)=[];
% AVG(:,1:bl)=[];

var = var/100;
[Number_of_Row,Number_of_Columns]=size(AVG);
LegLabels=[];

figure
for j=1+bl:Number_of_Columns-bl
plot(AVG(:,j),Z(:,j),marks(j,:), 'MarkerSize',7);
hold on;

LegLabels=[LegLabels; ['Y = ',num2str(Y(1,j)), ' cm']];
% LegLabels=cat(1,LegLabels, ['Y = ',num2str(Y(1,j)), '
cm']);
end

line([0 5],[40 40], 'Color','k', 'LineStyle','--');
line([0 5],[80 80], 'Color','k', 'LineStyle','--');
grid on
axis([2 4 30 90])
title('Mean Velocity Vertical Profiles - Station 4 (x/M =
21.4)', ...
      'FontSize',16);

xlabel('U_{avg} (m/s)', 'FontSize',14);
ylabel('Z (cm)', 'FontSize',14);
legend(LegLabels, 'Location', 'Best')

```

```
set(gcf, 'Color', [1 1 1])
saveas(gcf, 'Velocity AVG Vert Profiles - Station 4.fig')

crop=AVG(1+bl:Number_of_Columns-bl,1+bl:Number_of_Columns-
bl);
crop_mean = mean(mean(crop));

% line([crop_mean crop_mean],[30 90])
% line([(1+var)*crop_mean (1+var)*crop_mean],[30 90])
% line([(1-var)*crop_mean (1-var)*crop_mean],[30 90])

Number_of_Columns=length(RMS_ND);

figure
for j=1+bl:Number_of_Columns-bl
% plot(RMS_ND(:,j),Z(:,j),'-ob');
plot(RMS_ND(:,j),Z(:,j),marks(j,:), 'MarkerSize',7);
hold on;
end

line([0 2],[40 40], 'Color','k', 'LineStyle','--');
line([0 2],[80 80], 'Color','k', 'LineStyle','--');
grid on
axis([0 0.6 30 90]);
title('Velocity RMS Vertical Profiles - Station 4 (x/M =
21.4)', ...

'FontSize',16);
xlabel('u''/U_{avg} (m/s)', 'FontSize',14);
ylabel('Z (cm)', 'FontSize',14);
legend(LegLabels, 'Location', 'Best')
set(gcf, 'Color', [1 1 1])
saveas(gcf, 'Velocity RMS Vert Profiles - Station 4.fig')

crop=RMS_ND(1+bl:Number_of_Columns-
bl,1+bl:Number_of_Columns-bl);
crop_mean = mean(mean(crop));

% line([crop_mean crop_mean],[30 90], 'Color','k')
% line([(1+var)*crop_mean (1+var)*crop_mean],[30
90], 'Color','r')
% line([(1-var)*crop_mean (1-var)*crop_mean],[30
90], 'Color','r')
```

ANEXO V: Ilustración del soporte de aluminio

