

---

# Interferencia entre chorro de entrada de aire y superficies, en una habitación ventilada - Estudio de un modelo a escala.

---

*Nombre original: Interference between a supply jet and room surfaces in ventilated room – A model study*

Mateo de Guadalfajara

Marzo 2011

Director: Taghi Karimipناه, BSc, Msc, Licentiate of Engineering, Dr. Engineer.  
Departamento: Technology and Built Environment, Hogskolan i Gävle







# Prólogo

## Estudiar, Investigar y Vivir en Suecia

En agosto de 2008 me parecía imposible que en mi estancia en Suecia fuera a aprender tanto como aprendí. Esperaba mucho de aquel año pero no esperaba conocer a mentores tan inspiradores como el Dr. Taghi Karimipannah y el Dr. Mats Sandberg con los que tuve la suerte de trabajar en este proyecto. La confianza que depositaron en mí desde el principio me motivo a trabajar y a realizar una investigación completa que pudiera aportar un paso más en las investigaciones de esta universidad.

## Proyecto como forma de aprender

Este proyecto me ha dado mucha confianza y seguridad como ingeniero. El trabajo que hice, el cual no podría haber sido posible sin el resto de compañeros de Brýnas con los que pasaba el rato, comíamos o tomábamos café, me ha hecho ver el mundo de la investigación desde un punto de vista totalmente distinto. El estar en un centro de investigadores de la ventilación y la eficiencia energética en viviendas me permitió aprender y trabajar mucho más rápido de lo que se podría haber trabajado en cualquier otro centro.

## Agradecimientos

Quiero agradecer a Mats Sandberg y Taghi Karimipannah la atención y la confianza depositada en mí durante este proyecto. A Claes por su ayuda con el equipo técnico y durante el proyecto, a los técnicos del taller que tan profesional y amablemente me ayudaban a modificar el modelo o fabricaban las piezas que necesitaba “If it is good enough for you”. También quiero agradecer a mis padres por su confianza, apoyo y comprensión en este proyecto, este año y los demás de la carrera.



---

# Resumen

---

## Interferencia entre chorro de entrada de aire y superficies, en una habitación ventilada - Estudio de un modelo a escala.

*Nombre original: Interference between a supply jet and room surfaces in ventilated room – A model study*

### JUSTIFICACIÓN

En los países desarrollados hasta el 95% del tiempo se pasa en lugares cerrados, viviendas edificios de oficinas, hospitales, centros comerciales, cines, industrias... Estos lugares cerrados son los lugares en los que trabajamos comemos tomamos un café y en general vivimos.

El desarrollo de los sistemas de ventilación para edificios se desarrollo de manera intensa a partir de los 70 y la aparición en Suecia y otros países nórdicos de problemas respiratorios en las edificaciones de bajo consumo energético. Con sellados casi herméticos que no permitían la transpiración del edificio y bajos niveles de ventilación apareció el S.B.S. (Sick Building Syndrome). Los síntomas del edificio enfermo según el Dr. P. König's son los siguientes.

- 1.- Tendencia a crear corrientes que provocan reumatismos fríos.
- 2.- Irritación en membranas mucosas, el tracto superior respiratorio, ojos y sensación de sequedad.
- 3.- Fiebre, dificultad, para respirar dolor en articulaciones y fatiga .
- 4.- Fatiga, falta de concentración, mareo, dolor de cabeza.
- 5.- Pobre calidad del aire.

El primer síntoma se debe a una ventilación cuyas velocidades máximas son superiores a las adecuadas. El segundo se debe a una cantidad elevada de polvo, microbios alérgenos y esporas por una ventilación ineficiente que no consigue expulsar las partículas e introducir aire limpio. El tercer síntoma se debe a problemas tóxicos microbianos que se reproducen en los sistemas de humidificación. El cuarto y el quinto síntomas se deben a una insuficiente o ineficiente ventilación que no consigue renovar el aire de la habitación y por tanto los contaminantes que se producen en su interior se acumulan.

## ENTORNO

El proyecto presentado se realizó en “El laboratorio para la ventilación y la calidad del aire de la KTH”. Este laboratorio ubicado en la ciudad de Gávele cuenta con un número elevado de investigadores dedicados al estudio de la ventilación en edificios. En este centro se realizan estudios sobre ventilación en Catedrales, Edificios de viviendas, aulas de escuelas, en modelos reales o a escala y mediante simulaciones por ordenador.

En este centro de investigación una de las líneas de investigación llevada por el Dr. Taghi Karimipannah, consiste en el estudio del movimiento del aire en habitaciones mediante el uso de modelos a escala con el objetivo de diseñar en el futuro sistemas que permitan renovar el aire de habitaciones y edificios de forma eficiente.

El estudio que yo realicé se hizo a partir de una maqueta que el centro de investigación acababa de construir para simular la ventilación por chorro en habitaciones. Queremos estudiar el movimiento general de aire en varios casos y llegar a conclusiones sobre si la ventilación es adecuada desde el punto de vista de la renovación de aire y el confort térmico. Queremos saber si el chorro de aire permite la renovación del aire en la habitación o si las partículas contaminantes se acumulan porque el sistema por chorro no permite la mezcla correcta del aire. Además queremos controlar y medir en que zonas el aire de la habitación se mueve a mayores velocidades.

## EJECUCIÓN

Para hacer esto en el proyecto se realizan tres tareas consecutivas.

1) La primera es la observación directa del modelo a escala con técnicas de visualización de fluidos tipo PSV y PSP. Estas técnicas consisten en la medida de la velocidad del aire por grupos de partículas y por partículas individuales. Los grupos de partículas se visualizan mediante humo que proviene de una máquina e introducido en el modelo. Las partículas individuales se visualizan mediante burbujas jabón y helio con una densidad



similar a la del aire. Con la ayuda de un haz de luz plano y una habitación oscura, veremos qué configuraciones de ventilación por chorro son más adecuados y cuáles menos y que ocurre al variar el caudal de ventilación.

2) Conocidas estas primeras conclusiones sobre el movimiento del aire realizaremos medidas in situ sobre el modelo para llegar a conclusiones sobre qué caudales son los más adecuados para las distintas configuraciones del modelo. Estas medidas se realizan con la ayuda de los sistemas antes explicados de visualización y equipos de medida

3) Se realizarán medidas con un anemómetro "*Láser Doppler*" para confirmar las conclusiones iniciales sobre el movimiento del aire y el modo en que afecta el caudal a la velocidad del aire en distintos puntos que definiremos como críticos del modelo. El anemómetro Láser Doppler permite medir la velocidad del aire en sus coordenadas  $x$  e  $y$  mediante la medición de miles partículas individuales que pasan por el punto de medida del aparato en el tiempo de muestreo.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones de este proyecto nos permitirán entender de una manera más concisa cómo deben instalarse y configurarse los sistemas de ventilación para conseguir resultados eficaces más allá de caudales mínimos o máximos pues el objetivo de la ventilación no es introducir y extraer aire, sino renovar el del interior para mejorar la salud de los ocupantes.

Específicamente en el proyecto se concluye que para el modelo en cuestión el valor de Reynolds (calculado según apéndice) del Chorro debe ser mayor de 2600 para conseguir una mezcla correcta y que la orientación del chorro hacia paredes laterales produce corrientes fuertes en la zona ocupada.



# TABLA de CONTENIDOS y ANEXOS

## Índice de contenido

Prólogo.....	5
1 Introducción.....	13
1.1.- Meta.....	13
1.2.- Objetivos.....	13
1.3.- Alcance .....	14
1.4.- Trabajo Previo.....	14
2 Experimentación y análisis.....	17
2.1.- Longitud de desarrollo del chorro en dirección normal.....	22
2.1.1.- Videos de desarrollo del chorro.....	22
2.1.2.- Imágenes de desarrollo del chorro.....	25
2.1.3.- Medidas sobre la distancia de desarrollo del chorro.....	26
2.1.4.- Medidas de la velocidad en el eje del chorro.....	27
2.2.- Evolución de chorro en cono a chorro de pared. “Cone free Jet to wall Jet”.....	30
2.2.1.- Descripción del movimiento.....	30
2.2.2.- Videos de expansión del cono en dirección horizontal.....	30
2.2.3.- Imágenes de desarrollo del cono.....	31
2.2.4.- Medidas sobre el modelo.....	32
2.3.- Movimiento del aire en el plano medio vertical. ....	33
2.3.1.- Descripción del movimiento.....	33
2.3.2.- Videos del plano medio vertical.....	33
2.3.3.- Grosor de la capa superior .....	34
2.3.4.- Medidas del campo de velocidades en el eje vertical.....	35
2.4.- Movimiento del aire con chorro en ángulo.....	38
2.4.1.- Imágenes de colisión con pared lateral.....	38
2.4.2.- Videos chorro en ángulo.....	39
2.4.3.- Medidas cercanas a la zona de colisión.....	41
2.4.2.- Campo de medidas cercanas a la pared. ....	43
3 Conclusiones.....	45
4 Bibliografía.....	51
ANEXO A	
Teoría de fluidos, distintas aproximaciones para estudiar el movimiento del aire, teoría de sistemas de ventilación en habitaciones:.....	53
A.1.- Navier Stokes equation.....	54
A.1.1.- Compressible flow of Newtonian fluids.....	54
A.1.2.- Cylindrical coordinates.....	55
A.1.3.- Equations of free jet in a still ambient.....	55
A.2.- Jets.....	56
A.2.1- Isothermal Jets.....	56
A.2.2- Non isothermal jets.....	56
A.3.- Buoyant flows.....	57
A.4.- Ventilation in rooms.....	58
A.4.1.- Local Exhaust.....	58
A.4.2.- Piston Flow system.....	59
A.4.3 Mixing Flow systems.....	59
A.4.4.- Displacement Flow systems.....	60
A.4.5.- Hybrid systems.....	60
A.5.- Jets in mixing ventilation.....	61
A.6.- Measures in fluids.....	62

A.6.1.- Whole field measuring techniques.....	62
A.6.2.- Velocity measures.....	63
A.7.- Flowlite.....	65
A.7.1.- Light emissor.....	66
A.7.2.- Optic system.....	66
A.7.3.- Beam expander.....	67
A.7.4.- 1D 2D or 3D measures with laser Doppler.....	67
A.7.5.- Flow velocity Analyser.....	68
A.7.6.- Floware.....	68
A.8.- Dimensional Analysis:.....	69
A.9.- Mechanical ventilation, Fan.....	70
<b>ANEXO B</b>	
Metodología de trabajo en el proyecto, cálculo de Reynolds, sistema de coordenadas y cómo se ha medido.....	71
B.1.- General methodology in the Project.....	72
B.1.1.-How to calculate Reynolds.....	72
B.1.2.- Model size and scale.....	73
B.1.3.- Comparing flow rate mean speed and flow movement patterns.....	74
B.1.4.- Calculation of flow with Orifice meter. ....	75
B.1.5.- Determine the position of the measured points. System of reference.....	80
B.2.- Video and photos methodology.....	83
B.3.- Laser Doppler methodology.....	84
B.3.1.- Face1:.....	85
B.3.2.- Face2:.....	86
B.3.3.- Face3:.....	87
B.3.4.- Face 5:.....	87
B.4.- Smoke generation.....	87
B.5.- Bubbles generation.....	87
<b>ANEXO C</b>	
Estudios de las medidas que se pueden realizar con el equipo Láser Doppler.....	89
C.1.- Flowlite, laser Doppler Anemometer .....	89
<b>ANEXO D</b>	
Información y datos del modelo.....	95
D.1.- Model Data.....	95
D.2.- Inlet data.....	95
D.3.- Fan data.....	96
D.4.- Light sheet data.....	96
D.5.- Laser Doppler Data.....	97
D.6.- Environment Data.....	97

---

# 1 Introducción

---

## **1.1.- Meta:**

El interés de este proyecto radica en estudiar el movimiento del aire en habitaciones. El modelo de estudio, con una única entrada de aire y una salida difusa, responde a muchos casos comunes de ventilación. Nuestra meta es estudiar el modelo de ventilación por chorro mediante la variación y comparación de tres parámetros con los que obtendremos conclusiones generales para diseñar estos sistemas. Estos sistemas están bien diseñados si pueden mezclar el aire de la habitación de una forma homogénea y además no producir corrientes de aire en la zona ocupada que puedan producir un discomfort térmico.

## **1.2.- Objetivos**

Existen tres objetivos principales cada uno relacionado con cada una de las partes del trabajo.

- 1) Realizar un estudio visual del movimiento del aire que permita obtener conclusiones generales sobre el movimiento del aire en el modelo con las distintas configuraciones.
  - Este estudio visual es la primera parte del proyecto y consiste en estudiar el movimiento del aire a nivel analítico, llegar a conclusiones causa efecto del movimiento del aire en el modelo y entender el efecto de las distintas variables sobre el modelo.
  - Las variables sobre las que actuaremos son las dimensiones del modelo, en particular la longitud que es variable, la dirección del chorro, pues la entrada es orientable y el caudal de entrada.
  - Para las visualizaciones se utilizará una cámara digital de mano, una máquina de humo, una máquina de generación de pompas de jabón, un haz de luz y una habitación en ambiente oscuro para obtener los mejores resultados visuales. Además para recalcar los detalles se utilizarán programas de retoque fotográfico para remarcar las capas de

aire.

- 2) Estudiar el efecto de la variación de la energía cinética del chorro sobre el movimiento del aire dentro de la habitación

La velocidad con la que el chorro de aire entra en la habitación afecta al movimiento del aire en ésta y su capacidad de mezcla.

Se realizarán medidas de la forma del chorro con distintos valores de caudal para el caso general del modelo.

- 3) Medidas de la velocidad del aire en la habitación.

Llegada a la conclusión de que a mayor energía cinética en el chorro se consiguen mejores resultados en la mezcla de aire nos paramos a estudiar la velocidad del aire en detenimiento, en qué lugares se producen los picos de velocidad y cómo afecta la interferencia del chorro con las paredes en su velocidad, si se producen velocidades altas en las zonas ocupadas por expansión del cono o en las cercanías de las paredes donde el chorro choca.

### **1.3.- Alcance**

Este estudio no pretende calcular la velocidad del aire en cada punto ni para cada caso. Consiste en un estudio general del movimiento del aire en el modelo. No se medirá la velocidad del aire en un campo general del modelo porque cada una de las medidas con el equipo "Láser Doppler" lleva una gran cantidad de tiempo. El número de videos que se muestran representan todos los casos dentro de lo que se incluye el trabajo. Desde valores de Reynolds de 1.000 hasta 50.000. Fuera de estos límites el estudio no pretende entrar porque el modelo no está capacitado para trabajar en condiciones fuera de esos límites. El chorro del modelo puede ser dirigido en una serie de ángulos pero se estudiarán solamente dos casos: normal al modelo y a 45 grados, entendiéndose que los demás resultan de casos intermedio entre estos dos. La longitud del modelo puede ser variada desde 180cm hasta 60cm. Se trabajarán con tres casos uno con la longitud máxima del modelo, otro con la mínima y otro en una situación intermedia.

### **1.4.- Trabajo Previo**

La universidad de Gävle desde principios de los 70 cuenta un centro de investigación asociado a la KTH que se ha dedicado al estudio de la ventilación de los edificios, la eficiencia energética, la calidad del aire y la salud. Este país fue el primero en sufrir y descubrir el Síndrome del edificio enfermo y ha dedicado grandes esfuerzos para estudiar la ventilación en edificios. Se han estudiado en este mismo laboratorio, muchos modelos de ventilación y el movimiento del aire en los edificios con el uso de modelos a escala con varios tipos de fluidos no sólo aire sino también modelos con agua salada para simular la diferencia de densidad del aire caliente. Dentro de este centro además se han utilizado múltiples sistemas para fotografiar y grabar el movimiento del aire. Se han usado partículas de humo y pompas de jabón. Cámaras con ráfagas de fotografías para calcular la velocidad del

aire mediante su cambio de posición entre instantes cercanos y también se utilizan en este mismo laboratorio anemómetros electrónicos y simulaciones por ordenador con Fluent y otros programas de simulación.

Antes de comenzar a trabajar en este proyecto se han revisado proyectos anteriores en los que se estudia el movimiento del aire en habitaciones con chorro. Se ha estudiado los distintos equipos existentes de medidas de la velocidad del aire. Se han estudiado las distintas técnicas de visualización del movimiento del aire y teoría y técnica de medidas con Láser Doppler Anemómetro.

Este proyecto continua una línea de investigación del Doctor Ingeniero Taghi Karimipannah y de su mentor Dr Ingeniero Mats Sandberg. Ambos han estudiado el movimiento del aire en modelos a escala como el del proyecto. Se han revisado los proyectos realizados por ambos doctores y el proyecto realizado amplía resultados frente a proyectos anteriores.

Se han realizado medidas con anemómetro tipo Láser Doppler en zonas donde no se habían podido realizar antes, cerca de las fronteras, sin interferir con elementos físicos tipo anemómetros térmicos. El modelo además tiene la posibilidad de introducir el chorro en ángulo lo que permite el estudio del movimiento del aire para un caso que no ha sido estudiado previamente en este centro.





---

## 2 Experimentación y análisis

---

Los parámetros que se varían en el proyecto son el ángulo de entrada el caudal y la longitud del modelo. De entre estos podemos ver con las visualizaciones que la variación mayor en la dinámica de movimiento del aire se produce cuando colocamos en ángulo la entrada de aire.

Si el chorro entra en la habitación con un ángulo normal a las paredes el movimiento del aire en la habitación se comporta homogéneamente entre dos capas. En la capa superior el aire que entra se mezcla con el existente en la parte superior y avanza hasta el fondo de la habitación donde siguiendo el efecto Coanda el chorro de aire se torna, descende vuelve a girar de forma gradual y comienza el trayecto en dirección contraria.

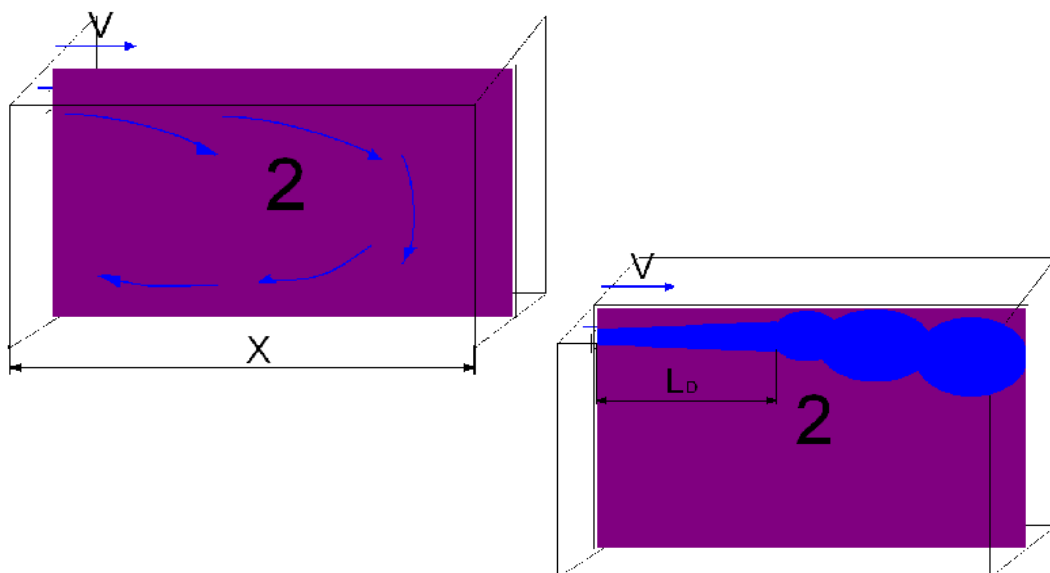


Figura 1: Esquemas explicación movimiento con chorro normal

Si el chorro entra en la habitación con un ángulo tal que choca con una pared en ángulo antes de expandirse completamente entonces el chorro siguiendo el efecto Coanda gira y comienza a describir una trayectoria circular con eje vertical siguiendo todas las paredes de la habitación.

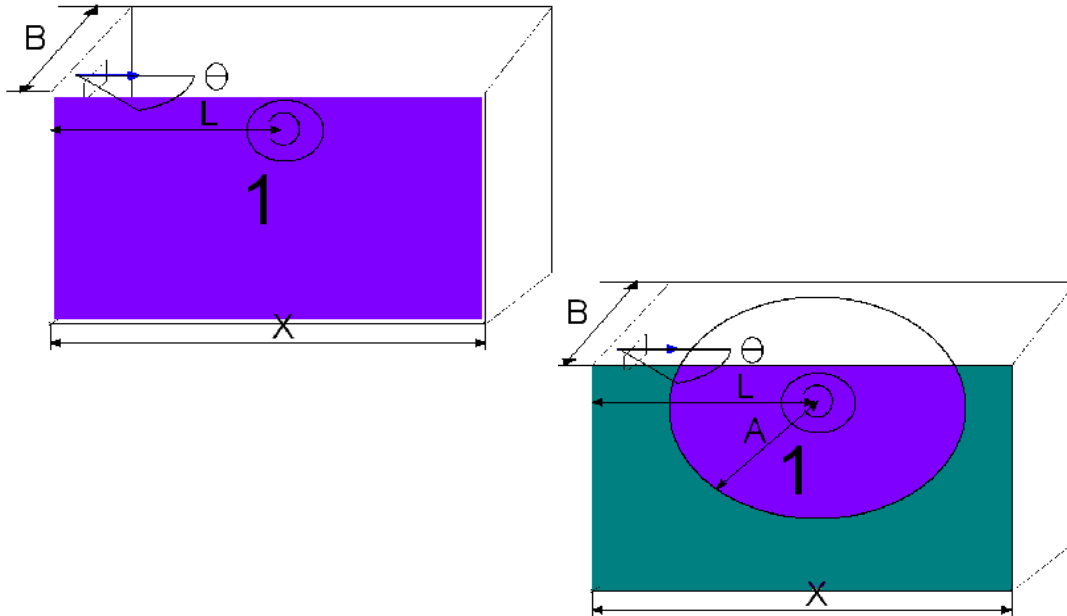


Figura 2: Esquemas explicación movimiento del aire chorro angular

La geometría de la habitación afecta al movimiento del aire en tanto cuanto que el chorro de aire choca antes o después con esa pared pero no afecta al movimiento general.

El caudal de ventilación se mueve entre un valor mínimo por debajo del cual el chorro no se mezcla con el aire de la habitación y se pierden estos efectos descritos antes y un valor máximo por encima del cual las turbulencias enturbian el movimiento general del aire y se pierde ese comportamiento casi homogéneo y estacionario descrito anteriormente.

Para entender lo que explico en estas líneas en el proyecto se adjunta un DVD en el cual podrán visualizar estos comportamientos descritos en los videos.

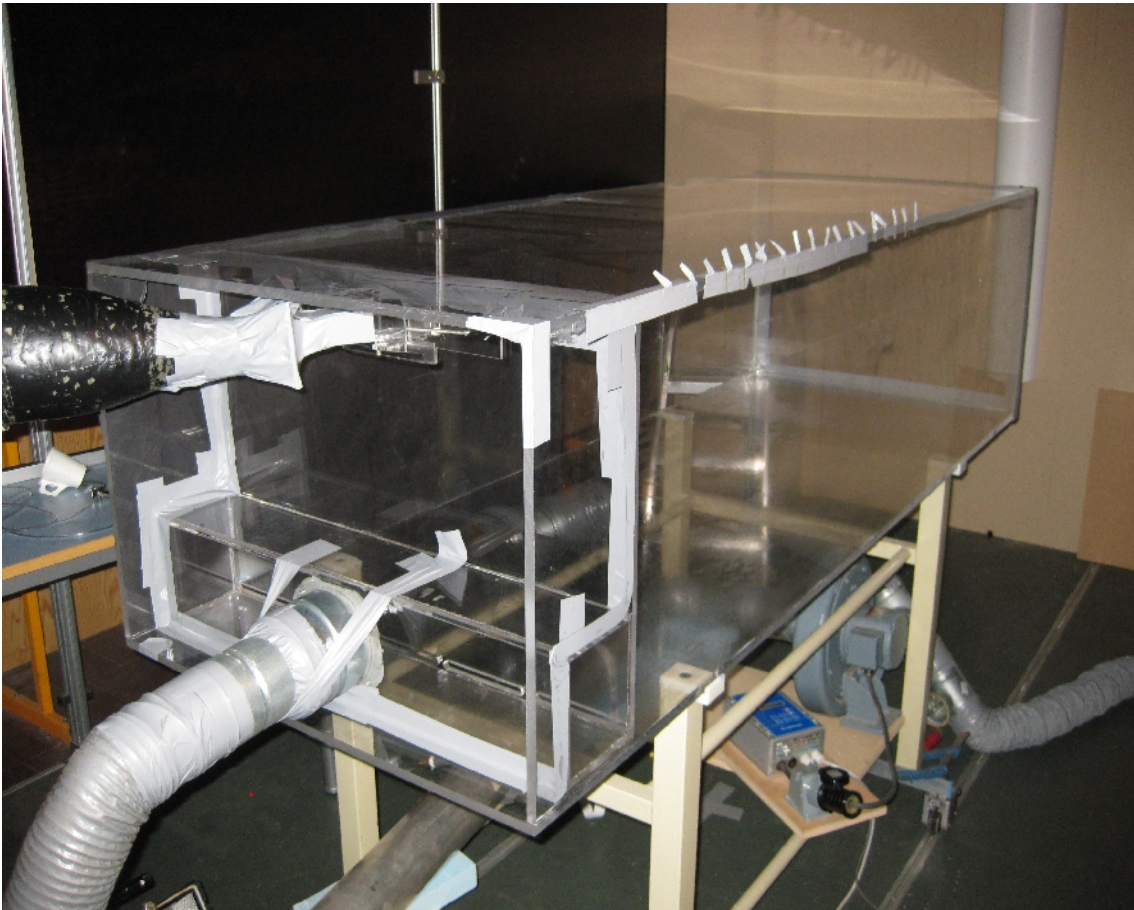


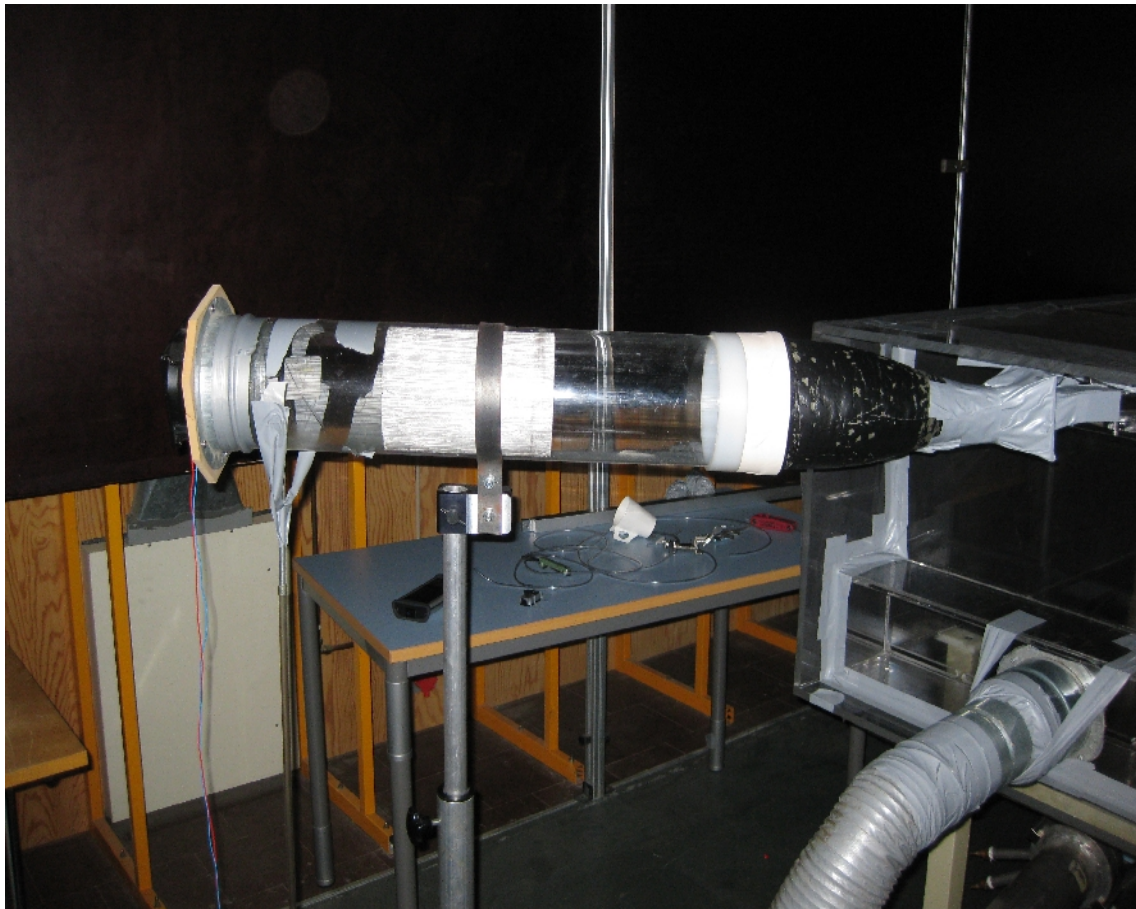
Figura 3: Fotografía del modelo en la sala de experimentación.



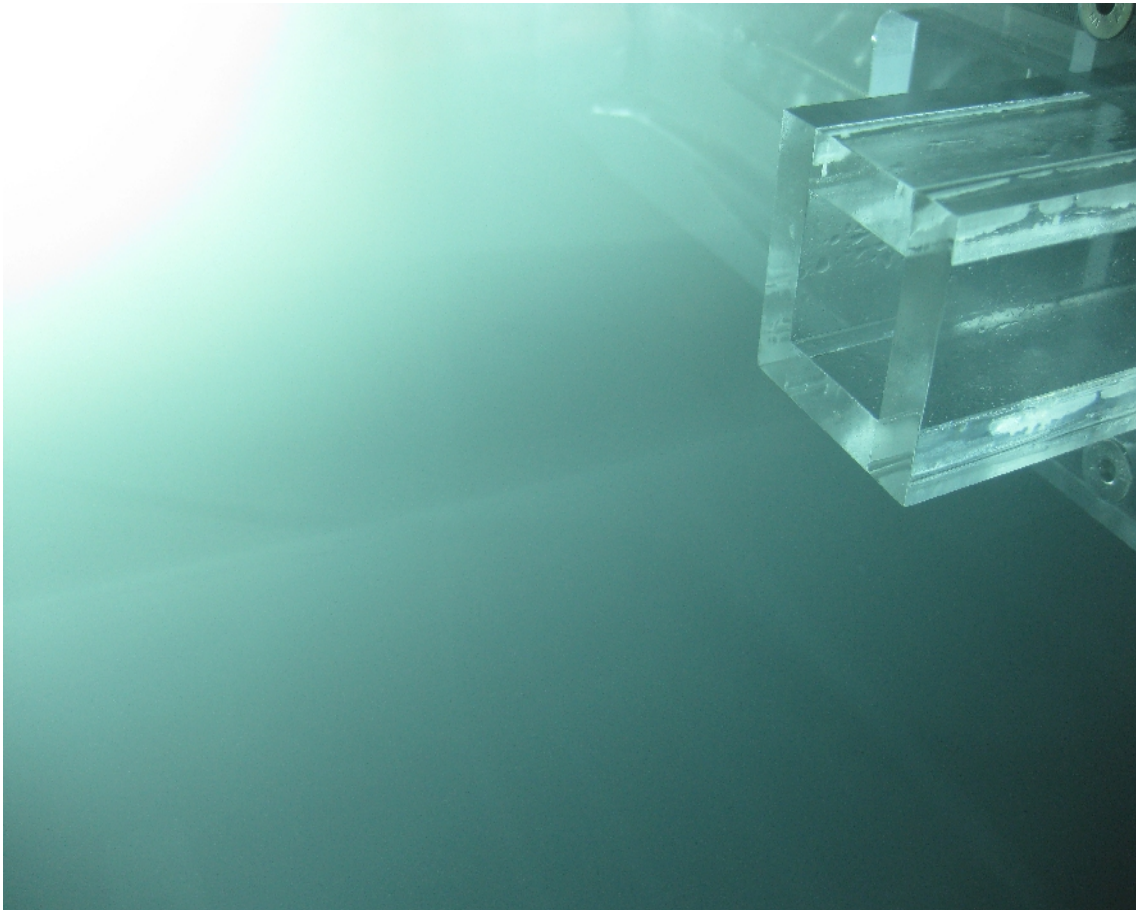
Figura 4: Fotografía del equipo Láser Doppler



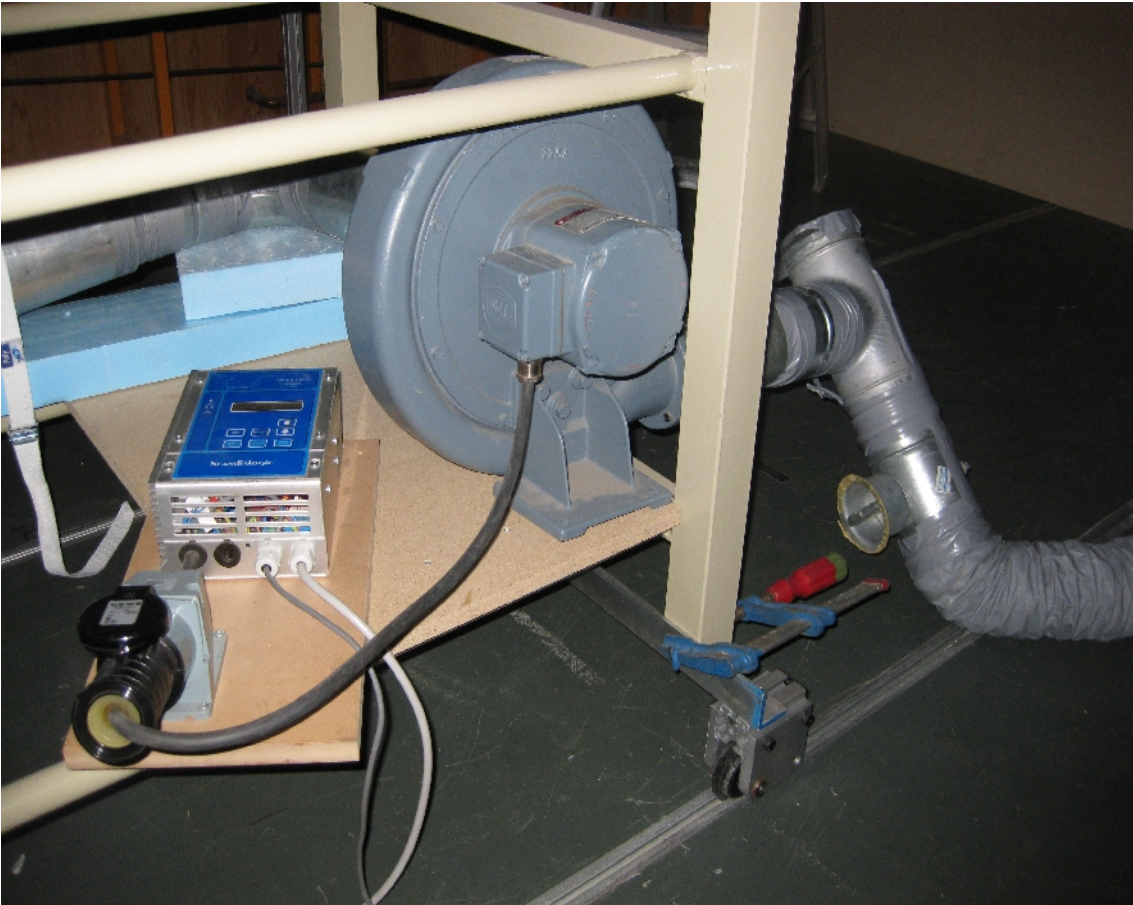
*Figura 5: Equipo de medida para la velocidad*



*Figura 6: Aparato de mezcla de aire con humo*



*Figura 7: Imagen de la boquilla de entrada de aire*



*Figura 8: Fotografía compresor del modelo*

## 2.1.- Longitud de desarrollo del chorro en dirección normal.

La distancia que necesita un chorro para desarrollarse de laminar a flujo turbulento sirve como indicador de la capacidad de mezcla. Si el chorro necesita una larga distancia para pasar a régimen turbulento no se mezclará correctamente con el aire de la habitación. Straub en 1969 describe la zona en que la forma del chorro tiene la forma de la entrada como Zona 1 en su diagrama de una expansión isotérmica de un chorro. Con diferentes caudales asociados a valores de Reynolds adimensionales se han realizado fotos videos y medidas para reflejar este comportamiento de los chorros isotérmicos en habitaciones. El cálculo de Reynolds para todos los experimentos se describe en el Anexo.

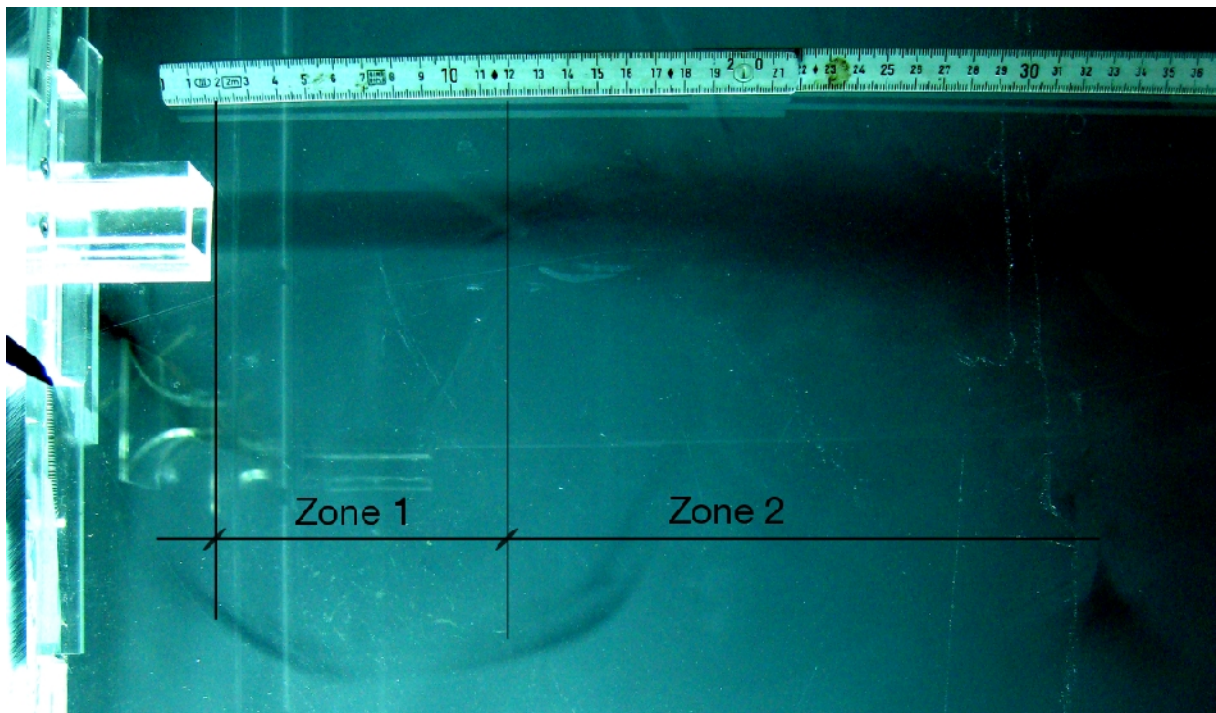


Figura 9: Zonas de expansión de chorro isotérmico en habitación

### 2.1.1.- Videos de desarrollo del chorro

Para comenzar a entender estos procesos podemos ver los videos grabados sobre la cara 5 del modelo (cara superior). Para ver más sobre las distintas caras del modelo y la nomenclatura utilizada ver apéndice Metodología.

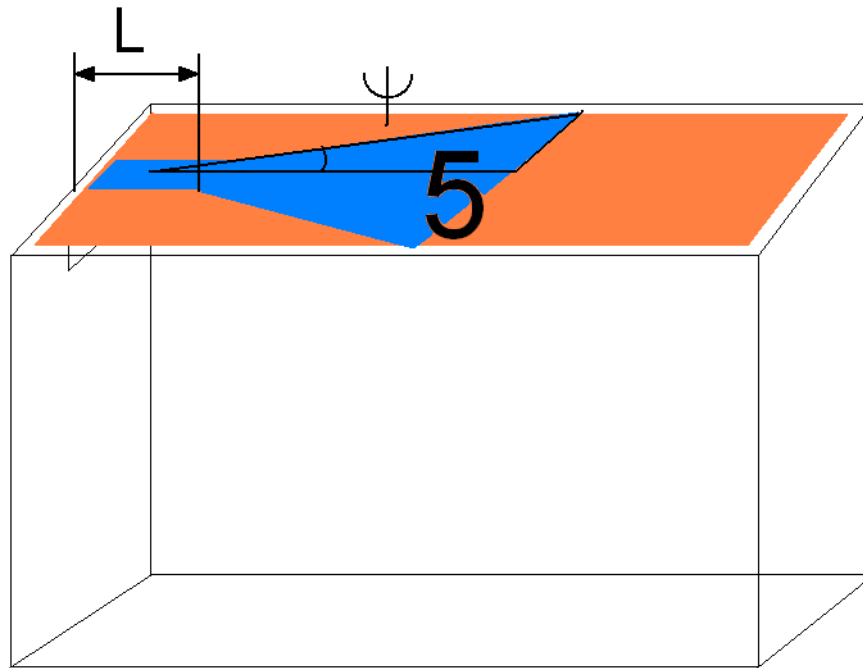


Figura 10: Descripción de la visualización en cara 5

Ref. Number:	Cara	Caudal (l/s)	Longitud	Ángulo	Humo	Burbujas	Reynolds
783	5	0,86	180	0	SI		2600
784	5	1,21	180	0	SI		3800
785	5	1,71	180	0	SI		5300
522	5	1,71	90	0	SI		5300
524	5	3,41	90	0	SI		10600
530	5	1,71	90	45	SI		5300
531	5	3,41	90	45	SI		10600
532	5	7,57	90	45	SI		23500
653	5	1,71	45	45		SI	5300
654	5	3,41	45	45		SI	10600
655	5	7,57	45	45		SI	23500
667	5	1,71	45	0		SI	5300
668	5	3,41	45	0		SI	10600
669	5	7,57	45	0		SI	23500
1309	5	0,85	45	45	SI		2600
1310	5	1,71	45	45	SI		5300
1311	5	3,8	45	45	SI		11800
1312	5	0,85	45	0	SI		2600

1313	5	1,71	45	0	SI		5300
1314	5	3,8	45	0	SI		11800

*Tabla 1: Videos de la cara 5, explicación desarrollo del chorro*

De estos, los videos que mejor muestran el desarrollo de zona 1 a zona 2, son los videos 783 784 y 785. En estos podemos ver el desarrollo del chorro para valores de Reynolds de 2600 3800 y 5300. El primer video muestra una longitud de desarrollo muy larga y vamos viendo cómo para valores de Reynolds mayores, la longitud de desarrollo del chorro se va reduciendo hasta que es casi nula.

La zona 2 de desarrollo del chorro isotérmico en habitación es la zona en la cual el chorro de vuelve turbulento y se mezcla en mayor medida con el aire de la habitación. Además en esta zona el chorro se expande en forma de cono.

La imagen 2. refleja esta descripción general que se observa desde la cara superior del modelo.



## 2.1.2.- Imágenes de desarrollo del chorro.

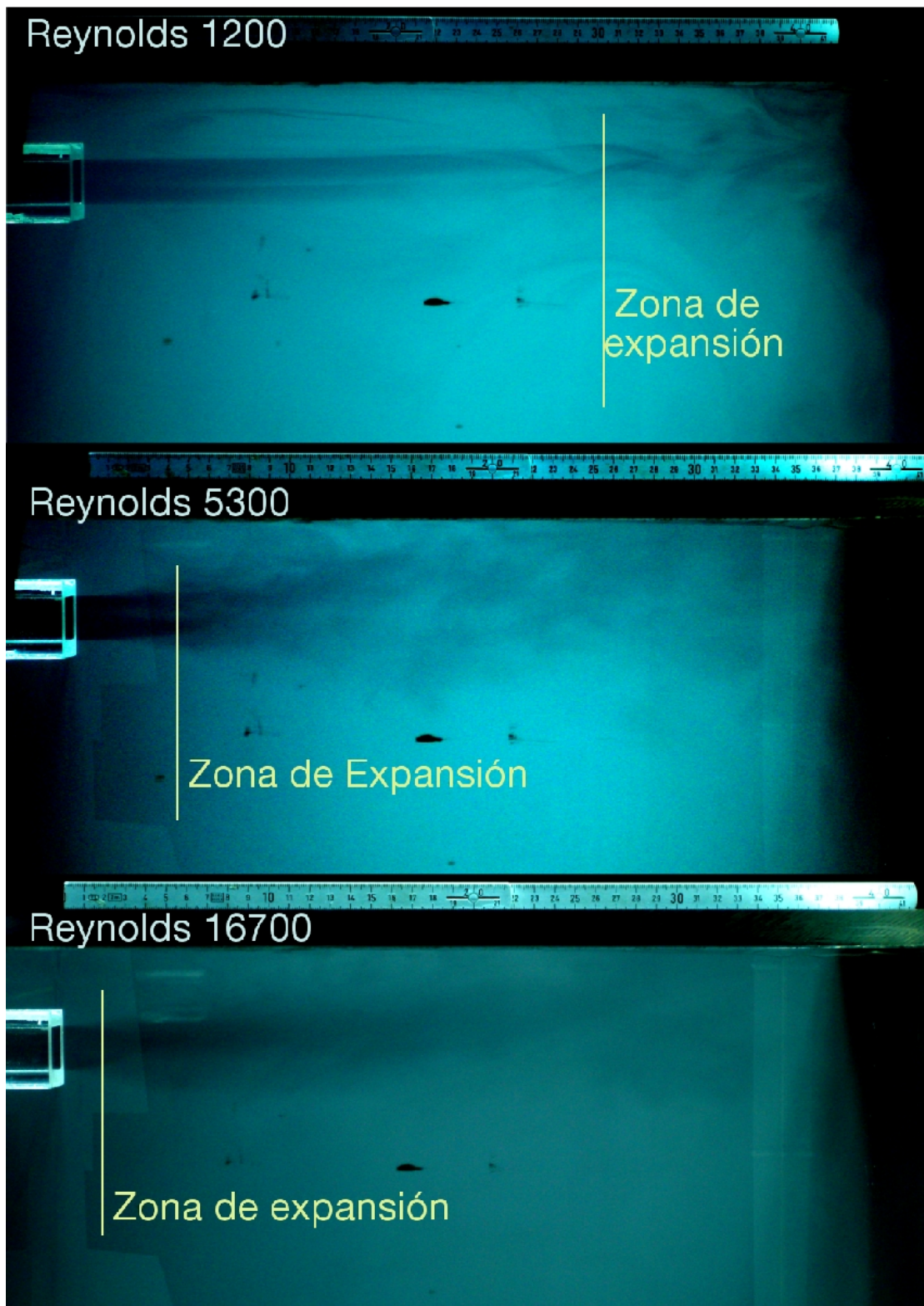


Figura 11: Ejemplos expansión del chorro para varios valores de Reynolds

### 2.1.3.- Medidas sobre la distancia de desarrollo del chorro

Se ha decidido medir con una regla la distancia que requiere pasar de zona 1 a zona 2 para estudiar el rango de valores en los cuales es adecuado que este Reynolds si queremos que el chorro de aire se mezcle adecuadamente. . Puesto que la medida variaba continuamente se han realizado 20 muestras en cada caso. Los casos que se presentan son 4. El primero de ellos Reynolds 844 corresponde a la menor medida de caudal que se comportaba de manera estable en el modelo a escala, para valores menores el compresor no funcionaba de forma estable. Se han realizado 3 medidas más con otros valores de Reynolds hasta llegar a 2660. A partir de este punto la variación en las medidas pasa a ser más pequeña.

Caudal (l/s)	0,271	0,383	0,663	0,855
Reynolds	844	1193	2061	2659
1	65	35	16	10
2	66	21	18	12
3	61	23	17	12
4	62	34	20	11
5	61	28	14	10
6	58	31	19	11
7	59	31	18	11
8	75	35	21	11
9	64	19	12	11
10	70	25	15	11
11	59	25	17	10
12	60	16	14	12
13	59	29	14	11
14	60	31	16	11
15	60	24	17	13
16	66	29	19	13
17	62	19	19	12
18	63	23	15	12
19	67	27	12	13
20	55	28	14	12
Media	62,6	26,65	16,35	11,45
Desv. S.	4,604	5,461	2,581	0,95

Tabla 2: Longitud del chorro para pasar de zona 1 a zona 2

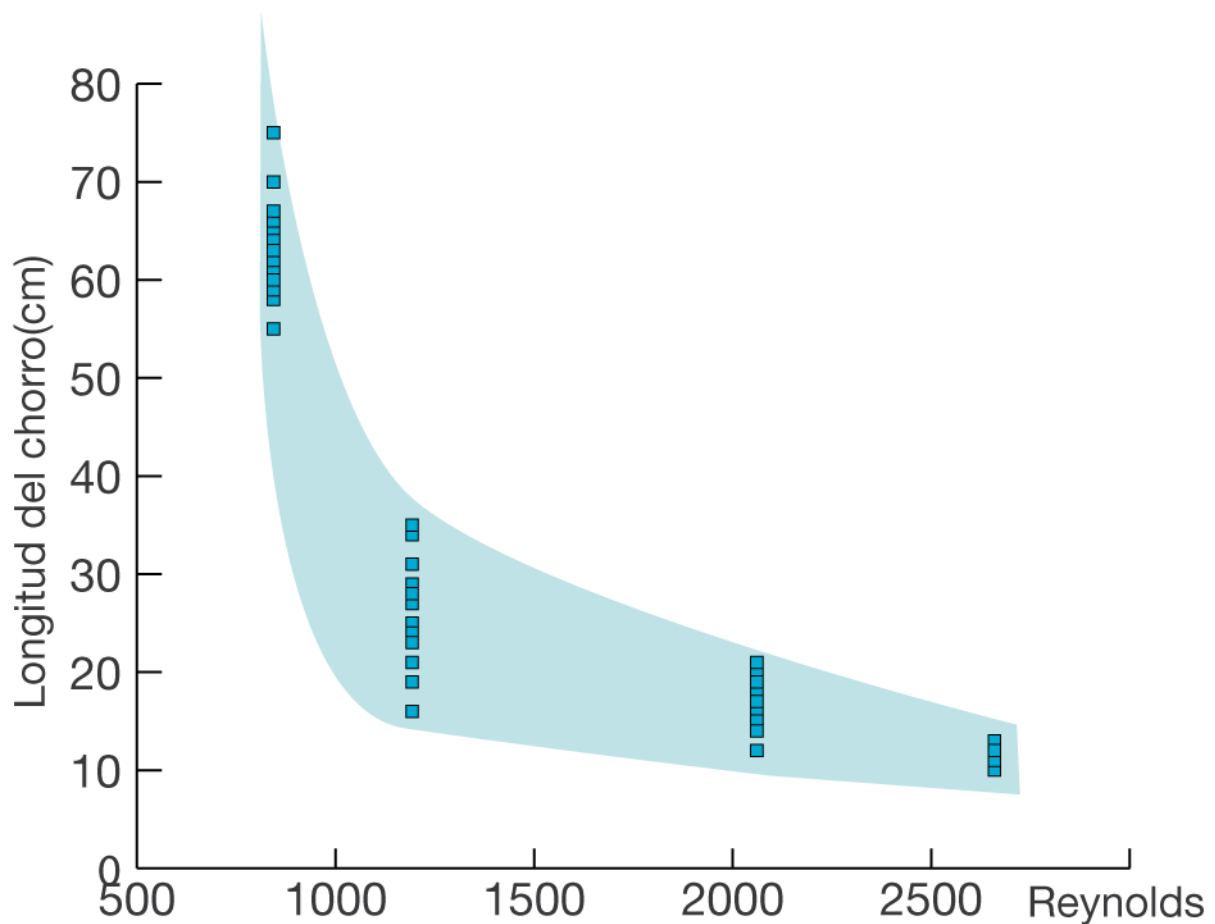


Figura 12: Longitud del chorro para pasar de zona 1 a zona 2 en función de Reynolds

En la gráfica se ve que para valores de Reynolds mayores de 2000 la distancia requerida para pasar de laminar a turbulento se estanca en una distancia de unos 10 cm para el modelo a escala. La dispersión de los valores aumenta al disminuir el valor de Reynolds porque el paso de una situación a otra depende de ruidos y situaciones en el ambiente aleatorias. Incluso un ruido alto puede alterar la distancia requerida para pasar a turbulento.

Cuando el chorro pasa a turbulento el aire comienza a mezclarse. En un sistema de ventilación basado en la mezcla de aire es necesario que este proceso se produzca lo antes posible. Según los experimentos ese proceso se produce tarde en los valores de Reynolds inferiores a 2000. La distancia pasa a ser 6 veces mayor.

#### 2.1.4.- Medidas de la velocidad en el eje del chorro.

El chorro transmite su energía cinética al resto del fluido y va perdiendo velocidad según se mezcla e interacciona con el resto del aire de la habitación. Desde el punto de entrada del chorro, éste pierde velocidad.

Con un anemómetro Láser Doppler se a medido la velocidad del aire en el eje del chorro a distintas distancias del eje, dando el campo de velocidades en ese eje.

La primera medida se realiza a 2cm de la entrada de aire en el modelo y la última a 40 cm de la entrada.

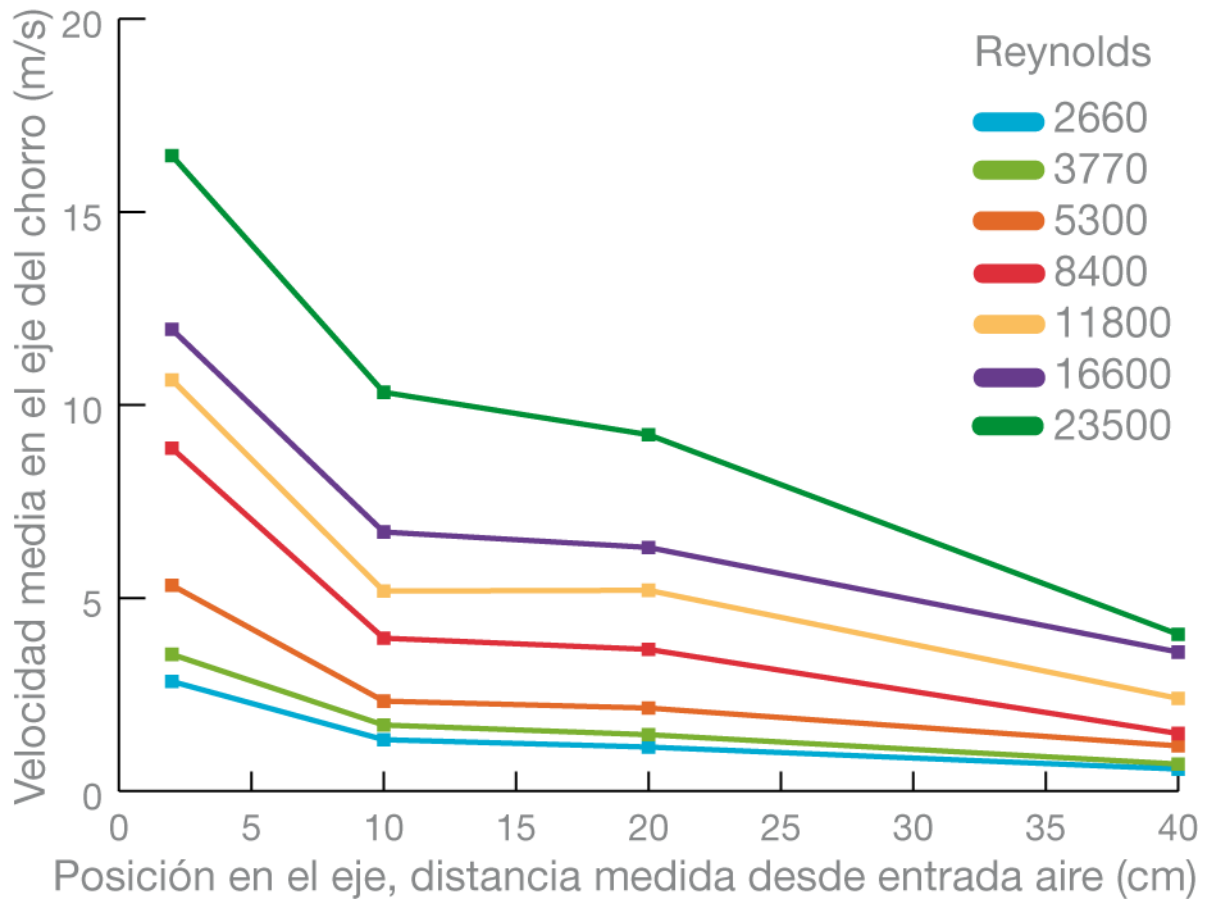


Figura 13 :Velocidad media en el eje del chorro

La relación entre Reynolds, Caudal y la velocidad de entrada de aire (definida como caudal entre sección de entrada) da unos valores que si se comparan con los de la gráfica a 2 cm de la entrada se ve que son parecidos. La velocidad medida con el Láser Doppler se ha medido en la zona de máxima velocidad.

#### Valor de Reynolds, Caudal del modelo, Velocidad de entrada

Reynolds	Caudal (l/s)	Velocidad (m/s)
2660	0,86	1,94
3770	1,21	2,74
5300	1,71	3,87
8400	2,69	6,1
11800	3,8	8,62
16700	5,37	12,17
23600	7,58	17,19

Tabla 3: Comparación Reynolds, caudal velocidad para el experimento.

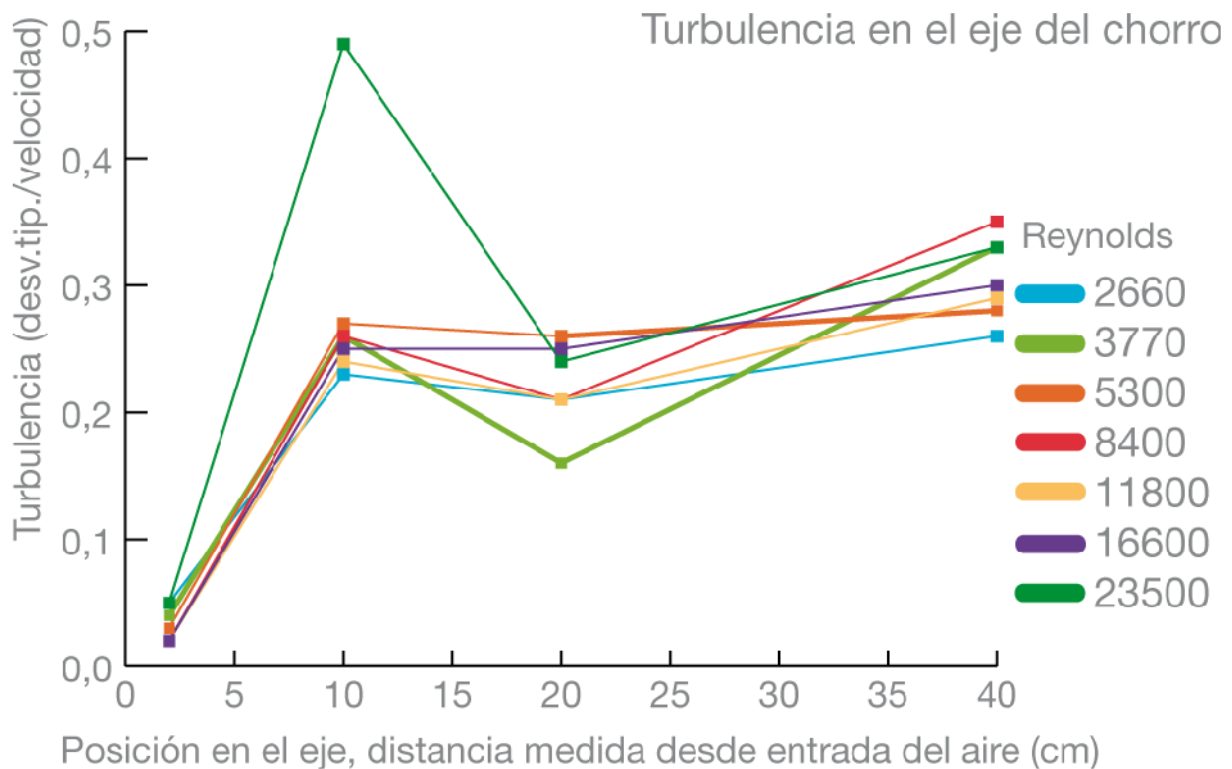


Figura 14: Turbulencia medida en cara 5

El anemómetro Láser Doppler da un resultado de medida para un número de medidas que suele ser de millares de medidas. En este caso se han realizado unas 1000 medidas para cada punto. La desviación estándar refleja un valor de la turbulencia del flujo que pasa por el punto de medida. La turbulencia se mide como la relación entre la desviación estándar de las medidas de velocidad del aire y la velocidad de este. Este valor por tanto es adimensional puesto que tanto la media de la desviación típica como la de la velocidad se miden en m/s.

En la gráfica se ve que la turbulencia del fluido es muy diferente de la zona 1 respecto de la zona turbulenta. Existe una cierta relación por la cual a valores mayores de velocidad aumenta ligeramente la turbulencia del sistema, pero lo más importante es estar en la zona de comportamiento turbulento.

## **2.2.- Evolución de chorro en cono a chorro de pared.** “Cone free Jet to wall Jet”

El chorro de aire que se mezcla con el aire de la habitación se expande como un cono plano por la parte superior del modelo. Como se puede ver en los videos 783, 784 y 785 el chorro crece en ángulo cuando no existe interacción con las paredes del modelo. Cuando el cono se ha expandido hasta estar cerca de las paredes el aire se mueve como un bloque y hace avanzar todo el aire de la parte superior del modelo hacia la pared del fondo.

### **2.2.1.- Descripción del movimiento**

El chorro en cono se produce para aquellos valores de Reynolds superiores a 2600. Por debajo de este valor el cono no se forma de manera estable y no se consigue un resultado estacionario que pueda ser comparable a los casos en que el valor de Reynolds es superior a 2600.

El chorro se introduce en el modelo y comienza su expansión a partir de la distancia característica estudiada en el punto 2.1. A partir de entonces, el chorro de aire se abre en un ángulo de aproximadamente 22° a izquierda y derecha. No se puede apreciar una relación entre Reynolds y la apertura de este cono y por tanto se considera básicamente independiente al valor del caudal y constante.

Si la expansión ha sido completa antes de llegar al fondo todo el bloque descendiendo siguiendo la superficie y retorna arrastrando todo el aire. Este comportamiento es bastante eficiente desde el punto de vista de la renovación del aire pues estamos desplazando todo el aire desde la entrada hacia la salida de la forma más homogénea posible, sin crear zonas de estancamiento o zonas de recirculación.

Si la expansión no ha sido completa, como se ve en los videos 666, 1312, 1313 y 1314 cuando el aire choca con la pared del fondo sigue la dirección de la superficie pero no en bloque hacia abajo sino en forma radial en todas las direcciones. Parte del aire vuelve por la parte superior y se crean recirculaciones que consumen energía en el movimiento y no son eficaces puesto que no desplazan aire hacia la salida. Incluso se producen zonas de estancamiento donde el aire no se esta renovando de manera adecuada y los contaminantes podrían acumularse en estado estacionar

### **2.2.2.- Videos de expansión del cono en dirección horizontal**

Para visualizar las expansión del cono podemos utilizar los mismos videos de Referencias utilizados en la sección 2.1 porque la expansión del cono se visualiza en la misma cara del modelo. Para ver la forma de cono del chorro al expandirse es más descriptiva la utilización de humo si bien con burbujas también se puede ver la

forma como superposición de sucesivas imágenes la visualizaciones con humo muestran en cada fotograma la forma del cono.

### 2.2.3.- Imágenes de desarrollo del cono

En la serie de imágenes de esta página, se muestra lo que ocurre cuando la longitud del modelo es corta y el chorro no consigue expandirse antes de llegar al final de la caja.

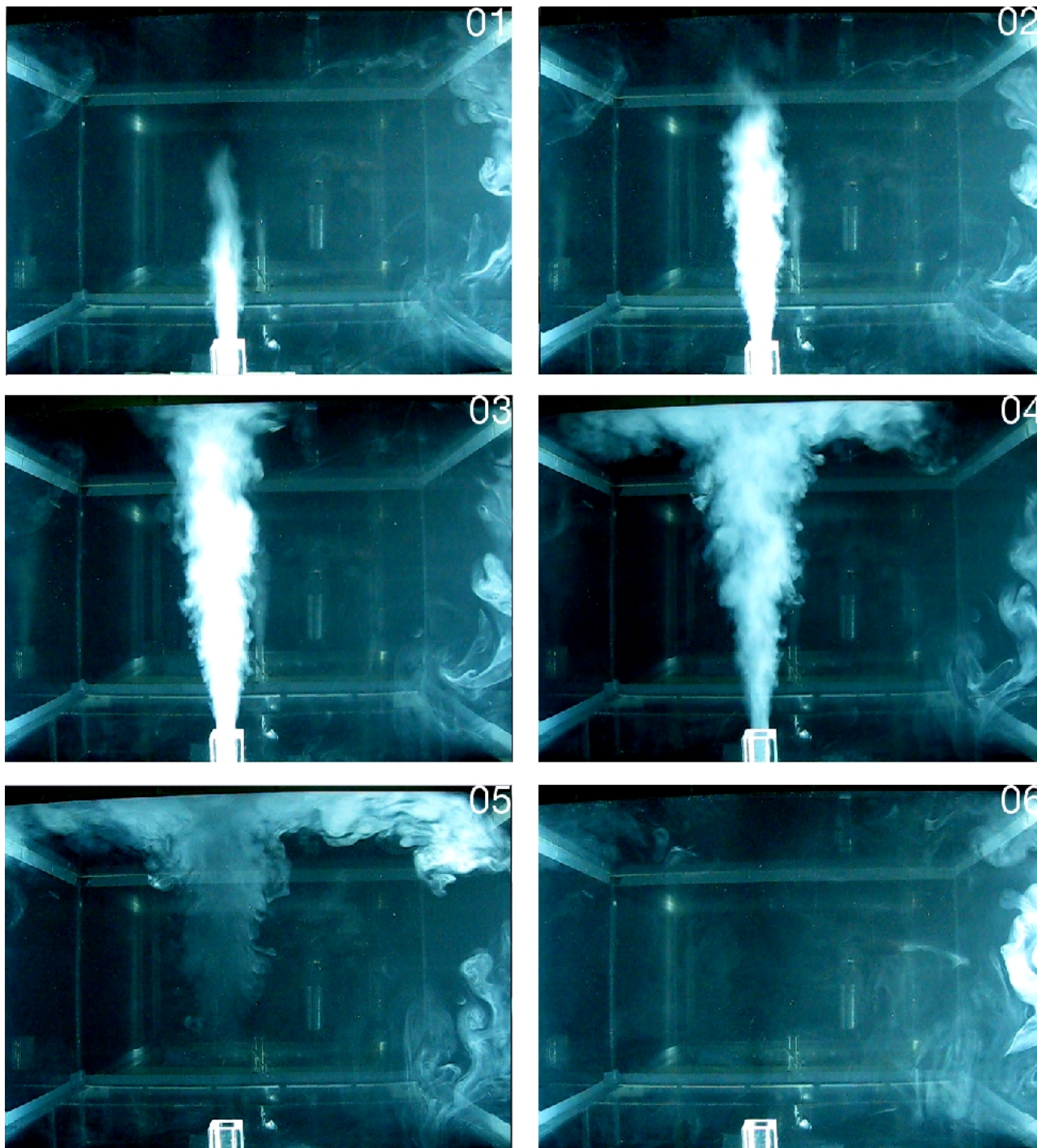


Figura 15 : Movimiento del aire cuando el chorro no llega a interactuar con las paredes laterales

## 2.2.4.- Medidas sobre el modelo

Sobre el modelo desde la cara superior con un haz de luz horizontal que iluminaba la capa a la altura de la entra del chorro se ha medido la posición de la capa de corte entre el aire que entra y el existente. Esta medida se ha realizado con el tamaño más grande de modelo y para distintos valores de Reynolds con el objetivo de buscar el ángulo con el que se abre el chorro de aire y si el valor de Reynolds influye.

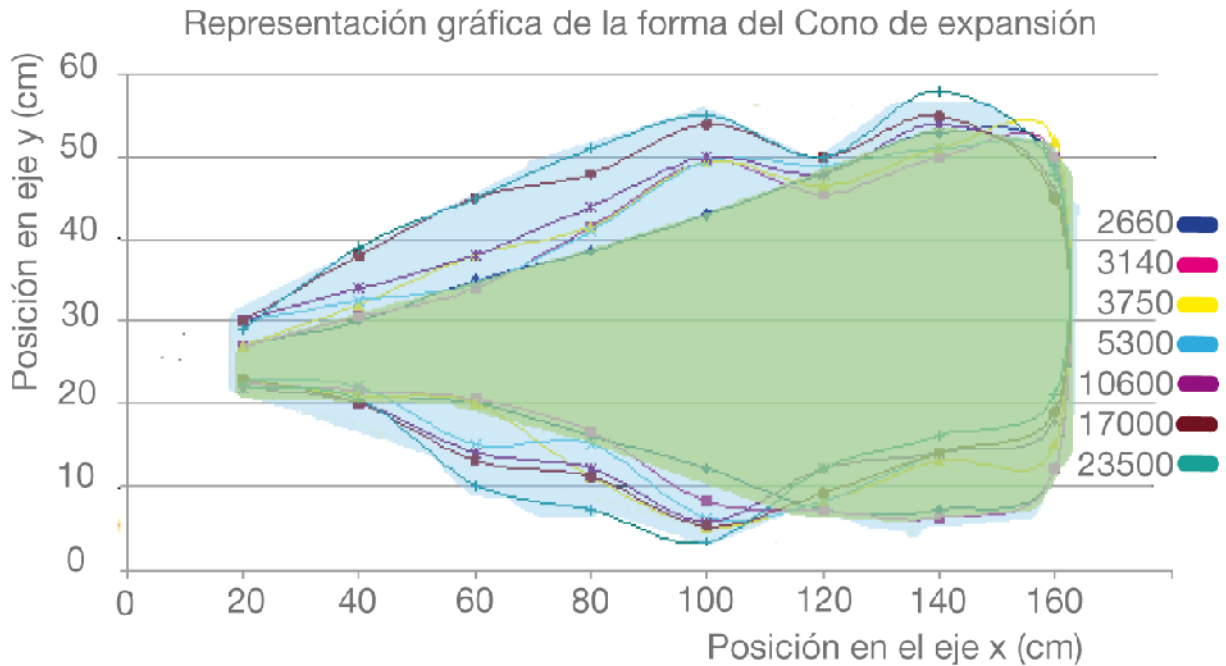


Figura 16: Expansión chorro en cono libre

El ángulo con el que se abre el cono es de aproximadamente  $22^\circ$ . La diferencia entre los distintos conos radica en el punto de comienzo de expansión el cual es más cercano al origen cuanto mayor es Reynolds. Una observación curiosa es que cerca de la pared final se produce una contracción en el ancho de avance y se producen pequeños remolinos en estas zonas contraídas.

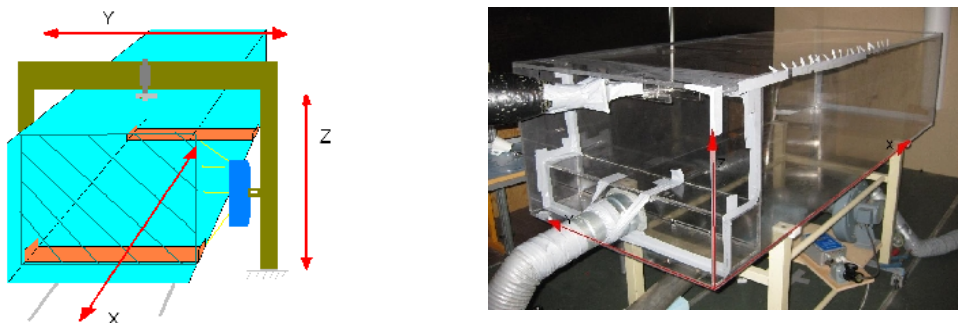


Figura 17: Explicación del sistema de coordenadas utilizado

Sobre la gráfica se a sombreado la forma del cono para los dos casos más extremos mínimo valor de Reynolds para los rangos en que se produce este comportamiento y máximo valor de Reynolds posible por el modelo.



## **2.3.- Movimiento del aire en el plano medio vertical.**

En los dos casos anteriores se ha estudiado el movimiento del aire en la capa superior del modelo. En este caso se estudia un plano vertical en el cual se observa el movimiento del aire en las distintas altura. Se descubre una partición entre el aire impulsado en la parte superior y el de retorno de la capa inferior.

### **2.3.1.- Descripción del movimiento**

Desde un lateral del modelo y con un foco, haz de luz, que ilumine el plano medio vertical en la dirección del chorro podemos ver la diferencia tan evidente que existe entre el aire de la capa superior y el de la capa inferior. La capa superior movida por el chorro avanza en la misma dirección hasta llegar a la pared del fondo del modelo donde cambia de sentido y vuelve en dirección contraria ocupando una sección mayor de la caja y con una velocidad inferior

### **2.3.2.- Videos del plano medio vertical**

Para todos los videos el comportamiento del sistema es similar. El chorro de aire llega hasta el final de la habitación, choca con la pared y se expande siguiendo la superficie.

En los videos de mínima longitud se ve que hay una gran cantidad de flujo que retorna y se producen recirculaciones en la parte superior del modelo.

Si queremos ver la velocidad que tienen las partículas para las distintas configuraciones de Reynolds podemos utilizar las visualizaciones con pompas de jabón. Que nos dan una idea más adecuada sobre el movimiento de partículas individuales.

Ref. Number:	Cara	Caudal (l/s)	Longitud	Ángulo	Humo	Burbujas	Reynolds
325	2	1,53	180	0	SI		4800
327	2	7,5	180	0	SI		23600
330	2	5,37	180	0	SI		16700
351	2	7,5	90	0	SI		23600
360	2	1,72	90	0	SI		5340
620	2	0,5	45	0	SI		1500
639	2	1,21	45	0	SI		3800
543	2	1,73	90	0		SI	5400
544	2	3,4	90	0		SI	10600
545	2	7,58	90	0		SI	23500
568	2	1,73	45	0		SI	5400

569	2	3,4	45	0		SI	10600
570	2	7,58	45	0		SI	23500
1287	2	0,85	180	0		SI	2600
1288	2	1,71	180	0		SI	5300
1289	2	3,8	180	0		SI	11800

Tabla 4: Videos movimiento del aire, plano vertical en el eje del chorro.

### 2.3.3.- Grosor de la capa superior

Se han tomado valores de la capa corte entre la zona superior y la parte inferior del modelo para estudiar la variación de esta capa frente a distintos valores de Reynolds en el modelo.

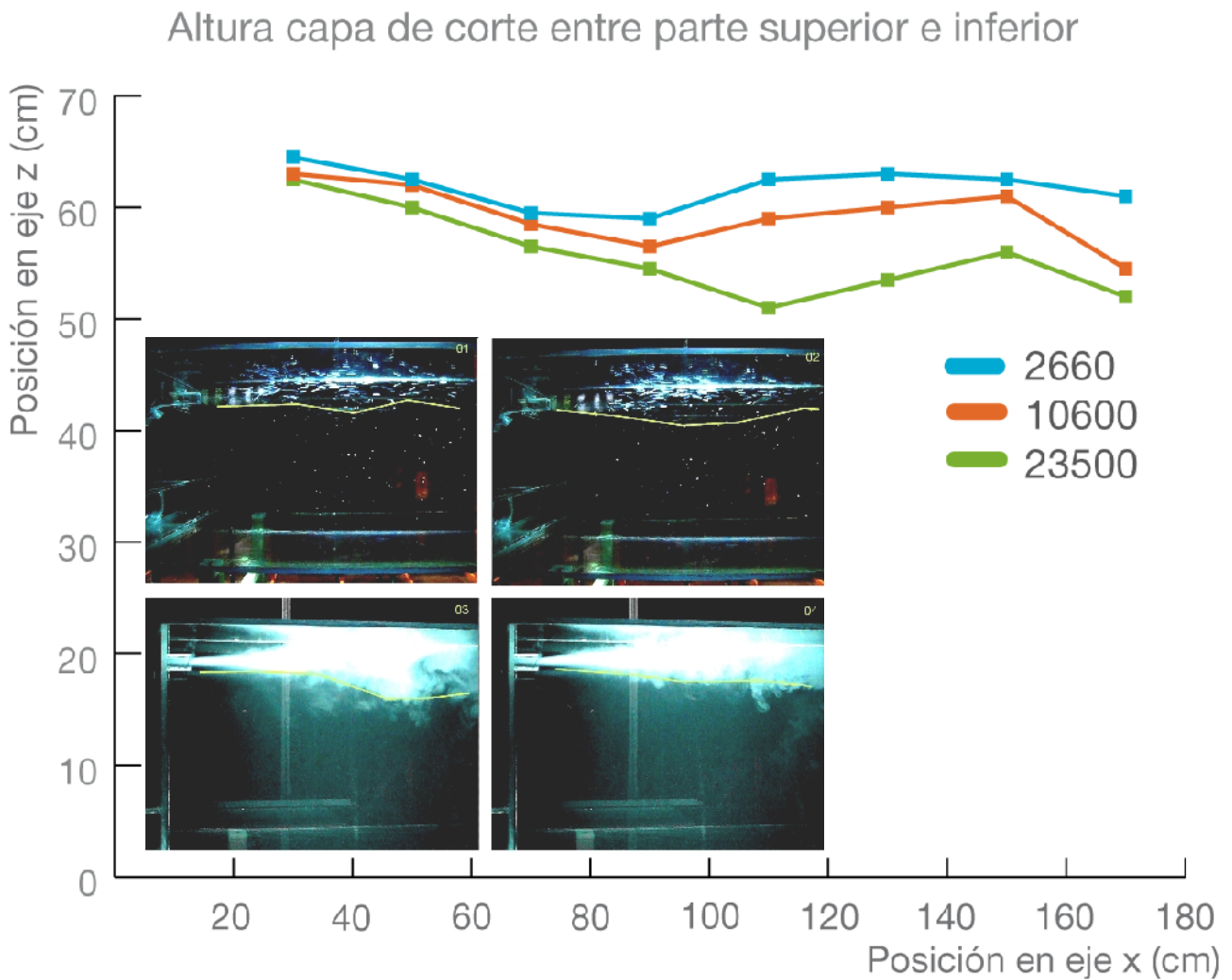


Figura 17: Altura de corte entre capas superior e inferior

Como se ve en la gráfica el grosor de la capa depende del valor de Reynolds y esta es mayor para valores mayores de Reynolds. El grosor de la capa no supera en ningún momento un valor superior a 18cm lo que significa que la capa superior ocupa aproximadamente un cuarto de la altura del modelo.

Este resultado nos indica que en las habitaciones con sistemas de ventilación por chorro, la zona que este por encima del 75% de la altura total de la habitación no debe ser ocupada para evitar las corrientes altas que se producen en la zona de chorro.

### 2.3.4.- Medidas del campo de velocidades en el eje vertical.

En un eje vertical a distancia equidistante de las paredes laterales y 35 cm de la entrada de aire se han realizado una series de medidas de la velocidad a distintas alturas. El valor de Reynolds con el cual se han realizado estas medidas es de 2700 y el caudal 0,855 l/s y la velocidad a la entrada es de 1,94 m/s pero a esta distancia el chorro se a expandido en forma de cono y la velocidad de punta es mucho menor.

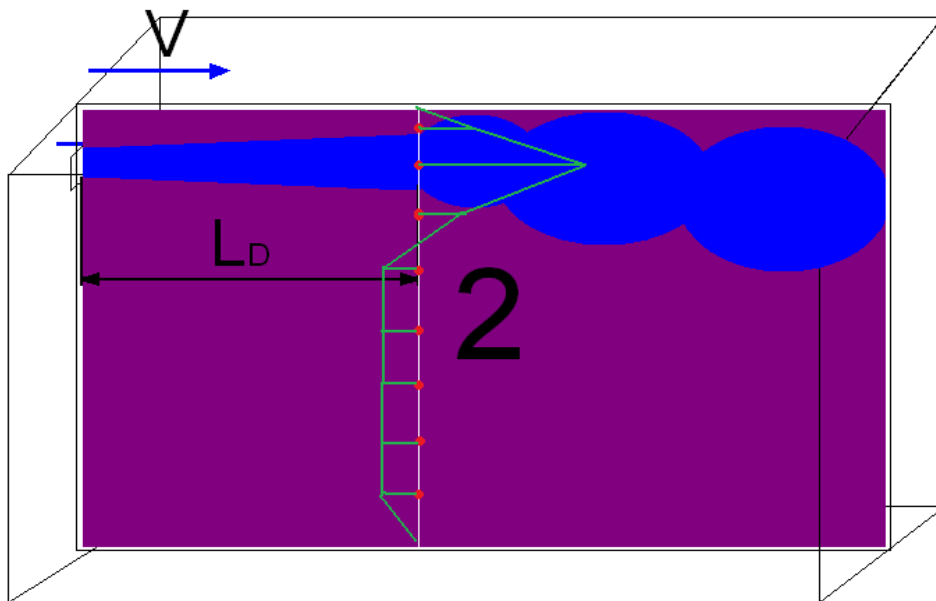


Figura 18: Esquema de la medida de velocidad en el eje vertical

Se han realizado tres medidas de cada valor para poder comparar entre varias medidas y ver la variabilidad de la medida.

En la gráfica podemos ver que la velocidad promedio en la zona superior es positiva y por debajo de la zona de corte negativa. La curva se ha dibujado a través de la interpretación de los resultados. La interpolación de los datos da lugar a una curva difícil de entender debido a la variabilidad de los resultados.

El contraflujo que se desplaza por debajo de la capa del chorro tiene su máximo a la altura de 20 cm desde el fondo. En Etheridge and Sandberg 1996 página 402 se muestran unos datos de medidas similares realizadas con anemómetros térmicos solo en las zonas superior e inferior. En este experimento se han tomado medidas en todo el campo de velocidades y se han realizado con un equipo que no afecta al movimiento del aire. De este modo hemos completado un experimento que se planteo hace 14 años y que la técnica actual ha permitido terminar.

### Campo de velocidades horizontales en el eje vertical

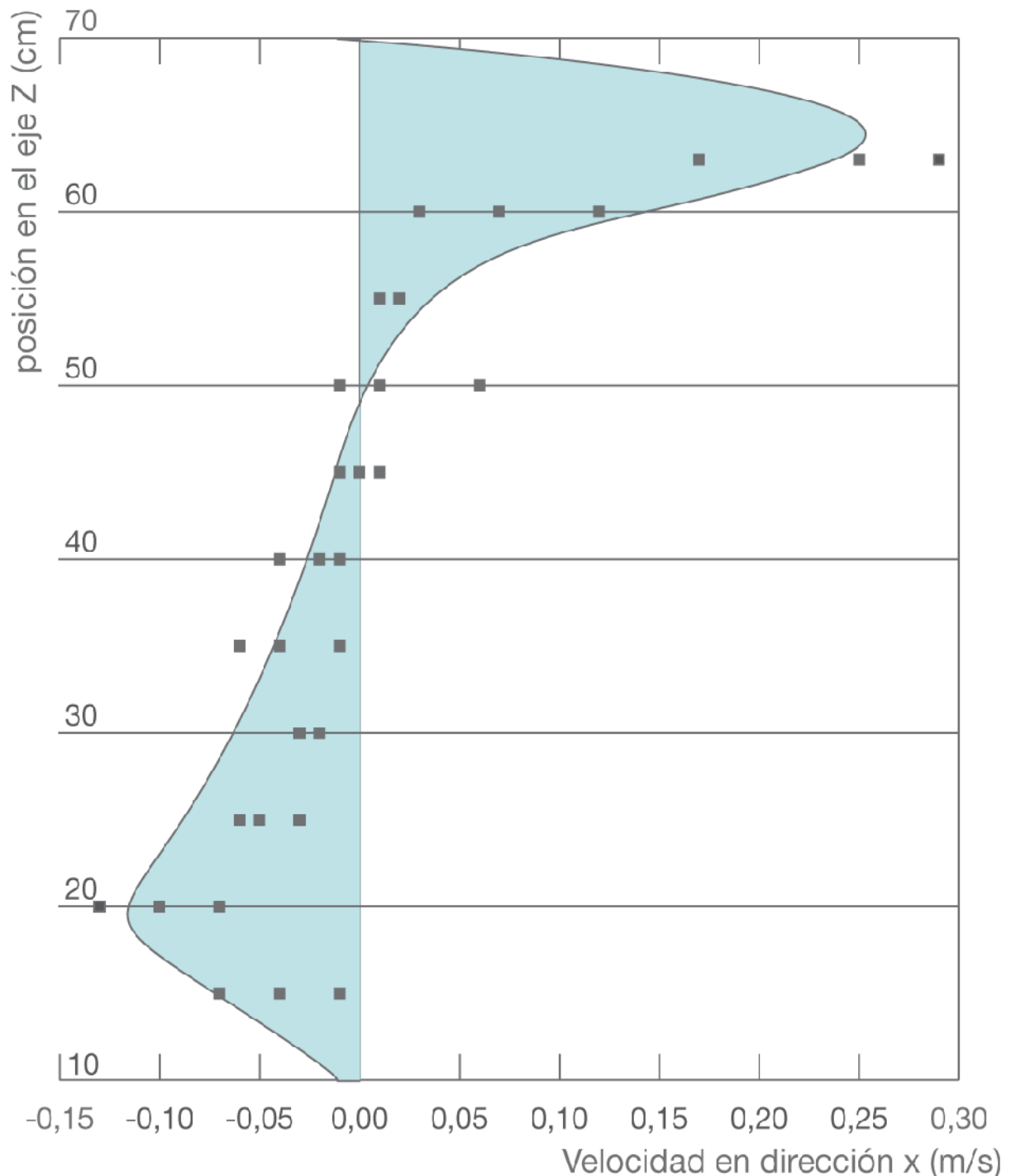


Figura 19: Gráfico velocidad en eje X sobre eje vertical

Se han realizado medidas en la dirección vertical del eje para ese mismo caso con el anemómetro Láser Doppler los resultados son muy dispersos y revelan la característica de aleatoriedad de algunas zonas del modelo en las cuales la capa superior y la inferior se cruzan y cambian de posición a lo largo del tiempo.

A pesar de la variación en la dirección vertical en las medidas se identifica que el promedio de las muestras es positivo. La capa superior que tiene una velocidad transversal diferente de la inferior, genera un efecto de absorción similar al efecto Venturi en tubos.

### Campo de velocidades verticales en el eje vertical

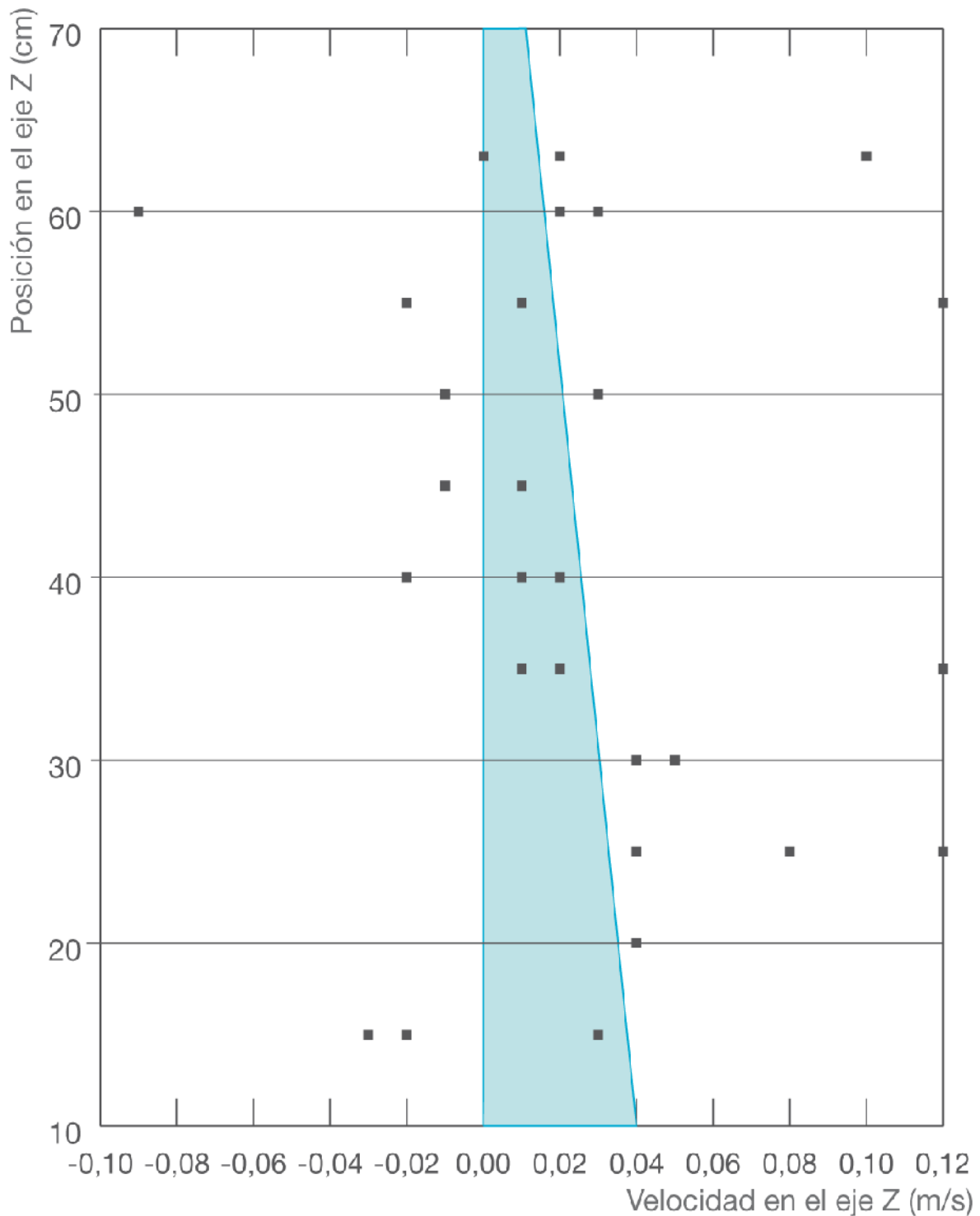


Figura 20: Campo de velocidades dirección Z en eje vertical

## 2.4.- Movimiento del aire con chorro en ángulo

Cuando el chorro sale en ángulo y golpea con la cara lateral de la caja, éste se dispersa de forma radial en la superficie sobre la que golpea pero general un movimiento en el modelo circular según el eje vertical.

Con un ángulo de 45° se han realizado varios experimentos para determinar hacia dónde se desplaza el flujo entrante y cómo afecta la forma del modelo al movimiento del aire.

### 2.4.1.- Imágenes de colisión con pared lateral

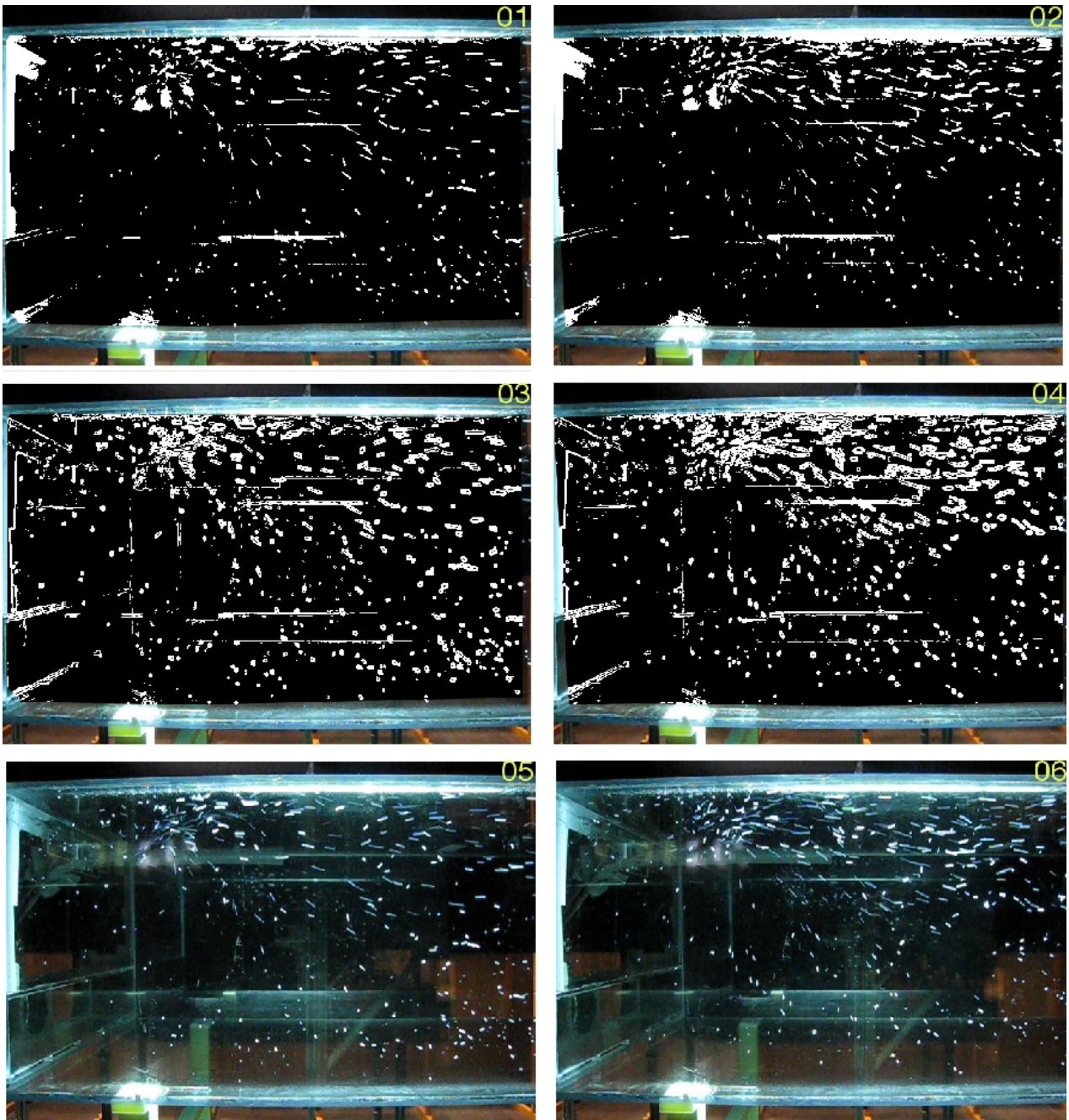


Figura 21: Serie de imágenes de colisión lateral de chorro

En esta serie de imágenes podemos ver en la cara 1 (cara de colisión del chorro en ángulo) las trazas que dejan las pompas de jabón al ser fotografiadas. Los vectores que se dibujan se deben a que durante la exposición de la fotografía las pompas cambian de posición trazando líneas que son su variación de posición a lo largo del tiempo de exposición de foto.

Esta técnica puede ser utilizada para medir la velocidad en puntos conociendo el tiempo de exposición de la foto y midiendo sobre la foto la longitud de los vectores.

Se estudio la utilización de esta técnica para la medida de la velocidad pero finalmente se opto por medir con el equipo Láser Doppler.

Las fotos realizadas con pompas de jabón igualmente sirven para ver en ellas la diferencia de velocidad en diferentes zonas del modelo.

## 2.4.2.- Videos chorro en ángulo

En los siguientes videos se puede ver el movimiento del aire para las distintas configuraciones. En todas el aire gira entorno a un eje vertical. El caso con el modelo más corto donde el chorro golpea la esquina es aquél en el que el movimiento se percibe menos marcado.

Además se puede ver que para valores altos de Reynolds la colisión precipitada contra la pared lateral produce corrientes fuertes cerca de la pared de choque a la altura de ocupación. Este efecto produce corrientes fuertes que pueden provocar discomfort e incluso problemas de salud.

Ref. Number:	Cara	Caudal (l/s)	Longitud	Ángulo	Humo	Burbujas	Reynolds
333	1	1,7	180	45	SI		5400
337	1	3,4	180	45	SI		10600
338	1	7,6	180	45	SI		23500
340	1	1,7	90	45	SI		5400
343	1	3,4	90	45	SI		10600
346	1	7,6	90	45	SI		23500
347	1	7,6	90	45	SI		23500
1299	1	0,85	45	45	SI		2600
1300	1	1,7	45	45	SI		5300
1301	1	3,8	45	45	SI		11800
363	1	1,7	90	33	SI		5400
368	1	3,4	90	33	SI		10600
369	1	7,6	90	33	SI		23500
370	1	7,6	90	33	SI		23500

1290	1	0,86	180	45		SI	2600
1291	1	1,71	180	45		SI	5300
1292	1	3,8	180	45		SI	11800
549	1	7,6	90	45		SI	23500
577	1	7,6	45	45		SI	23500
574	1	3,4	45	45		SI	10600
571	1	1,71	45	45		SI	5300

Tabla 5: Videos movimiento aire en cara 1 para distintos ángulos de entrada

En los videos se puede observar otro efecto curioso. En la zona que queda por detrás de la zona de impacto se produce una zona de estancamiento donde el aire queda recluido entre las paredes físicas y la que produce un chorro de aire

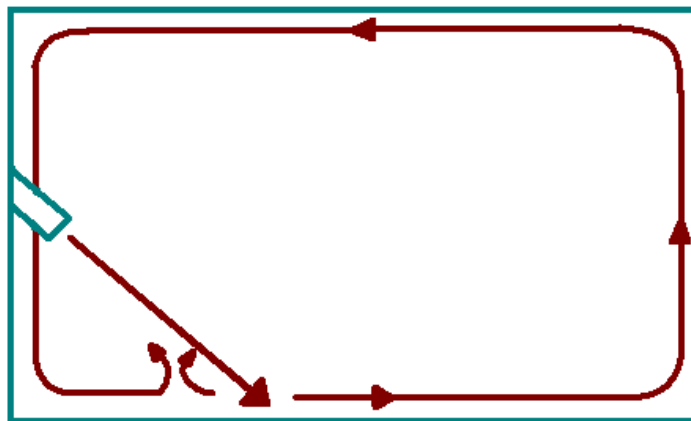


Figura 22: Representación del movimiento del aire cuando el chorro incide inclinado sobre la superficie lateral

Con las visualizaciones con burbujas se ha buscado detectar en que zonas del impacto la velocidad es mayor. Las zonas en que la velocidad del aire son mayores serán aquellas en que las imágenes de la cámara se vean estelas mayores de las burbujas tal y como se describe en el apéndice sobre medidas de velocidad con PSV.

Con el chorro a  $45^\circ$  las zonas más interesantes para estudiar son las más cercanas a la zona de impacto porque son donde se producen las mayores velocidades. La dirección de las partículas en el punto de impacto son dispersas aunque se orientan de modo horizontal hacia la derecha caracterizando el movimiento rotatorio del fluido.



### 2.4.3.- Medidas cercanas a la zona de colisión.

Cerca de la zona de colisión se han realizado medidas de la velocidad con el equipo Láser Doppler. Con un ángulo de 45° se han realizado una serie de medidas que han estado limitadas por la geometría del modelo, los ángulos de incidencia del láser y las normas de seguridad para la utilización de este aparato.

La distancia mínima a la que se ha podido realizar medidas es de 3 cm a la pared interior del modelo. En la medida abajo expuesta se ha utilizado una distancia a la pared de 5 cm.

Las medidas se han realizado con el compresor funcionando a 2,7 l/s. En el apéndice de Reynolds, escala y análisis adimensional se explica la relación existente entre el modelo a escala y una hipotética habitación real 5 veces mayor en altura y que mantenga la proporción.

En ese caso el caudal necesario será cinco veces mayor manteniendo el número de Reynolds. Las renovaciones en la habitación según estas condiciones serán 25 veces menores que en el modelo.

De esta forma para este caudal de 2,7 l/s que equivale a 9,72 m<sup>3</sup>/h y 15,4 renovaciones hora, en el modelo a escala real tendremos un caudal de 13,5 l/s, 3,75 m<sup>3</sup>/h y 0,62 renovaciones a la hora. El Código Técnico de la Edificación (CTE) dimensiona un caudal mínimo 10 l/s para una habitación de dos personas y de 12l/s para una sala de estar de 4 personas.

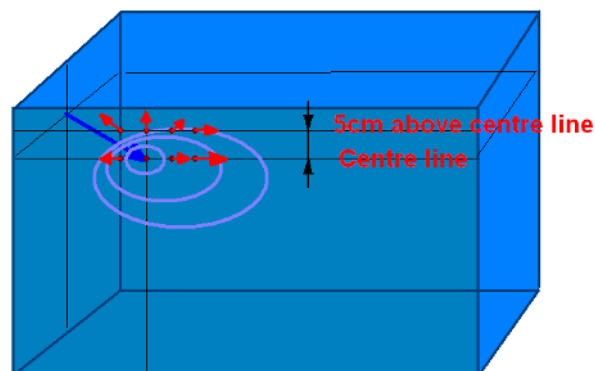


Figura 23: Esquema de medida velocidad en zona colisión

Con la configuración arriba explicada, 5 cm de la pared lateral, chorro en ángulo de 45° y caudal de 2,7 l/s, se ha medido la velocidad del aire en una línea horizontal paralela a la pared a la altura en que choca en el chorro con más fuerza.

En los videos 333, 337 y 338 podemos ver el movimiento del aire que se refleja en esta gráfica con valores del Láser Doppler.

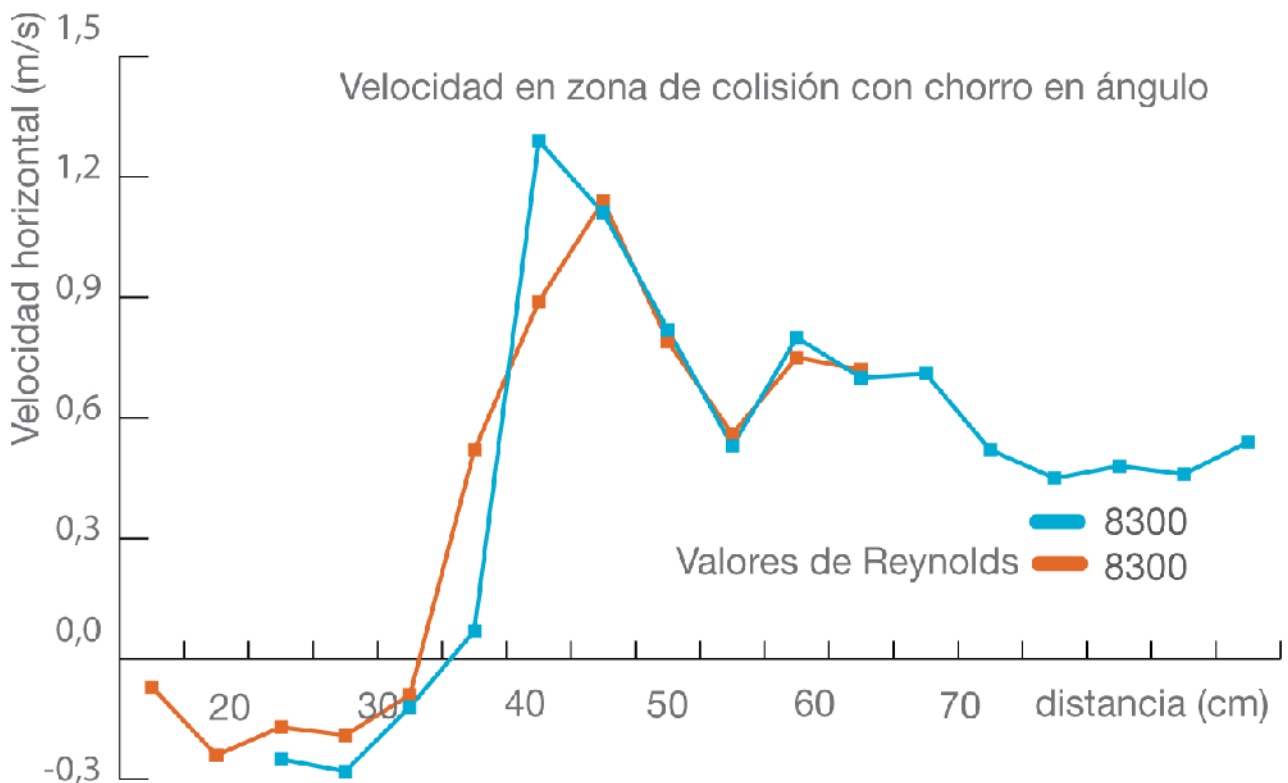
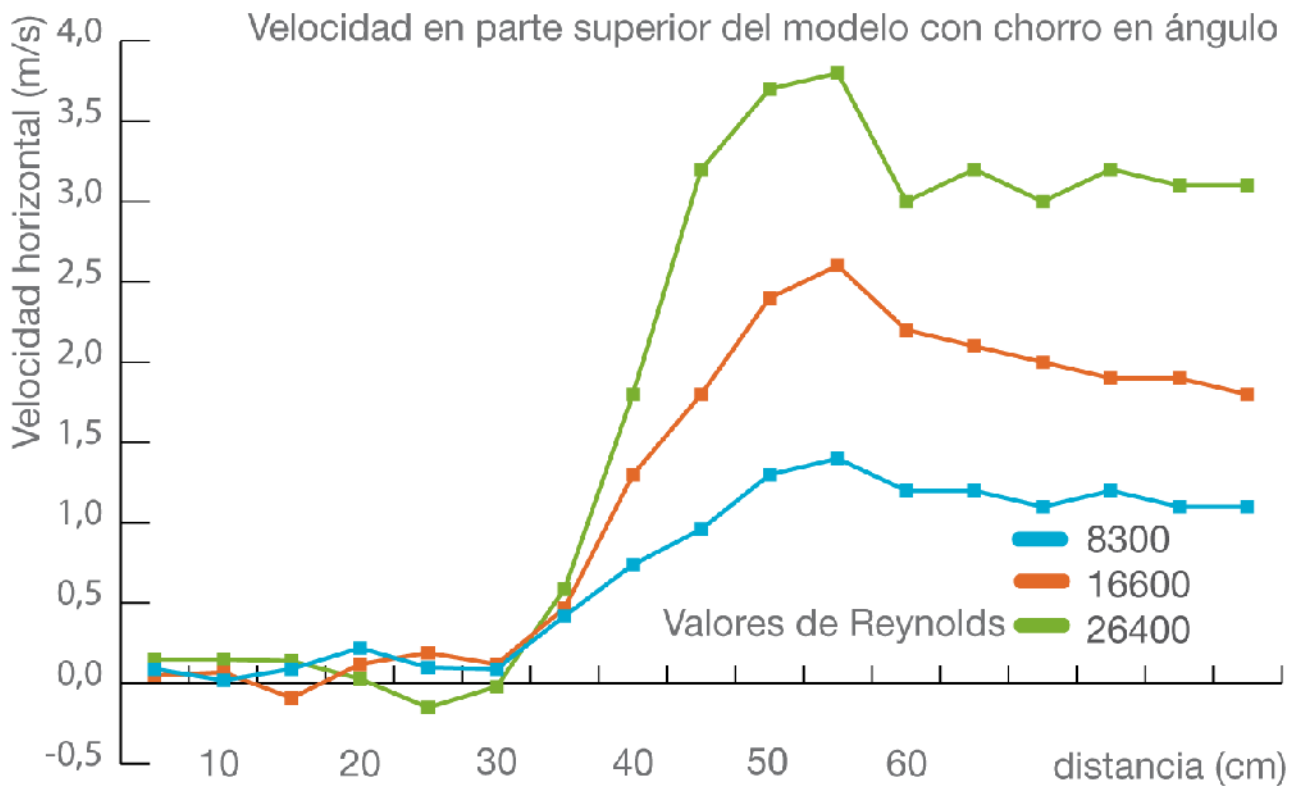


Figura 24 y 25: Medidas de velocidad dirección X en eje X a la altura de impacto y 5 cm por encima.

En la gráfica superior se muestra la velocidad del aire en la dirección horizontal en la línea horizontal cercana a la pared de colisión a una altura superior a la de colisión, donde las medidas con el Láser Doppler son lo más precisas posibles.

En la gráfica inferior se muestra la velocidad del aire a la altura a la que el chorro golpea. Se ve que la zona de máxima velocidad está a 30 cm. El chorro choca a 35 cm pero como la medida está alejada 5 cm de la pared la zona de máxima velocidad en esta posición es en 30. Por debajo de ese punto la velocidad es negativa porque parte del chorro va en dirección de retorno. La gran mayoría del flujo va hacia la derecha y la pérdida de velocidad es progresiva.

Según las medidas de velocidad la máxima velocidad hacia la izquierda es de 0,3 m/s mientras que en la zona opuesta la velocidad máxima solo en una dirección es de 1,3 m/s.

Aplicando el coeficiente de escala este modelo daría ráfagas de viento en la zona ocupada cerca de la pared de  $1,3 \text{ m/s} / 5 = 0,3 \text{ m/s}$

#### **2.4.2.- Campo de medidas cercanas a la pared.**

Cerca de la pared se producen una gran cantidad de fenómenos interesantes por la interferencia entre el chorro y la superficie. La dirección y el módulo de la velocidad cambia desde la superficie donde según las ecuaciones de continuidad de Navier Stokes la velocidad es cero y la zona del chorro donde la velocidad viene marcada por la inercia del chorro.

Los resultados obtenidos son curiosos cuando menos pues el perfil que aparece es realmente singular. Las mediciones se repitieron y se obtuvieron los mismos resultados.

No es posible medir la velocidad del aire más cerca de 1 cm de la pared lateral porque debido a las limitaciones del modelo acercar más el Láser a la zona produce difracciones con la zona inferior del modelo afectando a la medida.

Las medidas se han realizado a 20 y a 30 cm de la pared de entrada y cerca de la pared lateral donde golpea el chorro.

### Campo de velocidades cercano a superficie interactuante con el chorro

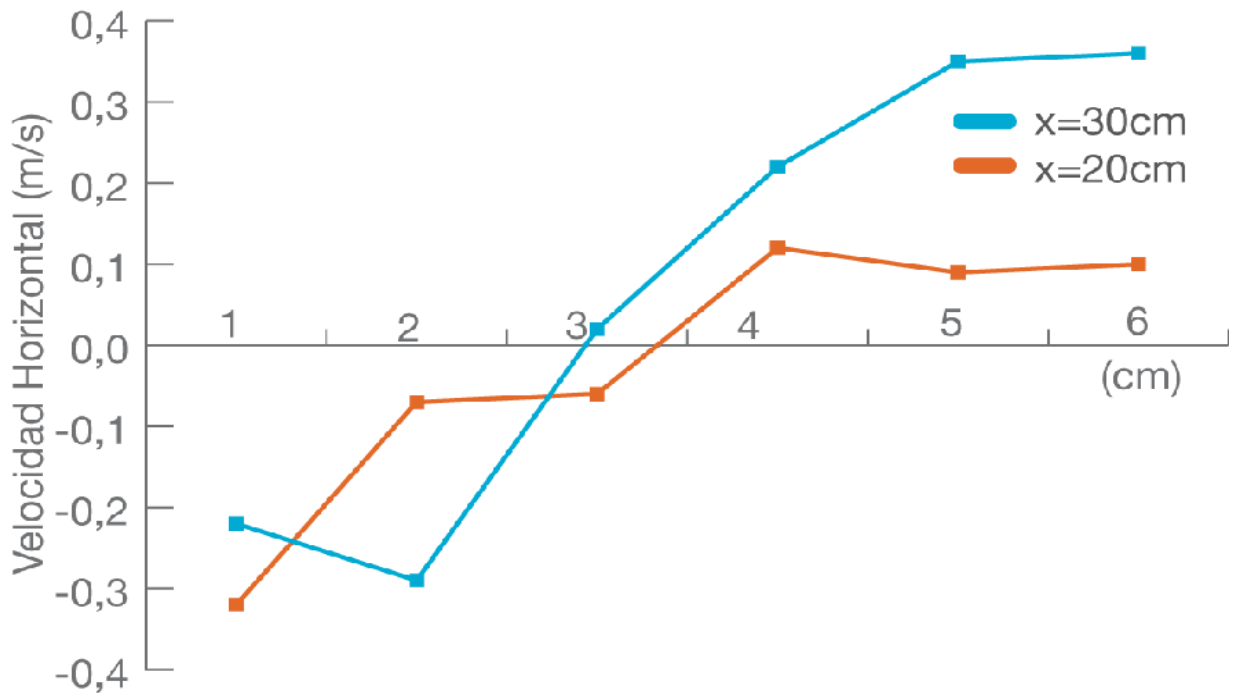


Figura 26: Campo de velocidades dirección X, en eje Y cercano a zona colisión

Según las medidas se producen dos corrientes de espesor mínimo y en direcciones contrarias en la zona cercana a la pared. En la zona cercana a la pared inferior a 3 cm los valores de velocidad siguen dirección opuesta a la del movimiento principal. Por encima de este espesor la velocidad aumenta y por encima de los 5cm la velocidad del fluido corresponde con la esperada.

---

# 3 Conclusiones

---

## Conclusiones del estudio.

El movimiento del aire en una habitación cuya ventilación se basa en la mezcla de aire por chorro depende en gran medida de la orientación y velocidad inicial del chorro de aire.

La dirección de este puede producir colisiones laterales con las paredes de la habitación generando corrientes circulares que crean zonas de estancamiento y corrientes fuertes en la zona ocupada.

La velocidad con la que sale el chorro afecta a la capacidad de este de mezclarse con el aire de la habitación. Según los experimentos el aire se mezclará mejor cuanto mayor sea la velocidad de este pero el cambio brusco de capacidad de mezcla se produce cuando el valor de Reynolds de este chorro es superior a 2600. A partir de este punto un aumento significativo de la velocidad produce un aumento pequeño de la capacidad de mezcla.

Por tanto los sistemas de ventilación de este tipo deben colisionar perpendicularmente con la superficie

El chorro debe tener un valor de Reynolds mayor de 2600 para producir una buena mezcla. Este valor de Reynolds está relacionado con la anchura de la boca de entrada y la velocidad de entrada del aire. Si la velocidad del aire es muy alta tendremos unas grandes pérdidas de carga en el transporte y en la mezcla y por tanto aumentará el consumo de energía en el sistema de ventilación el cuál es uno de los mayores consumidores de energía del edificio.

Puesto que el caudal viene definido para mantener las condiciones de térmicas, sanitarias y de confort, la entrada del aire, factor libre para ser modificado, debe diseñarse en la medida de lo posible para obtener chorros de ventilación de valor 2600 o superior pero nunca muy elevados porque incurrirán en un consumo excesivo de energía para ventilación puesto que mayor Reynolds se consigue con

entradas más estrechas y por tanto mayores caídas de presión en el proceso.

## Conclusiones específicas.

### (1) LONGITUD DE DESARROLLO DEL CHORRO

La distancia a la que pasa el flujo de laminar a turbulento marca la zona en la que el aire de entrada se mezcla con el de la habitación. Cuánto antes comience esta zona más efectiva será la mezcla.

La distancia está relacionada con el valor de Reynolds y es especialmente larga para valores inferiores a 1000, lineal desde este punto hasta 5000 y se mantiene a una distancia reducida para valores superiores.

Existe una fuerte variación de la velocidad en el eje en el primer tramo de éste, sobre todo para Reynolds bajos. Esta variación es más lineal para valores mayores de Reynolds.

La turbulencia del eje es mínima en la zona cercana a la boquilla para todos los casos incluidos los de Reynolds más altos debido a que el chorro para todos los casos aún se haya en zona laminar. Esto demuestra que para valores altos de Reynolds la distancia de comienzo a zona de expansión tiende a un valor positivo, distinto de cero, que se estima que es  $2-2,5 D$  ( $D$  diámetro de la boquilla).

### (2) CHORRO EN CONO A CHORRO PARED

Desde la distancia de comienzo de expansión hasta tocar las paredes y verse limitado por éstas, el chorro se abre en un ángulo de  $20^{\circ}$ - $22^{\circ}$  hacia cada lado desde el punto en que pasa de chorro recto a chorro en cono. La apertura de este cono es independiente del valor de Reynolds del chorro y no se puede actuar para hacer que sea más amplio y se abra antes.

Cuando el chorro pasa a ser chorro pared avanza en bloque ocupando todo el ancho de la habitación hasta llegar al fondo y bajar en bloque. Si no lo ha conseguido el chorro al llegar a la pared genera recirculaciones en la zona superior del modelo.

### (3) MOVIMIENTO DEL AIRE EN EL PLANO MEDIO VERTICAL

La velocidad del aire en este plano y los videos describen el movimiento del aire en la habitación y el efecto que se produce por

el cual se crean dos capas superior e inferior con velocidades horizontales contrarias y que corresponden a la ida y al retorno del aire introducido. Las velocidades en la capa superior son mayores que las de la capa inferior, pero las mayores velocidades de la capa inferior se producen en la zona cercana al suelo. Esto puede producir corrientes fuertes en la zona inferior creando una asimetría térmica en los ocupantes.

El caudal de entrada afecta el espesor de la zona superior en la cual la velocidad es mayor. El espesor de esta capa y la altura a la que llega debe estar controlado para evitar fuertes corrientes en la zona ocupada.

La velocidad del aire en la dirección vertical es positiva, esto se debe a que la capa superior genera un efecto de absorción sobre la inferior parecido al que sucede en el efecto Venturi.

#### (4) MOVIMIENTO DEL AIRE CON CHORRO EN ÁNGULO

Cuando la configuración del modelo produce una incidencia del chorro contra una pared lateral en ángulo, genera un movimiento rotatorio con eje vertical que domina el movimiento del aire en la habitación.

Se producen zonas de estancamiento en la esquina tras el chorro y la zona de incidencia, estas zonas de estancamiento puede crear una zona donde el aire no se renueva y por tanto baje la calidad de este en la habitación.

El chorro desde la zona de expansión, se extiende en dirección radial generando corrientes altas en la zona ocupada puesto que cambia de dirección antes de pasar a ser un chorro en cono abierto que reduzca la velocidad media del chorro. Estas corrientes de alta velocidad producen discomfort y pueden afectar a la salud.

## Posibilidades de continuación con la línea de investigación y el proyecto.

Este proyecto es uno más dentro de una línea de investigación que pretende estudiar el movimiento del aire en habitaciones ventiladas a partir de modelos a escala donde se estudia el efecto de chorros de aire con las superficies de las habitaciones. Después de terminar este proyecto, yo continué con una serie de experimentos en ventilación basados en un sistema distinto de ventilación por mezcla que aprovecha las corrientes verticales convectivas para este mismo centro de investigación como investigador asalariado. Las líneas de investigación en este campo son continuas en este centro de investigación y se han realizado más estudios que continúan trabajando sobre modelos a escala de habitaciones.

## Incidencias en el desarrollo del proyecto.

En el desarrollo del proyecto se sucedieron varias incidencias importantes que el no haberlas solucionado habría afectado al cumplimiento de los objetivos planeados inicialmente pero que al final todas se pudieron solucionar gracias al apoyo del resto de compañeros del centro de investigación.

- Imposibilidad de medir caudales bajos con el equipo de medida diseñado a priori. Este problema se solucionó rápidamente puesto que el sistema se podía calibrar para medidas inferiores cambiando una de las piezas.
- Mal funcionamiento de la videocámara entregada. Se sustituyó por cámara digital que derivó en una mayor calidad de la imagen y la posibilidad de hacer videos más fácilmente.
- No funcionamiento del equipo de medida pensado inicialmente por PSV con imágenes de exposición larga. Se solucionó cambiando el equipo a emplear por otro más complejo, "Laser Doppler Anemometer". Este cambio requirió dedicar un tiempo extra para el estudio de este sistema de medida complejo del cual había poca experiencia en el centro de investigación.
- Problemas con el uso del equipo "Láser Doppler a través de la pared de transparente que dificultaba las medidas. Se solucionó dedicando más tiempo al uso del aparato y calibrando las variables de muestreo y potencia para lograr medidas.



## Tiempo empleado, opiniones personales y experiencia obtenida.

El tiempo empleado en este proyecto ha sido de 6 meses a jornada completa, durante este periodo se dedicó tiempo a leer e investigar pero desde el principio la mayor parte del tiempo se dedico al trabajo en el laboratorio realizando pruebas y videos. Pasados dos meses de pruebas y estudio de otros proyectos decidí una serie de experimentos, que podía describir el movimiento del aire en la habitación. Estos experimentos y medidas a realizar fueron revisados por el Dr Mats Sandberg que tutorizó mi proyecto y me animó a realizarlos para ver el resultado de todos ellos. También sugirió la realización de medidas cercanas a la superficie puesto que el equipo de medida permitía realizar estas medidas sin afectar al movimiento del aire.

Mientras se realizaban los experimentos y las medidas se fue redactando la versión original de este proyecto en inglés y publicada en DIVA (Academic Archive on-line) que puede ser comparada con esta.

Para la realización de esta versión, para el P.F.C. de Ingeniería Industrial de la Universidad de Zaragoza, se han reescrito y editado los textos buscando la forma exigida por la normativa de PFC de 2009. Se han editado las imágenes originales y se han aplicado filtros de color. Esta parte del proyecto la edición de las imágenes y la aplicación de filtros, era una de las posibilidades de expansión del proyecto que no se pudo aplicar por la limitación de alcance del proyecto. En esta versión existen imágenes editadas con GIMP que permiten una mejor visualización para explicar el movimiento del aire.

Este proyecto ha sido una gran experiencia para mi y me ha permitido trabajar en un tema concreto durante un tiempo largo y explorar las posibilidades de un proyecto. Profesionalmente ha sido un gran paso porque he aprendido a hacer ingeniería. Se ha planteado un problema desde el inicio (estudio del movimiento del aire en una habitación) y se ha llegado a la ejecución material con la realización de los experimentos y la materialización de las conclusiones.



---

# 4 Bibliografía

---

- "Building ventilation Theory and measurements" David Etheridge, Mats Sandberg 1996
- "Practical Applications of Whole Field Measuring Methods in Studying Air Distribution in Rooms" Mats Sandberg, Tomo Kobayashi, Elisabet Linden, Svante Lindström.
- "Experimental Methods in Ventilation" Mats Sandberg, Hans Lundström, O. Nilsson, H. Stymne
- "Whole field Measuring Methods in Ventilated Rooms" Mats Sandberg,
- "Experimental Analysis of Low Reynolds Free Jets. Evolution among the Jet Centerline and Reynolds Effects" Valentino Todde, Pier Giorgio Spazzini, Mats Sandberg.
- "The Measurement and Simulation of Indoor Air Flow" written by Marcel Loomans
- "Thermal Comfort course 08/09 Energy System Master" Taghi Karimipناه
- "Energy Utilization course 08/09 Energy System Master" Taghi Karimipناه
- "Dantec measurements" web page and documentation from FlowLite.



---

# ANEXO A

## Teoría de fluidos, distintas aproximaciones para estudiar el movimiento del aire, teoría de sistemas de ventilación en habitaciones:

---

### Literature

To speak of the vent and explain phenomena that occur when a jet of air interacts with the walls of a room we have to start explaining the equations that define the moving of a fluid (Navier Stokes) and knowledge about the movement of fluids. To find this literature I will use "The Building Ventilation: Theory and Measurement" from Mats Sandberg and David Etheridge and "Turbulent jets in confined spaces, Application in mixing ventilation and Numerical studies" from Taghi Karimipناه. To understand the laser Doppler system I have used the information from "Sistema Láser de medida de velocidad por efecto Doppler de bajo coste para aplicaciones industriales e hidrodinámicas, Doctoral Thesis"(Laser system of velocity measures by low cost Laser Doppler for Industrial and hydrodynamics uses) from David Garcia I Vizcaino. As complementary information I have used the papers from Taghi Karimipناه courses of "Fluid dynamics" and "Thermal comfort and Indoor climate".

We need to define some parameters to limit our study one is the use of isothermal jets. The use of jets with a temperature equal to the room simplifies the study of ventilation to cases in which the air enters the room has not been previously heated or cooled. Also we have to simplify the cases where the room air is heated due to internal sources of heat. When this phenomenon appears, drafts whose nature is very different from the jets may change full configuration of the ventilation.

## A.1.- Navier Stokes equation

Navier Stokes equation comes from a derivation of Newtonian second law or the conservation of momentum. They define the general law that imperes over any fluid. There exist a lot of variants applied to the case with incompressible fluids or static fluids but this is the general case for an arbitrary volume:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbb{T} + \mathbf{f},$$

$\mathbf{v}$ : Flow velocity

$\rho$  : Fluid density

$p$ : pressure

$\nabla \cdot \mathbb{T}$ : Deviatoric stress tensor

$\mathbf{f}$ : Body forces per unit volume acting

The left side of the equation contents the acceleration of the volume as a change of the velocity and an increase of the convective velocities. The right side is a summa of pressure stress and body forces that affects the volume.

### A.1.1.- Compressible flow of Newtonian fluids

The equations of Navier Stokes can be very simplified if we assume that we are working with an incompressible fluid. The air introduced in a room is a compressible substance in which the pressures changes can affect the density. We work with compressible fluids as air but in a range where the viscosity is assumed constant so the equations get like that.

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \left( \frac{1}{3}\mu + \mu^v \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \mathbf{f}$$

$\mu$ : Viscosity

$\mu^v$ : Second viscosity coefficient.

## A.1.2.- Cylindrical coordinates

As we will use a jet seems logic to use a cylindrical system of coordinates to describe the Navier Stokes equations. Cylindrical equations comes from the change of x and y to r and  $\Theta$ .

$$\begin{aligned}
 r: \quad \rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\phi^2}{r} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right] + \rho g_r \\
 \phi: \quad \rho \left( \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_\phi}{\partial z} + \frac{u_r u_\phi}{r} \right) &= -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} - \frac{u_\phi}{r^2} \right] + \rho g_\phi \\
 z: \quad \rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z
 \end{aligned}$$

## A.1.3.- Equations of free jet in a still ambient.

Taghi Karimipناه describes this equation for axisymmetric jet in “Turbulent jets in confined spaces, Application in mixing ventilation Experimental and Numerical Studies”. This simplification introduces the conditions of an axisymmetric jet as for example neglect gravitate forces and the variation in the velocity is independent of  $\theta$ .

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial x} (\overline{U}^2 + \overline{u'^2}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r (\overline{UV}_r + \overline{u'v'_r}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \nu [\nabla^2 \overline{U}]_x \\
 \frac{\partial}{\partial x} (\overline{UV}_r + \overline{u'v'_r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r (\overline{V}_r^2 + \overline{v'_r^2}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial r} + \nu [\nabla^2 \overline{U}]_r \\
 \frac{\partial}{\partial x} (\overline{Ur}) + \frac{\partial}{\partial r} (\overline{V}_r r) &= 0.
 \end{aligned}$$

Solving these equations we can obtain the movement of the air in an axisymmetric jet.

## A.2.- Jets

### A.2.1- Isothermal Jets

Isothermal jets are the jets at a certain temperature that are introduced into an environment at the same temperature than the jet. We will work with isothermal jet because we will not use any air heater or cooler and the room has no heat sources so the model temperature will be the outside room temperature and the air jet temperature. The isothermal jet has the property of getting at a constant height if there are no other forces that makes it move up or down.



*Figura 27: Isothermal jet very large for low velocity.*

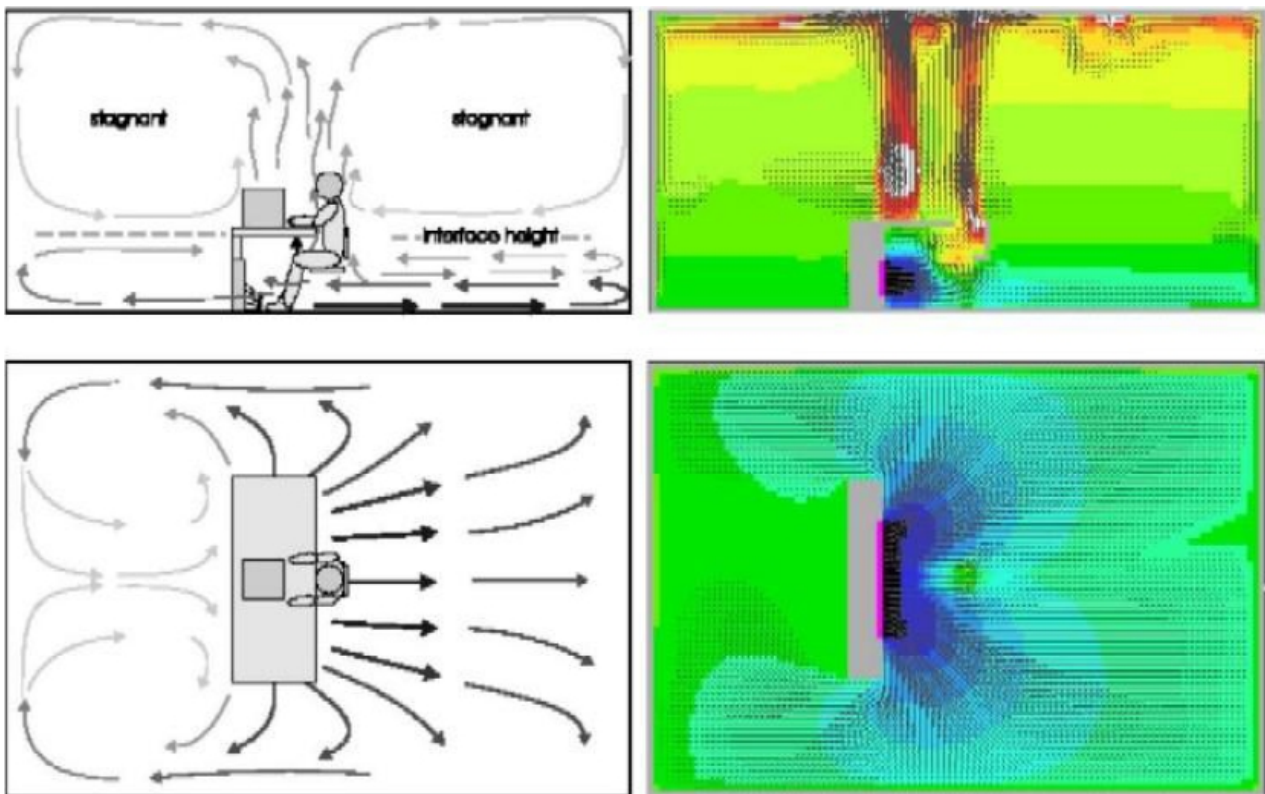
### A.2.2- Non isothermal jets

If we introduce a jet with a temperature different than the room the jet will have a natural tendency to go up or down. If the jet is cold the air will quickly go down impinging with the floor instead of beating with a wall. This cold jet moves the dust from the floor and produces more polluted air. If the jet is warm the jet will have a natural tendency to be on the top and we will have a stratified air temperature on the air of the room. This stratification produces un-satisfaction in the person that feels hot on the head and cold on the feet. Also the ventilation will be less efficient. The effect of a non isothermal jet is totally different when the system that we are using is a hybrid system in which the jet is designed to help the buoyant forces. In that case the jet for example impinges on the floor and the jet momentum helps the buoyant forces.



### A.3.- Buoyant flows

Buoyant flows are the flows that appear between layers of air at different densities. Fluids with low density tend to overcome those on denser. In an environment of constant pressure the air density is related with the temperature so a change on the temperature caused by a heat source produce a density change on this. So if there is a heat source in a room the air that takes the heat from that source will have a rise in its temperature that will make it go up in a flow called plume.



Flow features of the displacement ventilation flow pattern in the central plane of the room and at a horizontal plane at ~0.1m above floor level.

*Figura 28: Scheme room air movement by buoyant flow*

## A.4.- Ventilation in rooms

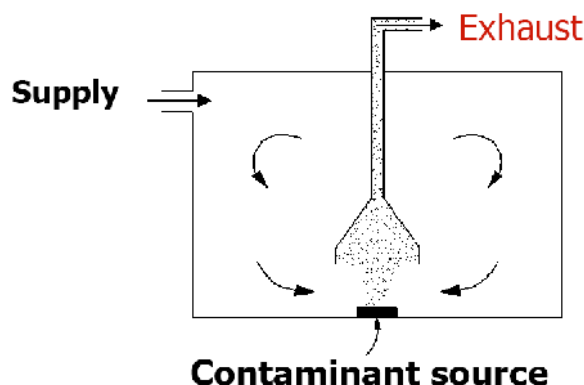
To talk about ventilation we must begin by mentioning and explaining the basic types of ventilation that exist. If we talk about air distribution systems we can say that we have five different distribution systems. They are divided cause of its source of movement, their efficiency, or the use that it is given to each system.

- Local Exhaust Ventilation Systems
- Piston Flow Systems
- Mixing Flow Systems
- Displacement Systems
- Hybrid Systems.

This model of study uses a mixing ventilation system with a supply source that produces a jet that moves the air in the room

### A.4.1.- Local Exhaust

Local exhaust systems part with the principle of reducing the pollutants acting on the source before they mixed with all the air in the room. It uses to work with an extractor that absorbs the air from a bell close to the source. It is used in process where toxic pollutants are produced. For example in chemical process or mechanical process that produce in the source a lot particles or toxic substances. Also this ventilation is the one that is used in the kitchen of the house to avoid the cooking smells at home. This systems use to work in parallel with others that take care of the general ventilation.



### A.4.2.- Piston Flow system

Piston flow systems works with a unidirectional flow of air that comes from the inlet cross all the room and is being extracted in the outlet. Clean rooms and spaces where is needed a very high efficient ventilation use this kind of ventilation. They work with low supply velocity to avoid turbulence because the air movement must be unidirectional. Also it must be care that buoyant flows do not interfere with the unidirectional flow.

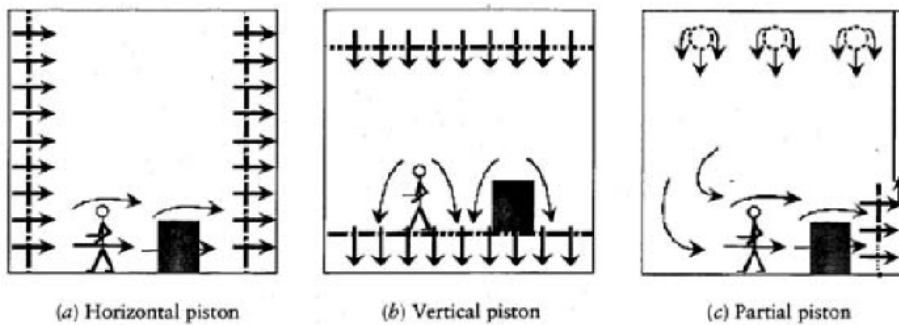
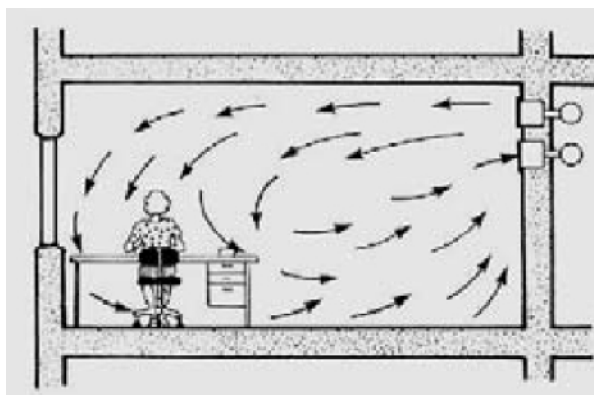


Figura 30 : Piston ventilation system. From Thermal comfort by Taghi Karimipناه

### A.4.3 Mixing Flow systems

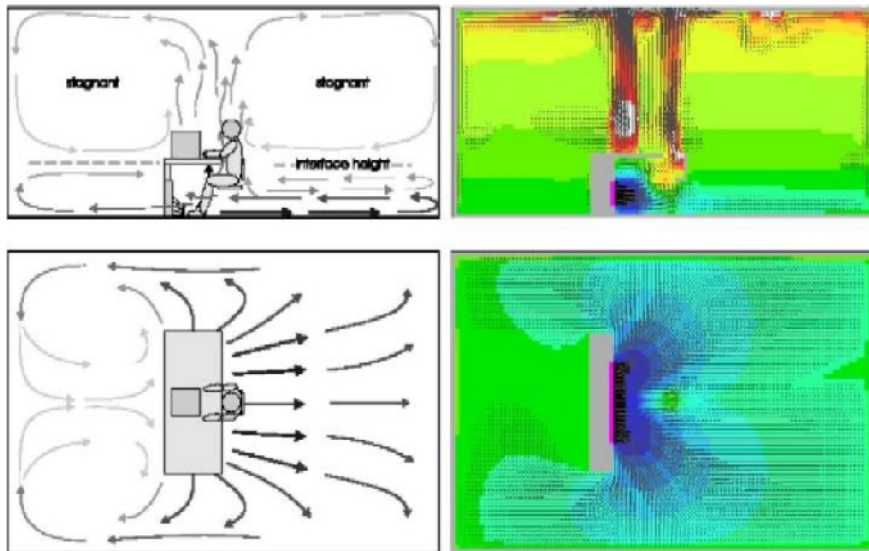
Mixing flow Systems are the Systems where the air movement is dominated by the momentum flow from the supply openings. The new air mixes with the old air in the room diluting the pollutants in the air. This system has the advantage that avoids the stagnant area. The temperature and the concentration of pollutants it is more homogeneous. It is used in rooms where is not needed any special ventilation



. Figura 31: Mixing ventilation in an office room. From Energy Utilization

#### A.4.4.- Displacement Flow systems

Displacement flow systems uses less energy than mixing flow systems but to work they need that in the room that want to be ventilated exist heat sources. The heat sources produce plumes that move the air from the bottom to the top by buoyancy. They use much less energy than mixing systems but the results are different. Appears a stratified temperature concentration gradient and the concentration of pollutants is very high over the stratified height. When they are well sized they get very good results with low consume.



Flow features of the displacement ventilation flow pattern in the central plane of the room and at a horizontal plane at ~0.1m above floor level.

Figura 32.: Displacement ventilation model. From "The Measurement and Simulation of Indoor Air Flow"

#### A.4.5.- Hybrid systems

Hybrid systems are ventilation systems that use more than one of the ventilation systems mentioned before. The Impinging Jet System (Air Queen®) uses a jet that impinges with the floor producing an upward air movement. This system also uses the buoyant effect to work because the jet and the buoyant plume have the same direction. Fresh AB of Sweden has developed the Confluent Jets (Softflo ®) air supply systems which also uses both mixing and displacement ventilation. Also hybrids system exists in which the air supply can be configured and adapted to the needs of the room and the occupants.

## *A.5.- Jets in mixing ventilation*

In mixing ventilation the characteristics of the jet are the most important part in the design. The jet is characterised by the initial volumetric flow rate,  $q(0)$ , and the initial momentum flux  $M(0)$ . The jet also is characterised by its behaviour in the room as a laminar or turbulent flow. If the jet will be turbulent or laminar is defined by the Reynolds number of the jet. In methodology we explain how to calculate Reynolds for the case and what values of Reynolds will be used.

The jet needs a source of energy that gives to it the velocity and the momentum. A mechanical fan blows the air through the pipes to the inlet and produces the jet. A free jet is a jet that is not affected by the surrounding surfaces and can displace spreading without any perturbation from the surfaces. A jet can be a free jet for a while but when the jet get in contact with one surface it will become a wall jet. An ideal jet is a jet which flow momentum is conserved. The jet loses momentum in the supply opening, with the interaction with the wall jets and due to friction against the surfaces.

When the jet gets into a room first has a shear layer that divides the jet from the air in the room that place is called zone of flow establishment. But at a specific length the two layers mixes in the zone called jet region. Straub in 1969 describe the behaviour of the jet in four zones. The first zone is it in which the velocity is constant. Zone 1 is very small for big values of Reynolds but in low values is easy to appreciate it. In the second zone the jet starts to open as a cone and the velocity decrease as a value of  $1/\sqrt{x}$ . In the third zone the velocity of the jet decrease at a rate of  $1/x$ . In the fourth zone the jet becomes indistinguishable from the room air and is considered mixed with the air.

## *A.6.- Measures in fluids*

To measure the velocity of the air in a room we can use two different methods, the standard (local) point measuring technique or a whole field measuring technique. The standard measuring technique consists on measure the velocity of different points in a field where we want to measure the velocity of the air. Whole field measuring technique gets the velocity of a plane or a volume in many parts at the same time getting a global knowledge about the model.

### **A.6.1.- Whole field measuring techniques.**

The whole field measuring techniques are new techniques based on optical techniques in which pictures are taken by arrays of sensors. To measure the air velocity can be used techniques of PIV (particle image velocimetry) or PSV (particle streak velocimetry). Both methods can not measure directly the velocity of the molecules of air. It is need to add tracer particles which are supposed ideally to follow the air movement and don't affect its properties. These particles are easier to be filmed by a video camera. Between constant time intervals the displacement of the particles is recorded. The PIV methods calculate the velocity of groups of small particles. The PIV tracers are small particles that can be seed in small places. They give more information than PSV systems but don't work for big areas. PSV uses big particles and measure the velocity of these particles individually.

To measure with pictures of videos is necessary to use a light sheet that illuminates one bi-dimensional face. Sometimes are used light pulses that emits the light in the time intervals and then are compared the photo between moments or light choppers that creates sequence of streaks.

In the next pages there are not truly whole field measuring techniques as PIV or PSV because of several limitations in the operation with the technique but there are several videos to see the velocity and the movement of the air in a graphic method with seeding particles.

I have used as tracer particles smoke and soap bubbles. Smoke videos give us a lot of information in the videos because with it we can see the global movement of the air, the turbulence, the tendency and the existence of whirls that appear in the jet at constant intervals as example. Also I have used soap bubbles which give videos in which we can appreciate better the difference of velocity in the jet. As soap bubbles are bigger particles we can watch them individually and the see the velocity of the air in the different zones of the model.

## A.6.2.- Velocity measures

To study the movement of the air we can measure the speed of one point or various points in the box and suppose that in a volume close to that point the speed is the same. On base to that I have measure the speed of the air in the points that I supposed critical or interesting.

To measure the speed on the points I have to use an indoor anemometer. To do it we can use a cup anemometer, a windmill anemometer, a hot wire anemometer, a laser Doppler anemometer, a sonic anemometer, a ping-pong ball anemometer, a plate anemometer or a tube anemometer. Of this list the need to be used inside a box reduce the number to a laser Doppler or a hot wire anemometer. The hot wire anemometer has the advantage of being very cheap related to Laser Doppler equipment and easy to use. On the other hand a Laser Doppler anemometer let us to measure the air speed without introducing any objects in the box and also can give us the direction of the velocity.

- Thermal anemometer: Is a technique that calculates the velocity of the air with the convective heat loss from a body. For indoor climate there are two anemometer hot-wire and hot-sphere anemometer. The hot wire anemometer is made by a thin metal wire of platinum or tungsten of a few millimetres long. This sensor is heated by joule effect and heated to a kept temperature over the ambient temperature. The electrical power needed to keep the temperature of the wire is related with the air speed and the heat convection. The thermal anemometers measure the convective value and do not get the direction of the air. Also a thermal anemometer as it needs to be inside the model during the measure it affects to the system and can not give proper results.



Figura 33 : Hot wire anemometry from Dantec®

- Laser Doppler is a tool that with the principle of Doppler which says that the wave emitted by an emissor and received by an observer will be affected by the relative velocity between the emissor and the observer. The laser send burst that eventually will be interrupted by a seeding particle. If the velocity of the particle will be bigger than zero on the string direction the burst detector will find a disturbance on the back signal. A complicated system of electronic measure the disturbance

on the back signal and measure the change on the wavelength to determine the velocity of the particle. The laser Doppler use more than one string to measure the velocity and can calculate the velocity in different directions of the space (x, y)

A Laser Doppler tool can calculate the velocity and the direction of the air. As well It does not need to introduce any solid object inside to do the measure. So the measures will be done by a Laser Doppler.

To do the job will be used an integrated laser-optics system called FlowLite. FlowLite is Laser Doppler measuring system designed by Dantec Measurement Technology.



## A.7.- Flowlite

A laser Doppler system measure the velocity of the air based on the Doppler effect, that is produced when we send a high frequency light beam signal and we compare it with the back light signal emitted by the reflection of a particle that interfere the light beam.

To measure the velocity of the air on one point we need at least two laser beams. Both laser beams will get reflections of the particles that cross each beam but when a particle cross the point where they cross the will receive a back signal at the same time. In that moment the laser Doppler system measure the Doppler effect of the back signal and interpret it to get the velocity of the particle in the chosen point.



*Figura 34. : Laser Doppler system; computer, laser optic system and electronic analyzer*

As the velocity of the air is not constant and it changes for moments Laser Doppler equipment measure the velocity of thousands of particles. The results are sent to the computer and then we can study them with statistical tools. From the results we can get mean velocity and the standard deviation of the values. The standard deviation of the velocity divided by the mean velocity is a value of the turbulence. The mean velocity of these statistical values is the velocity of the air in that point.

*“FlowLite embodies tried and tested laser Doppler technology to ensure reliability and continued measurements accuracy in everyday use in a variety of applications:”*

- *Flow and surface velocity research studies.*
- *Velocity measurements of solids and liquids in continuous processes*
- *Development of more efficient manufacturing processes.*
- *Training in measurements techniques*

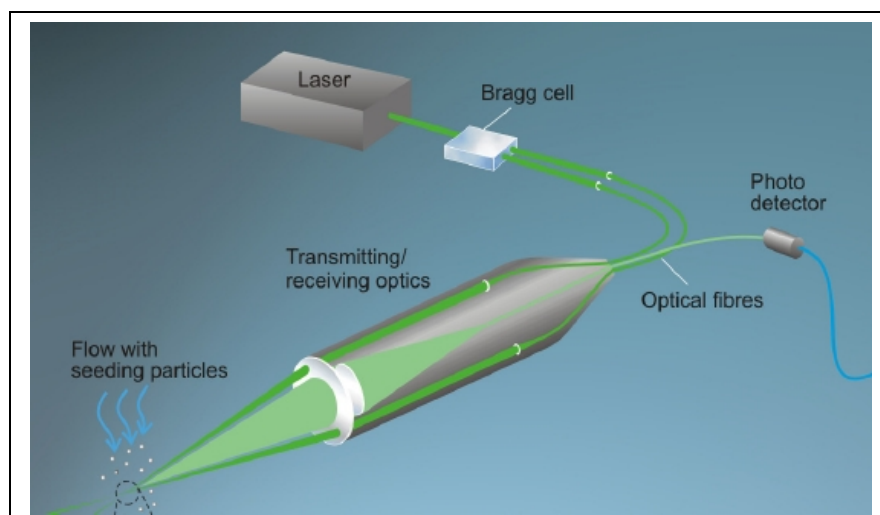
*Text: FlowLite Installation and users guide Dantec Measurement Technology®*

### **A.7.1.- Light emissor**

The Light in this equipment is emitted by the FlowLite probe. The light can be harmful and can injure the eyes by direct beam or by reflections. The light equipment must be shutted every time that is not measuring and special goggles must be were on all the time that the tool is on. In this case the laser is used inside a room with the box and the smoke equipment. The computer of the laser and the remote control of the smoke machine are outside. So I can use the laser and the smoke machine reducing to the minimum the risk of get a laser beam in the eyes or breathe too much smoke. The light is produced by a 10mW He-Ne laser

### **A.7.2.- Optic system**

The light emitted by the laser generator is send to the optic system by a fibre optic cable. The optic system splits the light in two beams and send them with a distance between them called beam space and with a specific angle. The distance at which the two laser beam cross is called focus distance and It is the place where the measure is done. These data have to be introduced properly in Floware (FlowLite software) in order to interpret properly the results of the measures. It is useful to know that if these values are wrong the tool will work without problem but we will get wrong results so we must be sure that we have always the right values introduced in Floware. In this equip we have lens of 160mm 500mm and 800mm.



### A.7.3.- Beam expander

An expander is an optical tool that we can introduce to get better results from big focus lens. We have an expander of 1.98. The expander never change the focus length but will make us easier to find the cross point and we will have better angle of beam. The beam expander change the beam distance or the distance between the two beams at a large distance when no focus lens is on the optic system.

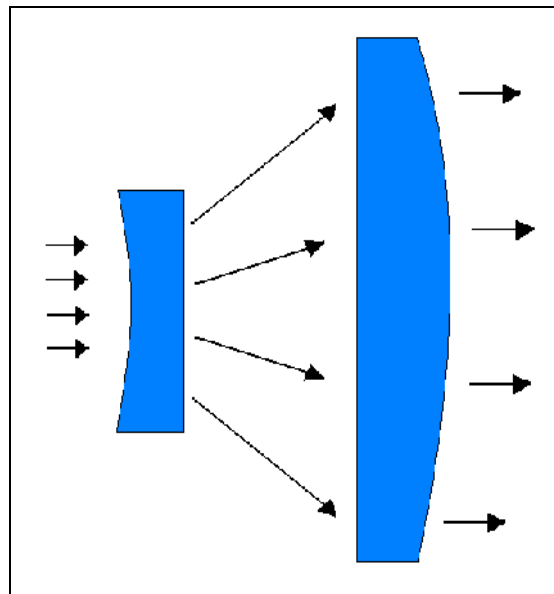
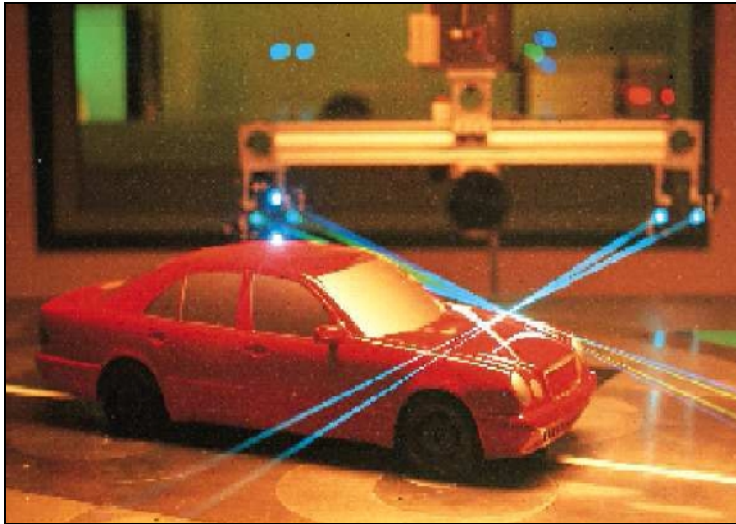


Figura 36.: Beam expander

### A.7.4.- 1D 2D or 3D measures with laser Doppler

With a laser Doppler system we can measure in one dimension two or three. With one emitter and one laser we can do one dimensional measures. With one emitter and two lasers we can do two dimensional measures but for three dimensional measures we need to use one emitter on a different place because we can only measure on the plane normal to the emitter. So we will need a second plane to get the third dimension.



*Figura 37: measure on a wind tunnel with a BMW scale model three dimensional measures. From Dantec*

### **A.7.5.- Flow velocity Analyser**

When the light equipment is working it send the back signals to the Flow velocity Analyser signal processor. The Flow velocity Analyser treats the signal back from the Flowlite and converts it to velocity signal. This Flow velocity Analyser is configured from the Floware.

### **A.7.6.- Floware**

The treated signal from the Flow velocity Analyser is sent to the computer. Floware is the software included in the equipment and it works with the signal sent to the computer. Floware software let us configure the Flow velocity Analyser and the power of the laser beam. Also it controls the number of burst in the signal or the number of samples that must be taken in each measure. In the Floware must be introduced the values of the optic system in order to calculate properly the velocity of the air. Floware also can work with the results and calculate the mean value of the measure and do some graphs. It is possible to export the values from the measure and work with another software, but FVA has tools enough to work with it. To get more information about Floware look FLOWare FVA interface, Installation and User's guide.

## A.8.- Dimensional Analysis:

To study the ventilation of a room we can work with a full scale model or with a scale model. A model is a replica of a real system or a virtual system in which we can alter the properties of it to measure the system response in order to characterize the system.

*“During the design process, predictions can be made by using scaling laws to transform results from scale models to those at full scale “*

*From: Etheridge and Sandberg 1996 Chapter 14*

The model must be as similar as possible to the reality because we will use the response of the model system to decide about the real one. In our case our system is a room with an air jet inlet. So we can use as model a room with an inlet or a scale model of a room. To study this case we will use a scale system.

The advantage of working with a full scale room is that we know that this will be the response of the system. If we work with a scale system we need to make some assumptions about similarities between the scale model and the real model but most of them are very easy to reproduce because we can construct the model in the same way as the real system.

To work with a scale model we need to use dimensionless numbers to compare properly the properties between the scale model and the real one. If this dimensionless numbers that characterize the system are equals in the scale model and the real model we can assume that the response for the perturbations will be the same. The problem is that is very difficult to make the scale model similar to the real one. For example is not possible to get the same scale roughness in the walls. Or if we want lot similarities not just Reynolds for example thermal similarities or similarities in Arquimedes number or Froude number we will need to control more and more parameters such as the density or the viscosity. That makes very difficult to do the experiments.

In this case I will control just the Reynolds number of the jet because I make the assumption that inertial forces and viscous forces are the main forces in the system. If we work with very low values of Reynolds maybe it will be important to use the Froude number in which affect the gravitational force. If we don't work with an isothermal system we will have different densities between the inlet and the box and we will need to use the Archimedes number and that will need to use flow with different density for example water with different values of salinity.

In our system the temperature will be around 20 degrees with very low changes and the Reynolds number will be between 2600 and 20000 except for some measures just to compare when other forces appear.

## A.9.- Mechanical ventilation, Fan

High levels of ventilation require much more energy than those with low levels of air supply. Typical low ventilation values are 8 l/s/person and high ventilation value is 10l/s/person. The flow rate (Q) has a much known relation with the pressure difference ( $\Delta P$ ) and the power (E).

$$\Delta P \sim Q^2$$
$$E \sim Q^3$$

So if we increase the ratio from 8 l/s/person to 10 l/s/person the flow rate increase in a ratio of 1.25 but the pressure difference increase by a value of  $1.25^2=1.5625$  and the energy increase in a ratio of  $1.25^3=1.953125$ , around twice energy.

*From Energy utilization course 08/09 Gävle University leaded by Taghi Karimipناه*

If the flow is very high all the air in the room will be renovated and mixed with the new air but it will produce a draught very unkind for the people in the room. Also a higher value of flow means a great increase in the energy consume. For example if the flow increases by a factor of two the needs of energy for the fan will much bigger than two because the power needed by a fan is:

$$\text{Power(kW)} = \text{Flow (m}^3\text{/s)} * \text{Pressure difference(N/m}^2) * 3600(\text{s/h}) / 1000 (\text{kW/W})$$

$$E = Q * \Delta P$$

As the pressure difference depends on the velocity of the air up to two we can express the power of a fan as

$$\text{Power} \sim \text{Flow} * \text{Mean Velocity}^2 \sim \text{Area}_{\text{inlet}} * \text{Mean}_{\text{velocity}}^3$$

So if the mean velocity is double the energy needs will be increased by a factor of 8. If the flow is 3 times bigger than the real needs we will be expending 27 times more energy than real energy need for that process. When the rooms are not occupied many times the ventilation system is working over the needs and expending lot of energy.

Another reason to reduce the velocity of the air in a room is the counter effect of the draught in a room. If the air velocity in the room in the occupied zone is over a value of 0,1m/s it is considered as a draught and produces an unkind feeling in the body.

---

# ANEXO B

## Metodología de trabajo en el proyecto, cálculo de Reynolds, sistema de coordenadas y cómo se ha medido.

---

The methodology in this thesis is divided in three different parts that have been chosen arbitrary. The first part is the methodology utilised in all the report and it is very useful to understand how I have work and to understand the results. The second part is the techniques that I have used to record and make the videos photos and all the visuals parts of the project. The third part consists on the explanation of how Laser Doppler system works and how I have used it. If someone want to use the laser Doppler equipment again will find useful some of the things that are included there.

## B.1.- General methodology in the Project

### B.1.1.-How to calculate Reynolds

We said that we will use Reynolds as dimensionless number to compare with a full scale room. So we will use this value as reference to talk about different flows because it condenses a lot of parameters. Reynolds number in a pipe or tube is defined in fluid dynamics course as:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} = \frac{Q D}{\nu A}$$

Where:

- **V**: the mean fluid velocity
- **D**: the diameter (m)
- **μ**: the kinematic viscosity of the fluid (Pas or Ns/m<sup>2</sup>)
- **ν**: the kinematic viscosity of the fluid (m<sup>2</sup>/s)
- **Q**: the volumetric rate (m<sup>3</sup>/s)
- **A**: the pipe cross sectional area (m<sup>2</sup>)

In our case we do not have a tube or a pipe, we have a rectangular duct. Experimental measures get that if we calculate the hydraulic diameter of the tube we can use the same equation of Reynolds to compare the flow with different kind of ducts. The hydraulic diameter of a square duct is:

$$D_H = \frac{4A}{P}$$

The area of my duct is:

$$A=L^2$$

The perimeter is:

$$P=4xL$$

So the  $D_H$  is equal to L

$$D_H=4xL^2/(4xL)=L$$

As we can see in the diagram a square duct has the same hydraulic value as a pipe inside that square duct. So if we want to reduce the material needs of a pipe we should use a cylindrical duct (pipe).



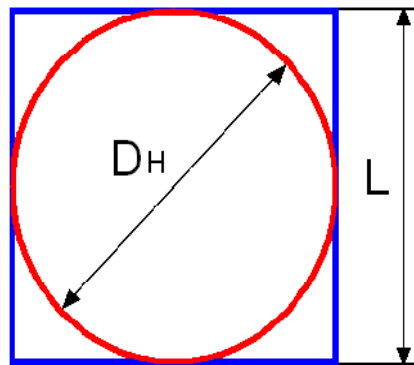


Figura 38: Hydraulic diameter of a square duct.

### B.1.2.- Model size and scale.

The model represents a large room with one inlet of supply air in the top and an outlet at the bottom on the same wall. The model room is square with a variable length. It will be interesting to repeat the simulations with furniture in the room but the introduction of obstacles in the model will be the field of study of another project.

Our room is a box with a moving wall. The size of y and z is 50cm and 70cm and the moving wall can change from 180cm to smaller values like 20cm.

If we compare the room with a room with a high of 2,5m we can scale the values and the room will have the dimension of 3,5m of side 2,5m high and 9m of length. The scale value is 5

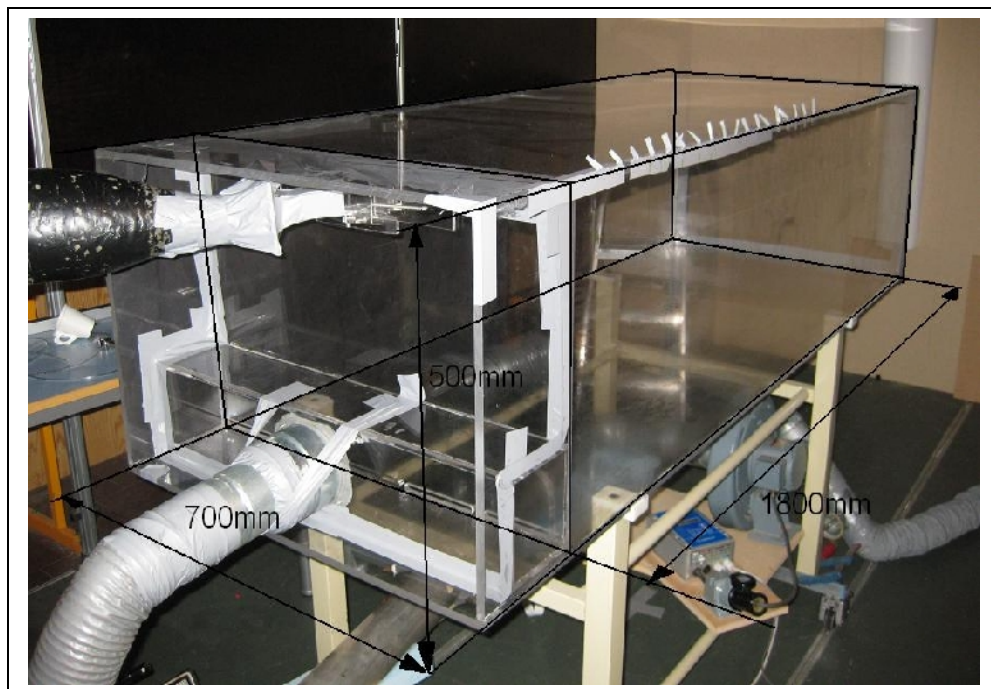


Figura 39: Size of the model

The values of the flow for a room at full scale will be the values that we get using a constant Reynolds number and the scale value of 5. As  $Re=Q \cdot D/A/\nu$  with  $\nu$  constant the relation between  $Q$  at full scale,  $Q_{real}$ , and  $Q$  of scale,  $Q_{scale}$  is:

$$\begin{aligned} Q_{real} \times D_{real} / (A_{real} \times \nu) &= Q_{scale} \times D_{scale} / (A_{scale} \times \nu) \\ Q_{real} &= Q_{scale} \times 5 \end{aligned}$$

The ventilation rate of a room is calculated by the flow rate divided by the volume of the room. As the volume of the real room is the scale value up to three the Ventilation ratio equivalent for a real room is

$$n_{real} = Q_{real}/V_{real} = Q_{scale} \times 5 / (V_{scale} \times 5^3) = n_{scale} / 25$$

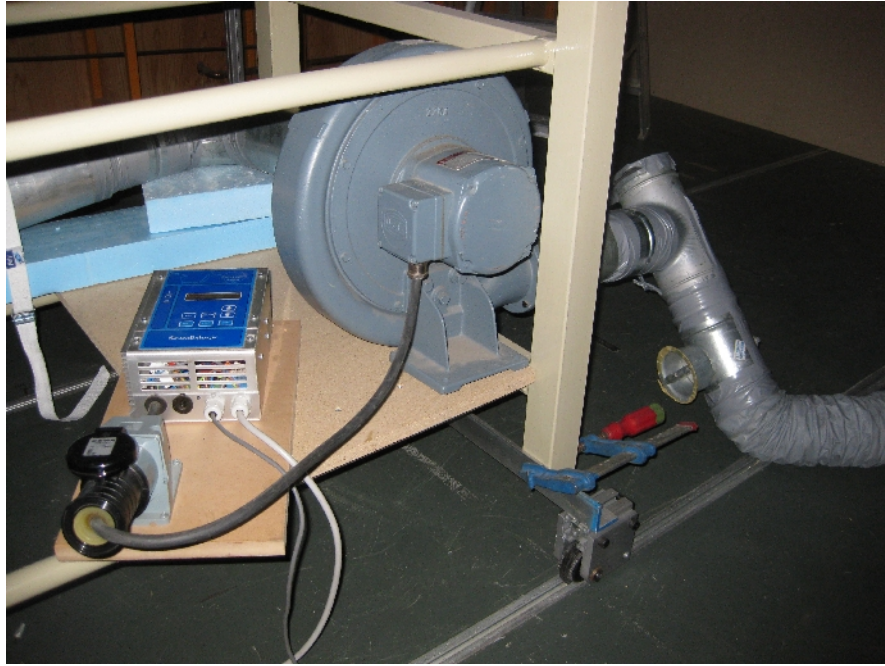
As we can see the ratio of ventilation in our model is 25 times higher than the ventilation ratio for the real system and the same Reynolds value. This is very good for us because it means that we will not need so much time to fill the room with seeding particles or empty it from tracer particles.

### **B.1.3.- Comparing flow rate mean speed and flow movement patterns**

In the model we can change the flow, the length of the box and the incidence jet angle. The flow and the jet angle affects directly to the jet source. The increase of the flow rate will increase the jet momentum and the jet angle will affect the direction of the jet making it impinges on lateral surfaces with different angles. The length of the box will affect the total volume of the model and the maximum length that the jet has to cross to move and mix the air in the room.

The flow of the model will produce a jet with a variable mean speed. A jet with higher speed will have a bigger jet momentum. If the jet momentum is high enough the air jet will cross all the room until the end of the room. When the jet crash with the wall at the end it will whirl and go back in a layer below the jet moving all the air in the room. If the jet is not big enough to go to the end of the room or if just a small part of the jet arrives to the end of the room, the room will have bad ventilation and the pollutants at the end of the room will not be removed from the stagnant area..

The ventilation in the room is produced by a fan with variable velocity. The fan extract the air from the model and throw the exhaust with the tracer particles to a ventilation pipe of the building avoiding high levels of pollutants in the working area.



*Figura 40. : Fan used in the model*

The angle of the inlet will produce a jet that will go in a direction parallel to the lateral walls or a jet that will collisionate with one lateral face of the room. If the jet beats with a parallel wall the movement in the air is totally different to the jet that collision with the wall opposite to the inlet. I will call normal jet a jet which direction is normal to the inlet wall. A normal jet has an angle of  $0^\circ$  from the normal (Reference System). If the jet is inclined to the right with an angle  $\alpha$ , will be a jet with an angle  $\alpha$ .

The length of the room will also affect the ventilation of the room. If the room is very large for the jet force the new air will not go to the end of the room and we will have bad ventilation even when the ratio of ventilation is high because the new air is not affecting the whole room just the first meters of the room. The room will have three different dimensions 180cm, 90cm and 45cm. They have been chosen arbitrary but trying to get a big range of possibilities from the bigger possible room to the smaller but still habitable room and a middle case between both, the half of the bigger and double.

Reynolds number just depends on the mean fluid velocity if we could control the size of the inlet we could get different Reynolds values with different ratios of ventilation but the chosen of an inlet gets out of the study range

#### **B.1.4.- Calculation of flow with Orifice meter.**

To calculate the Reynolds value we have to measure the mean velocity. Our scale system works with an extraction system. The fan is installed in the outlet of the ventilation system so the leakages will come from the outside to the inside. We measure the total air that is extracted from the box with an orifice meter. An orifice meter consists on a piece of pipe with a perforate plate inside with a diameter of the hole smaller than the tube and a manometer which measure the difference of pressure before and after the plate.



Figura 41: manometer

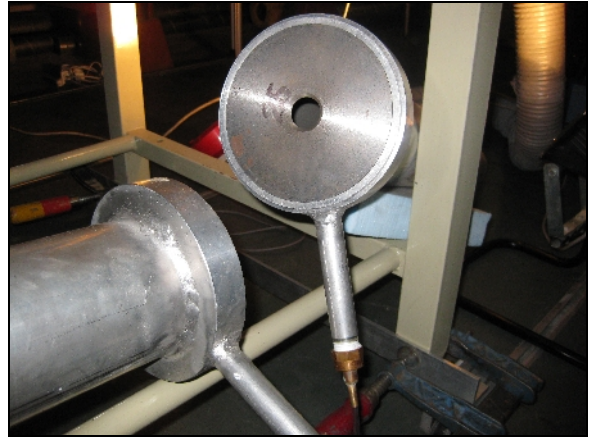


Figure42: Orifice plate 104-25.

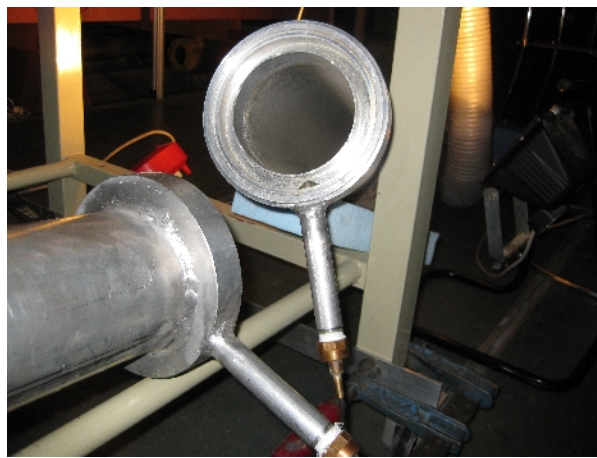


Figura 43 : Orifice plate without plate

At the beginning I worked with an orifice plate of 104-35 but that plate just let us to measure for big fan speed and I needed smaller values so I changed to the plate of 25. With this plate we can measure till  $Q=0,85$  l/s, for smaller values we get out of the graph. But using the formula for orifice plate we can find smaller values of  $Q$ .

Below you can find the tables that have been used to compare and work easily with the manometer and the other units. The red values get out of the orifice plate normal range.

The  $n$  value has been calculated with the volume of the model with 180cm. If the model has 90cm the new  $n$  value is twice the table value and if it is 45cm the  $n$  value will be four times the original  $n$  value.

The constants and the equations utilized to calculate the values are included in the table

Table and graph of the orifice plate of 104-35

$\Delta P$	Q [l/s]	n [1/h]	u [m/s]	M= $\rho \cdot q \cdot u$ [N]	Reynolds
1	0,773	4,42	1,75	1,62	2404
2	1,089	6,23	2,47	3,23	3389
3	1,332	7,61	3,02	4,83	4143
4	1,536	8,78	3,48	6,42	4778
5	1,716	9,80	3,89	8,01	5337
10	2,419	13,82	5,48	15,92	7524
15	2,957	16,90	6,71	23,79	9199
20	3,410	19,49	7,73	31,65	10608
25	3,809	21,77	8,64	39,48	11848
30	4,169	23,82	9,45	47,30	12969
35	4,500	25,72	10,20	55,11	13998
40	4,808	27,47	10,90	62,90	14956
45	5,097	29,13	11,56	70,69	15855
50	5,370	30,69	12,18	78,47	16705
60	5,878	33,59	13,33	94,02	18285
70	6,345	36,26	14,39	109,54	19736
80	6,779	38,74	15,37	125,04	21086
90	7,186	41,06	16,30	140,52	22354
100	7,571	43,26	17,17	155,99	23552
120	8,287	47,36	18,79	186,88	25779
140	8,945	51,12	20,28	217,73	27825
160	9,557	54,61	21,67	248,54	29729
180	10,132	57,89	22,97	279,32	31516
200	10,675	61,00	24,21	310,06	33205
220	11,191	63,95	25,38	340,78	34811
240	11,684	66,77	26,49	371,48	36345
260	12,157	69,47	27,57	402,15	37816
280	12,612	72,07	28,60	432,80	39231
300	13,050	74,57	29,59	463,43	40595
320	13,474	77,00	30,55	494,04	41914
340	13,885	79,35	31,49	524,64	43193
360	14,284	81,62	32,39	555,22	44434
380	14,672	83,84	33,27	585,78	45640
400	15,050	86,00	34,13	616,33	46815
420	15,418	88,10	34,96	646,87	47961
440	15,778	90,16	35,78	677,39	49080
460	16,129	92,17	36,57	707,91	50173
480	16,473	94,13	37,35	738,41	51242
500	16,810	96,06	38,12	768,89	52290

On red means out of measurable range

$$Q = 0,77274 \times \Delta P^{0,49557} \quad \text{l/s}$$

$$Q/\text{volume} \times 3600/100$$

$$n = 0 \quad \text{1/h}$$

$u = Q/1000/A$  m/s  
 $A = 0,000441$  m<sup>2</sup>  
 $\rho = 1,2$  kg/m<sup>3</sup>  
**Viscosity= 1,84E-05**  
**Volume= 0,63** m<sup>3</sup>  
**X= 180** cm  
**Y= 70** cm  
**Z= 50** cm

Tabla 6: Translation table from manometer with orifice plate of 104-35

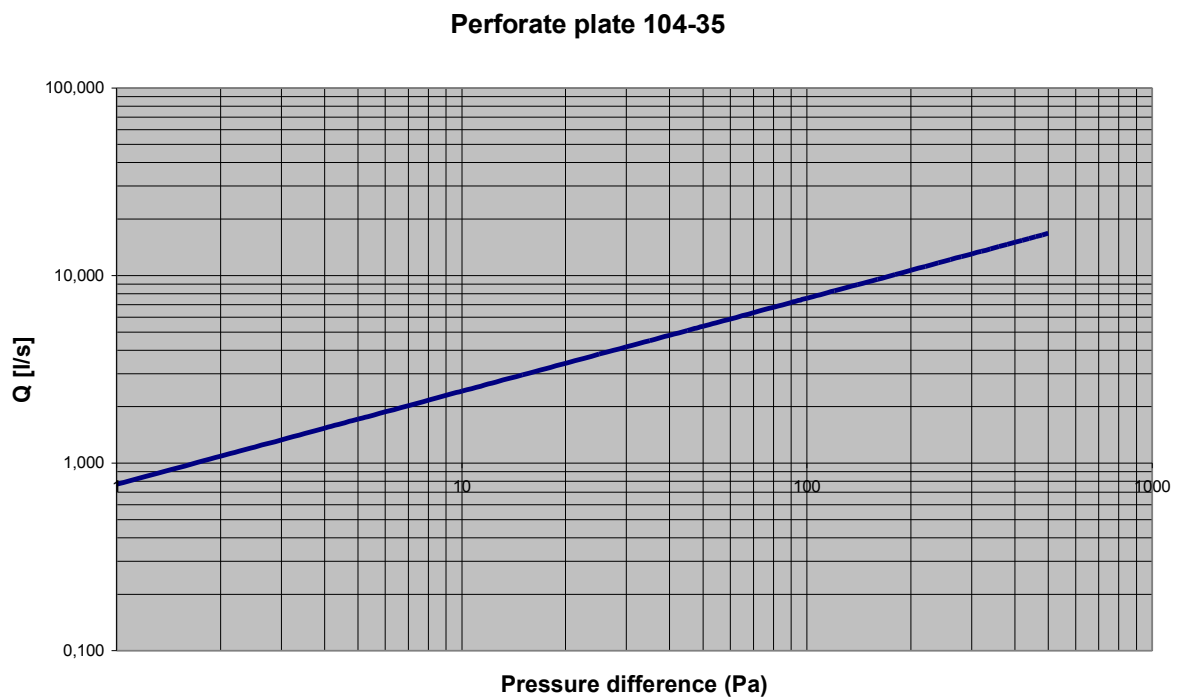


Figura 44 : Translation graph from manometer pressure value to flow in the box.

Table and graph of orifice plate of 104-25

$\Delta P$	Q [l/s]	n [1/h]	u [m/s]	M= $\rho \cdot q^*$ u [N]	Reynolds
<b>1</b>	0,383	2,19	0,87	0,40	1193
<b>2</b>	0,541	3,09	1,23	0,80	1684
<b>3</b>	0,663	3,79	1,50	1,19	2061
<b>4</b>	0,765	4,37	1,73	1,59	2379
<b>5</b>	0,855	4,88	1,94	1,99	2659
<b>6</b>	0,936	5,35	2,12	2,38	2911
<b>7</b>	1,011	5,77	2,29	2,78	3144
<b>8</b>	1,080	6,17	2,45	3,17	3360
<b>9</b>	1,145	6,55	2,60	3,57	3563
<b>10</b>	1,207	6,90	2,74	3,96	3755
<b>15</b>	1,477	8,44	3,35	5,94	4595
<b>20</b>	1,705	9,74	3,87	7,91	5303

25	1,905	10,89	4,32	9,88	5927
30	2,086	11,92	4,73	11,85	6490
35	2,253	12,87	5,11	13,81	7008
40	2,408	13,76	5,46	15,78	7490
45	2,553	14,59	5,79	17,74	7943
50	2,691	15,38	6,10	19,71	8371
60	2,947	16,84	6,68	23,63	9167
70	3,182	18,18	7,22	27,55	9899
80	3,401	19,43	7,71	31,47	10579
90	3,606	20,61	8,18	35,39	11219
100	3,801	21,72	8,62	39,31	11823
120	4,162	23,78	9,44	47,14	12947
140	4,494	25,68	10,19	54,96	13980
160	4,803	27,45	10,89	62,78	14942
180	5,094	29,11	11,55	70,60	15845
200	5,368	30,68	12,17	78,42	16699
220	5,629	32,17	12,76	86,23	17511
240	5,879	33,59	13,33	94,03	18286
260	6,118	34,96	13,87	101,84	19030
280	6,348	36,27	14,39	109,64	19746
300	6,570	37,54	14,90	117,45	20436
320	6,784	38,77	15,38	125,24	21104
340	6,992	39,96	15,86	133,04	21751
360	7,194	41,11	16,31	140,84	22379
380	7,391	42,23	16,76	148,63	22990
400	7,582	43,33	17,19	156,43	23585
420	7,769	44,39	17,62	164,22	24165
440	7,951	45,43	18,03	172,01	24732
460	8,129	46,45	18,43	179,80	25285
480	8,303	47,44	18,83	187,58	25827
500	8,473	48,42	19,21	195,37	26358

**On red means out of measurable range**

**Q=  $0,77274 \times \Delta P^{0,49557}$**  l/s  
**Q/volume\*3600/100**  
**n= 0** 1/h  
**u= Q/1000/A** m/s  
**A= 0,0004** m<sup>2</sup>  
**rho= 1,2** kg/m<sup>3</sup>  
**Viscosity= 2E-05**  
**Volume= 0,63** m<sup>3</sup>  
**X= 180** cm  
**Y= 70** cm  
**Z= 50** cm

*Tabla 7 : Values of orifice plate 104-25*

Perforate plate 104-25 graph

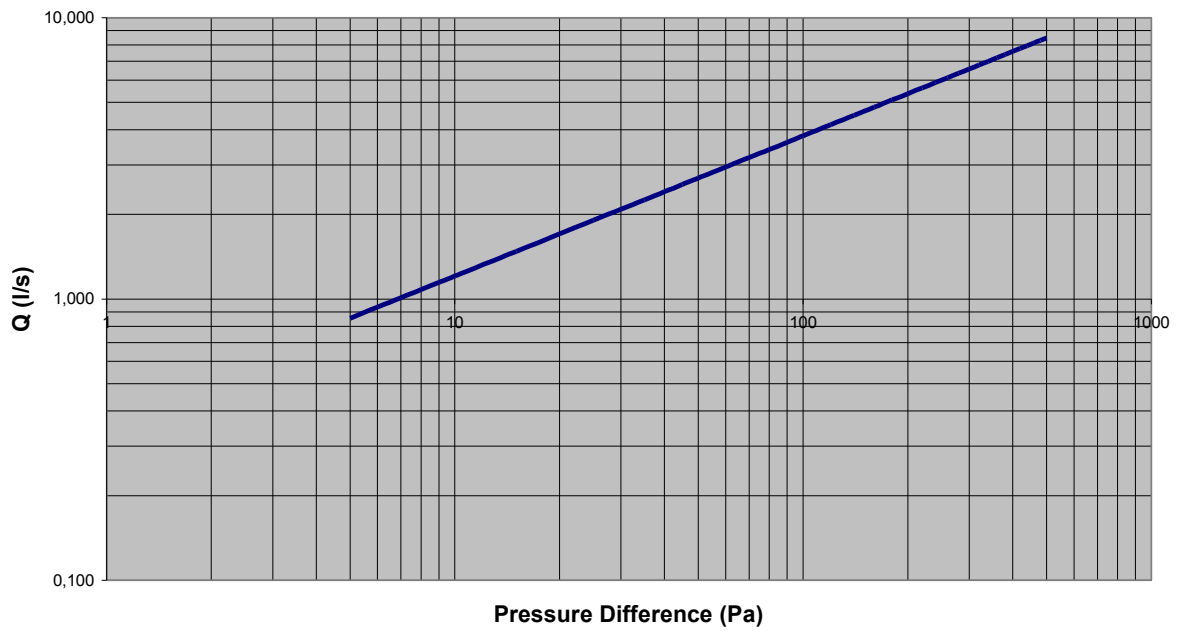


Figura 45 : Graph of orifice plate 104-25 manometer pressure (Pa) to Q (l/s)

### B.1.5.- Determine the position of the measured points. System of reference

To determine the position of a point in the box I have used two different systems. One is based on a Cartesian coordinates system with the origin on a fixed point of the box. The other is based on the position of different planes that I have chosen arbitrary. This is the Cartesian coordinates system (photo below)

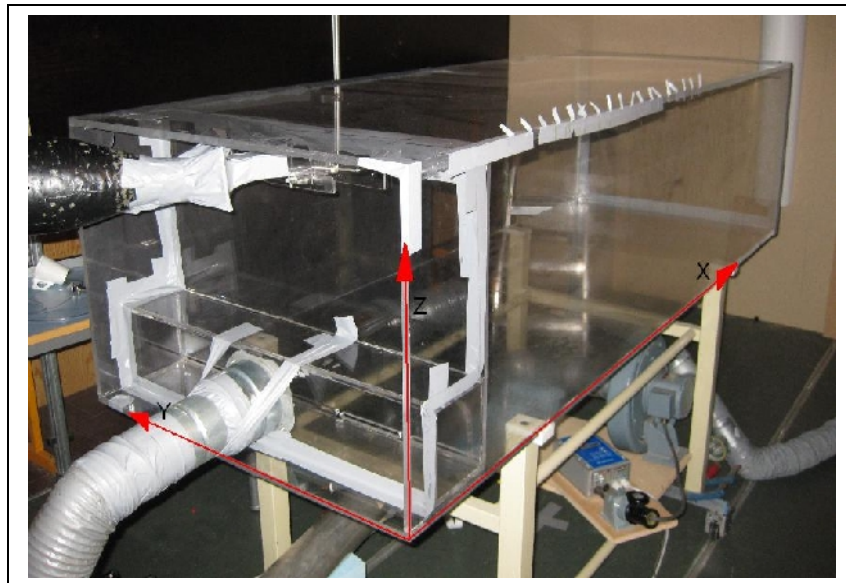


Figura 46.: Coordinates system

The origin is situated in the inlet wall at the bottom and in the right side looking from the outside to the inside of the box.



Sometimes a group of points that I will measure correspond to a specific plane or even I will talk about the behaviour in a determinate plane. In order to understand better in what position I am working I talk about different planes in the model. These are the planes that I will use to explain which point I am measuring or what part of the model I want to describe.

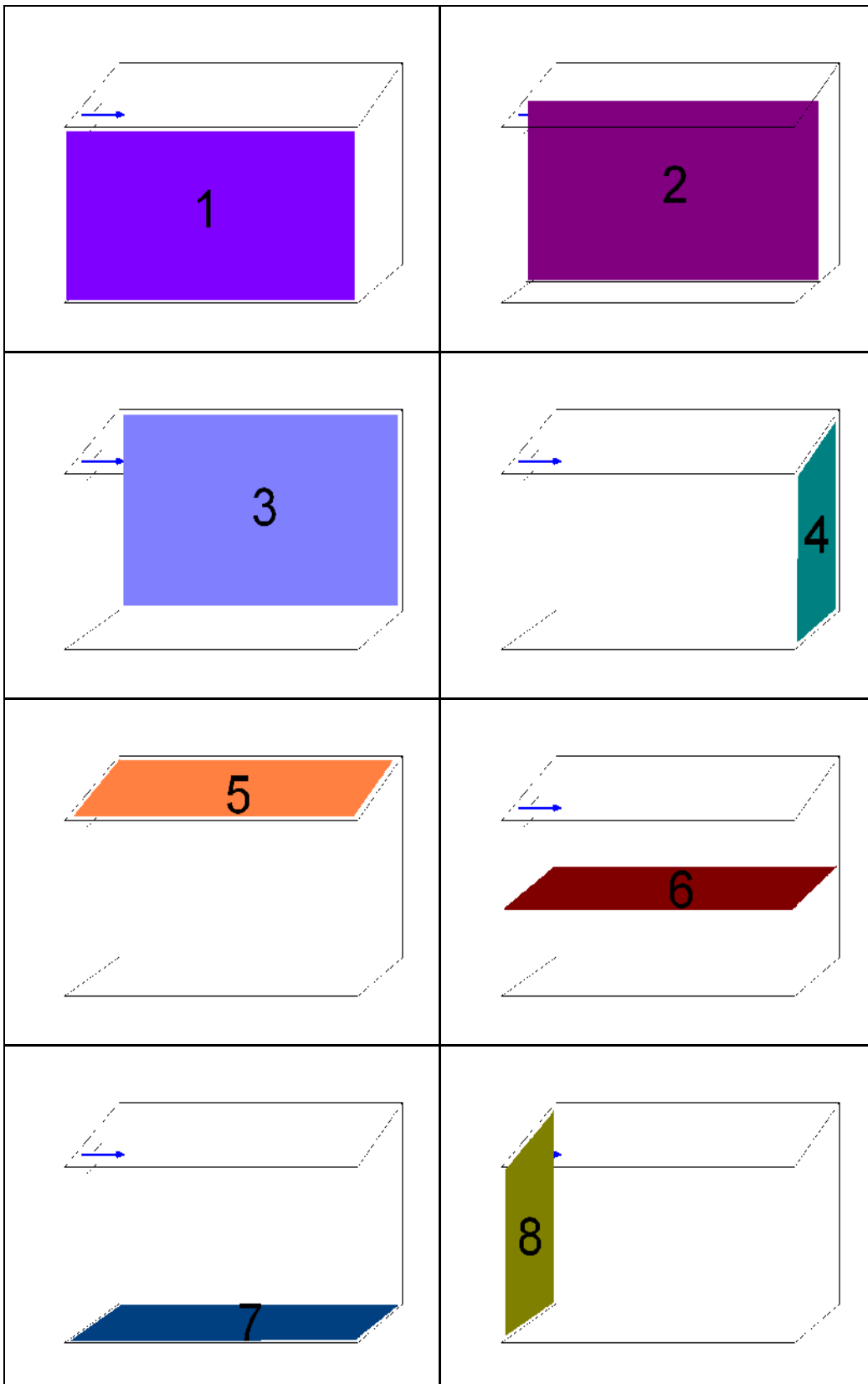


Figura 47: Different planes in the box

If the draws are not clear enough to know which plane is each one using the Cartesian system here I describe the eight faces.

<b>Face</b>	<b>X(cm)</b>	<b>Y(cm)</b>	<b>Z(cm)</b>
Face1	--	0	--
Face2	--	35	--
Face3	--	70	--
Face4	L	--	--
Face5	--	--	50
Face6	--	--	25
Face7	--	--	0
Face8	0	--	--

*Tabla 8 : Relation between Cartesian system and planes*

L: total length of the box in x direction. It can change because that parameter in the box is variable. In most of the case this value will be 180cm. But it can changes to 90cm or 45cm

## *B.2.- Video and photos methodology*

The movement of the air in a room is a field of interest because it affects to the quality of the air in that room. We are going to analyse the interaction between a free jet and the boundaries of a room. so we are going to work with a scale model of a room. In this room we can change the length of the room the direction of the jet and the speed of the jet increasing the ventilation of the room.

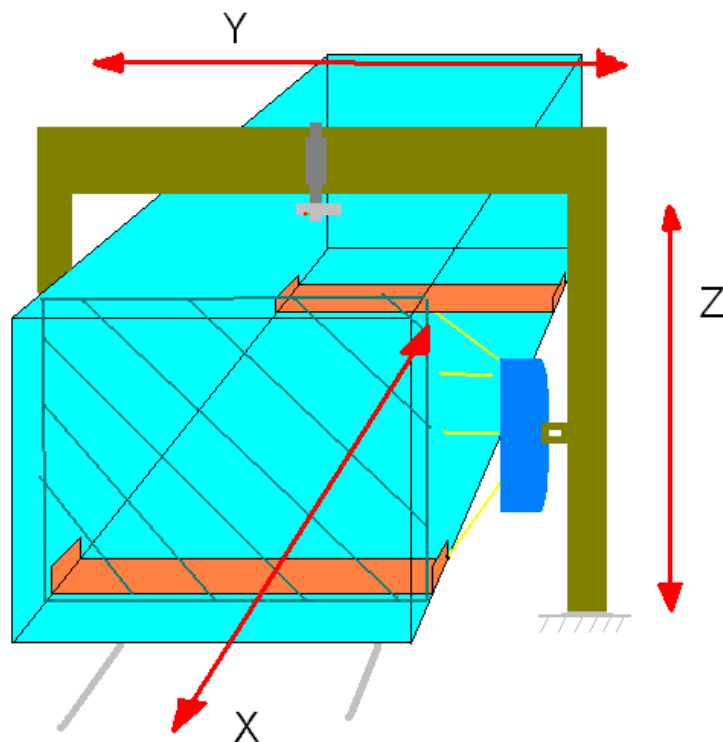
To see the interaction between the jet and the boundaries we will use a light sheet and some kind of tracer seeds. We record the videos with a video camera canon digital ixus 85 15. To film all the important interactions between the jet and the boundaries we use 8 different sections. To film this section we have to put the camera in three different places and change the light sheet from to different places and then rotate and translate it to get the 8 planes.

As tracer seeds we will use to different sources smoke and bubbles. With smoke we will use two different techniques. The first is to introduce a smoke jet in a box empty of smoke and see how the smoke moves into the room. The other is to full the room with smoke and see how the air jet cleans the room. The first technique is very useful to see the jet develop jet in the room and the second is better to see the air before mixing and also to find leakages. The soap and helium bubbles are very good to see the speed and movement of individual parts of the air but the smoke permit us to see where different flow of air impinging in the room.

### ***B.3.- Laser Doppler methodology***

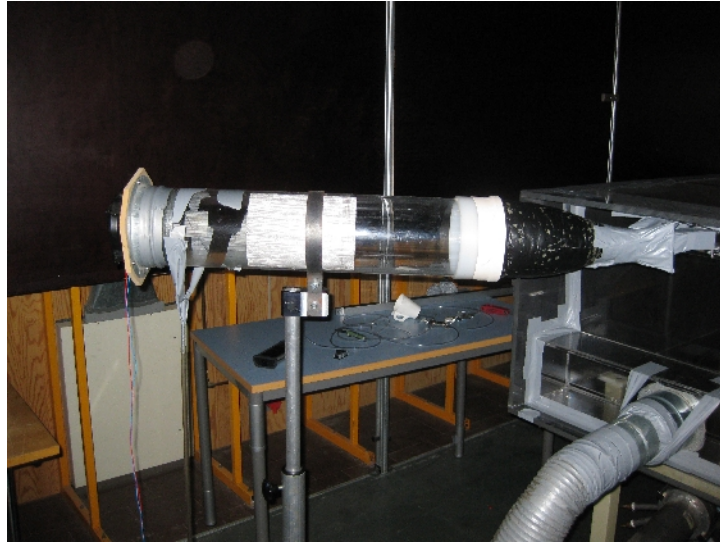
With Flowlite we can measure point by point the mean velocity of the air. With the visual system we have get some concussions about the air movement and mean direction of the air but we don't have numerical values

To do the measures we will use the same structure that we have use to make the videos but now instead of a video camera we will put the laser. So the box can move in rails on the x direction but not on y or z. With the laser located on a side we can move up and down (z) and with different lens we can measure at different lengths on y direction.



*Figura 48: Model movement, box and portico*

I have worked with the model in a room without illumination and trying to avoid any kind of ambient light that could affect the measure. Ambient light received in the laser system can be interpreted as noise in the signal and must be avoided if it is possible. The smoke is introduced in the inlet previous mixed with air to get a constant source of low seeding. The computer and Flowlite equipment are situated outside the room to reduce the perturbations that heating sources can make in the model and to protect the equipment from smoke particles. To change the position of some of the points is necessary to get inside the measuring room. When that happened is necessary to close the laser beam to avoid accidents.



*Figura 49: Smoke air mixer*

Laser Doppler measures with groups of samples. The number of values that we will use will be 1000 for most of the measures. The time to make the measures changes from a few seconds to intervals of 5 minutes. Measures that need more than 5 minutes have been rejected or redesigned to make an efficient use of the time.

Laser measures need time to be made. Some of them take about 5 minutes so if we want to characterize one wall with 8 points in one direction and 11 in the other that will take to us around  $8 \cdot 11 \cdot 5 = 440$ min around eight hours. If then we want to compare 8 different faces with 3 different speeds 3 different angles and 3 different lengths we will need a time around 1600 hours. We have to choose carefully the measures that we want to do. There are eight faces that we want to characterize with different length values and jet angle. I have reduced all the faces to the most interesting to measure. I will enumerate all the faces and will choose in each one what I want to measure.

### **B.3.1.- Face1:**

In face 1 the most interesting thing to analyse the interaction between the jet and the boundary when the jet smash on the side wall. Instead of measuring a table of points on all the wall I will measure the velocity of the wall in two lines that cross on the jet crash point. The measures will characterize the velocity of the air. We expect to see how the velocity and the turbulence of the air decrease when we get away from the jet zone and which part of the jet goes to the left and which go to the right. Also we can size how much goes to the top. To measure this interaction on this face the angle must be high enough to make a lateral collision the jet. The velocities should be big enough to get representative values.

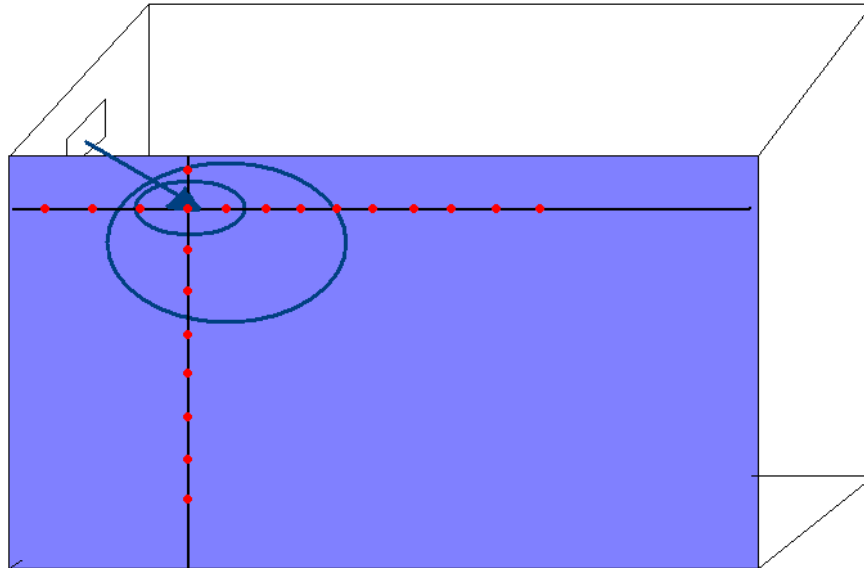


Figura 50: Jet collision on face 1 image for laser measure explanation.

### B.3.2.- Face2:

On face two with a long length lens we can measure the shape of the velocity when changes the z coordinates. We need a jet with normal direction and the length of the model must be long enough to let the jet develop. We should be able to measure the velocity of the jet and get a shape similar to the figures that appear in Maths and Etheridge 1996 page 402 flow in room figure 8.7.

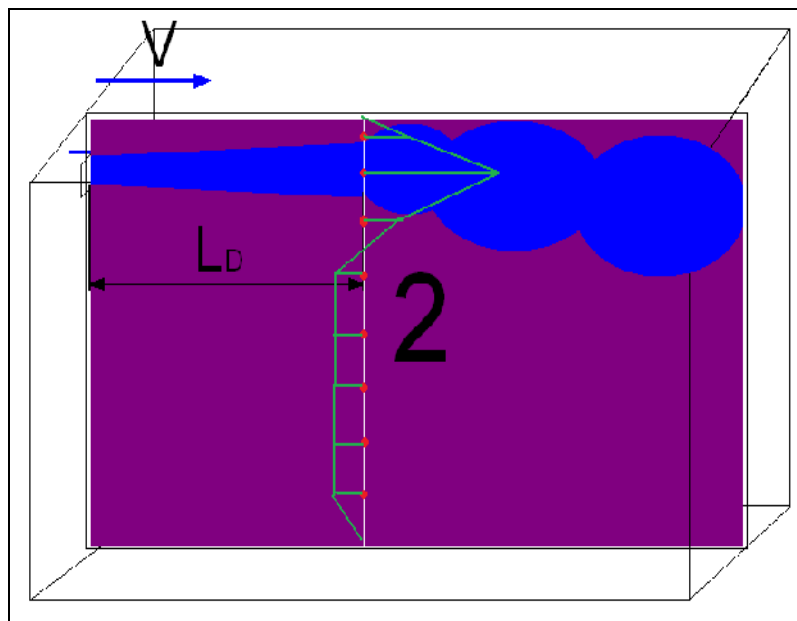


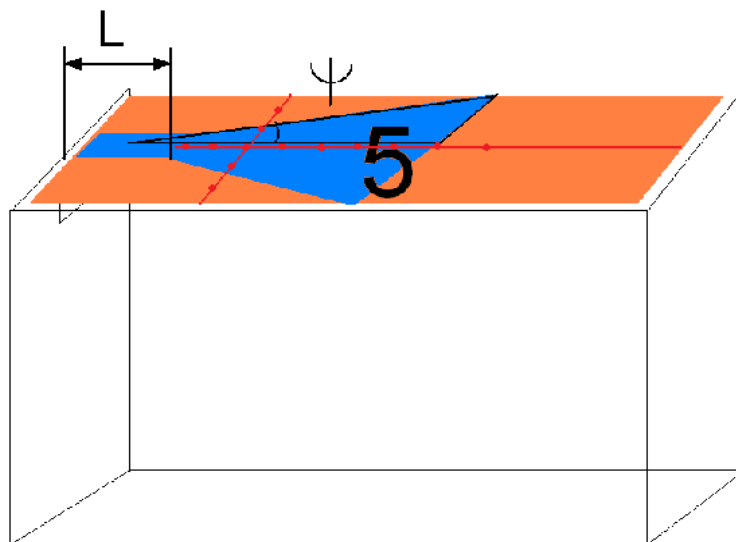
Figura 51: Face 2 jet develops horizontal air movement.

### **B.3.3.- Face3:**

The face three does not have anything interesting to measure. If we measure a horizontal line we will get low and uniform values. Measuring a vertical line we will get a shape similar to face 2 but less interesting and with low values. It will be very difficult to characterize it for an angle of jet normal or with at 45. With more time available it will be interesting to measure the velocity of the air in that face with different flow rate values at 45 and 90. In the videos with bubbles is possible to get an idea of the velocity of the air close to that wall

### **B.3.4.- Face 5:**

On face 5 we can measure how the velocity decreases when we get away from the jet and the field of velocity that is created for the jet cone on the transition length. The measures of the velocity along the jet can be compared with the values from “Etheridge and Sandberg” in Isothermal Jet Expansion “Four zones” page 337 figure 7.21



*Figura 52 : Points to measure on face 5*

### **B.4.- Smoke generation**

To generate the smoke for the visualisations and the measures have been used a smoke generator from Teknova, mod: RG100. It produces particles 1 $\mu$ m from paraffin oil.

### **B.5.- Bubbles generation**

To make visualisations of individual particles and get an idea of the movement similar to the one that we have when we use a particle streak velocimetry I have introduce bubbles inside the box. The Bubble generator is from SAI, Sage action, inc., Ithaca, N.Y., USA and is called bubble generator model 5. These soap bubbles are particles with a size between 1,3mm and 4mm. and a life between 1 and 2 min. To get more information <http://www.sageaction.com/MD5.htm>





---

# ANEXO C

## Estudios de las medidas que se pueden realizar con el equipo Láser Doppler

---

### ***C.1.- Flowlite, laser Doppler Anemometer***

I am not sure about the quality of the measures and I want to determine how affects different configurations of the machine in the measure. To do it I have take several values of the same measure and I have compare them.

In the measures with laser Doppler there exist a couple of variables that affects the measure.

- Data validation
- Voltage
- Bandwidth
- Number of samples
- Smoke quantity
- External conditions

To compare how this changes affects to the measure we will keep constant some of this values and change one of them to find how it affects to the measure.

The most significant variable that I can change in Flowlite is the bandwidth of the signal. With higher values of bandwidth we can measure bigger values of velocity but needs more time to do the measure. The results must be the same in measures with different bandwidth except if the bandwidth chosen is smaller than the needs to measure the velocity.

In Flowlite we also can change the Voltage of the laser. With a bigger value of

tension the send signal is bigger so also the back signal will be bigger. If it is no need a big value of voltage we should work with a tension of 1000V recommended by Dantec Measurement Technology. How the rise of the voltage affects the signal? If we consider that the intensity of the signal is related with the power of the laser, with  $P=U*I$  and  $I=U/R$  the power of the signal will rise at square of the rising of voltage. So if we rise up the voltage from 1000V to 2000V the send signal will be amplified four times.

The way to work is start with a voltage of 1000V and if the back signal is low we can rise up the voltage and repeat till we find good back signal in the oscilloscope. The oscilloscope has to be connected to the out signal of the U or V component with adequate calibration.

To compare the time that is needed to do the measure I will use 1000 samples and count the time to make the measure. If the time is very low for example less than one second the measure should be done with a smaller value of data validation to get more accuracy or use a dead time sample method. Because measuring in short times will produce measures of unsteady states.

I have compared 5 different scenes mixing different bandwidth and different kinds of smoke production. In each scene I have repeat the same measure five times. The measures have been done three times to compare the repeatability of the measure. The measures that have been done in short time will be more conditioned by the unsteady conditions and the repeatability will be lower.

I have work with the bandwidth of 4MHz and 1.2MHz in the graph because for bigger values of bandwidth than 4Mhz the Flowlite was not able to measure. Then I tried with smaller values of bandwidth and the results have been worst than the one obtained with 1.2 MHz.

As the measures have been done in 2D I can choose two values of bandwidth. The first scene is defined with bandwidth of 4Mhz and 4Mhz and measured with a jet with regular smoke. The second scene was measured with same bandwidth but instead of smoke jet I measured using an air jet with the smoke full of smoke.

All the measures have been done in the plane 2 below the jet zone with the jet normal to the surface.

The third scene was calculated with V component of velocity in a different bandwidth. With that bandwidth the value measured it is wrong because the Flowlite can not read the particles with high velocity. Bandwidth 4Mhz and 1.2Mhz

The forth scene has the same configuration as scene three but we work with an air jet.

The fifth scene has bandwidth of both velocities in 1.2Mhz.

In the graph below we can compare the different scene results. The first scene is considered as the well measured scene and with that we have to compare the others. Comparing first and second scene we notice that the measure is bigger in the second scene. Also the values are more separated. That happened because of the conditional sampling. If do not introduce smoke in the jet the laser Doppler will just measure the particles that come from the bow and mix with the jet. Those particles that can get into the jet are particles with bigger velocity that can go through the jet and they are not representative of the measure so this value is bigger than the expected. The standard

deviation of the particles is constant with jet smoke and without jet smoke. Comparing scene one and three we detect that the SD of the V component is smaller. With a smaller bandwidth we will get always smaller values of the standard deviation of the values. Also the velocity has been reduced because of the problem of the bandwidth.

Comparing scene three and four we do not find difference because the measure of V with the conditional sampling get bigger values. As the bandwidth cut the high values of V the measure is the same in three and both are wrong.

Scene five have both bandwidth at 1.2MHz and the measure of U is totally different from the measures before.

Of this repeatability experiment we can conclude that if the values of a same measure are very constant the measure is being affected by the cut of signal of a low bandwidth. Also we have discovered that a conditional sampling produced by a jet without smoke can affect the measure in many ways.

Repetibility results:

description	Scene	U	V	SD u	SD v	time to measure
4,4 smoke	1	2,1	-2,16	5,9	9,44	28
4,4 smoke	1	1,86	-2,22	5,98	9,29	22
4,4 smoke	1	2,05	-1,35	6,22	9,39	30
4,4 smoke	1	1,79	-1,96	6,1	9,43	22
4,4 smoke	1	2,17	-2,42	5,75	9,22	25
4,4air	2	1,88	-4,25	6,44	9,4	30
4,4air	2	1,9	-4,62	6,39	9,41	30
4,4air	2	1,72	-5,13	6,4	9,38	40
4,4air	2	1,51	-4,13	6,55	9,53	35
4,4air	2	2,01	-2,77	6,33	9,57	30
4,1.2 smoke	3	2,16	-0,72	6,13	2,42	1
4,1.2 smoke	3	2,52	-0,62	6,08	2,43	1
4,1.2 smoke	3	1,98	-0,76	6,19	2,44	2
4,1.2 smoke	3	2,29	-0,74	5,88	2,39	1
4,1.2 smoke	3	2,44	-0,72	6,11	2,42	2
4,1.2 air	4	2,82	-0,7	6,16	2,42	4
4,1.2 air	4	2,59	-0,77	6,31	2,43	3
4,1.2 air	4	2,92	-0,59	6,33	2,46	5
4,1.2 air	4	2,77	-0,75	6,21	2,48	4
4,1.2 air	4	2,86	-0,74	6,55	2,46	4
1.2,1.2 smoke	5	-0,44	-1,64	1,89	2,38	4
1.2,1.2 smoke	5	-0,35	-1,56	1,85	2,46	3
1.2,1.2 smoke	5	-0,34	-1,42	1,91	2,45	5
1.2,1.2 smoke	5	-0,38	-1,56	1,84	2,45	4
1.2,1.2 smoke	5	-0,35	-1,41	1,91	2,51	1

Tabla 9 : Measures realised to study the repeatability of the system

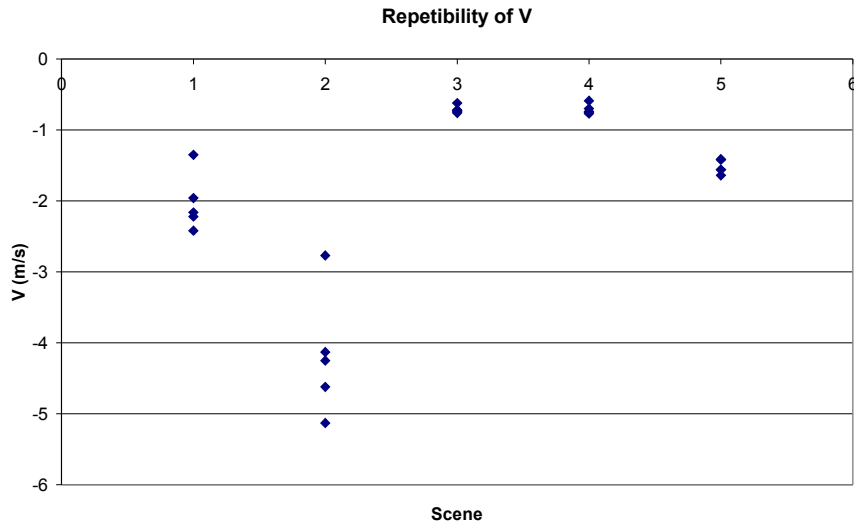


Figura 53: Repeatability of vertical component of velocity

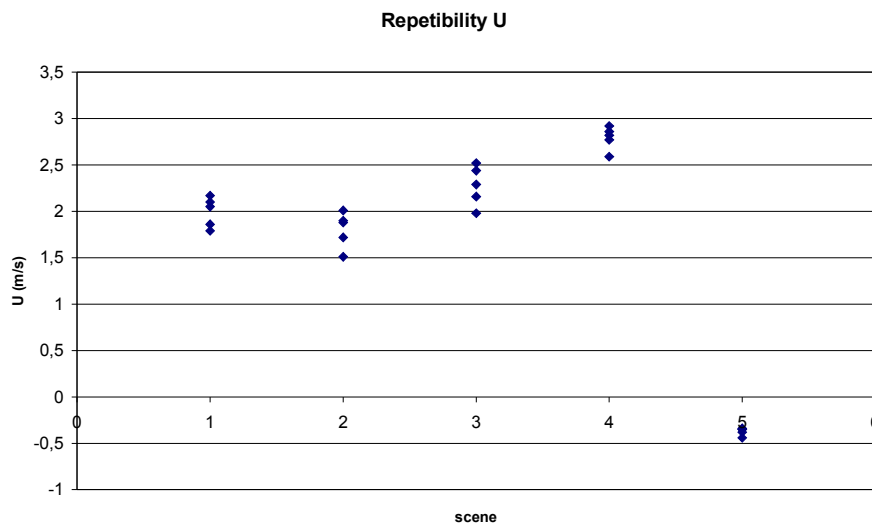


Figura 54: Repeatability of the horizontal component of velocity.

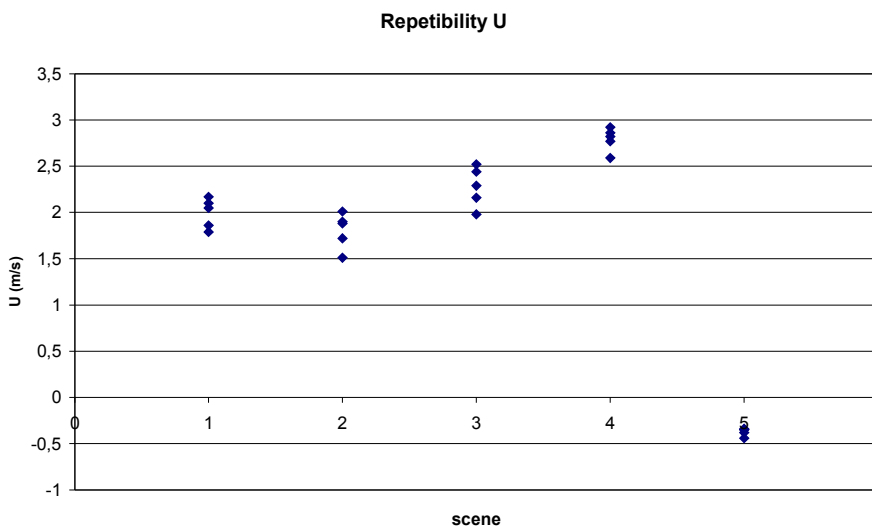


Figura 55: Repeatability on Standard Deviation

About the time expended to do each measure we can say that with less bandwidth you need less time to do the measures. Also with jet smoke we need less time because the concentration of particles is bigger.

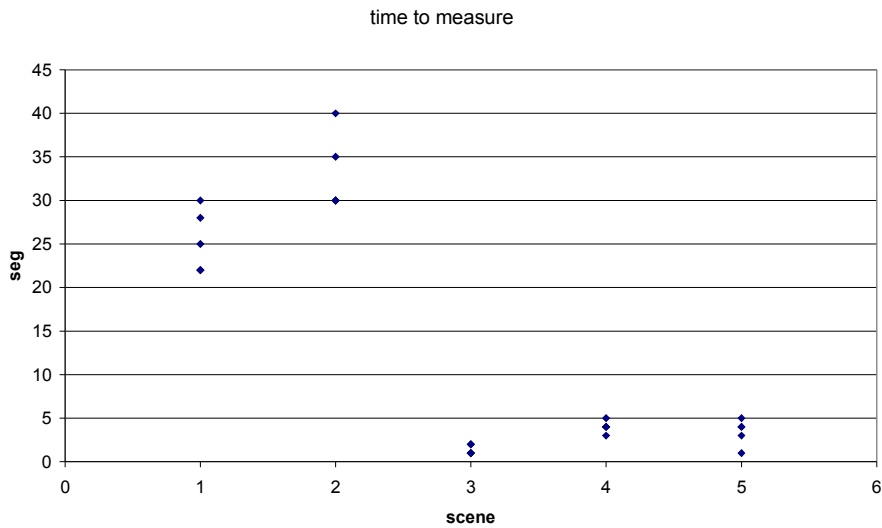


Figura 56: Time needed to do the measure with different configurations

In conclusion we can say that is needed a big value of bandwidth to get good results but if we take big value of bandwidth we will need more and more time. Also we can conclude that the conditional sampling affect the time to do the measure and the value of it.

With a bandwidth of 4Mhz and 4MHz I have repeat the measure with different values of Data validation. I have repeated the measure for data validation equal to -6Db, -5Db and -4Db because for smaller values of Data validation It will never take the measure.

Data validation	Time
-6Db	30sec
-5Db	1minute 50sec
-4Db	12 minutes
-3Db	more than one hour

Tabla 10: Relation between data validation and measuring time with repeatability conditions

The results with different data validation are very similar but the standard deviation of this values is reduced every time that is reduced the data validation.



---

# ANEXO D

## Información y datos del modelo

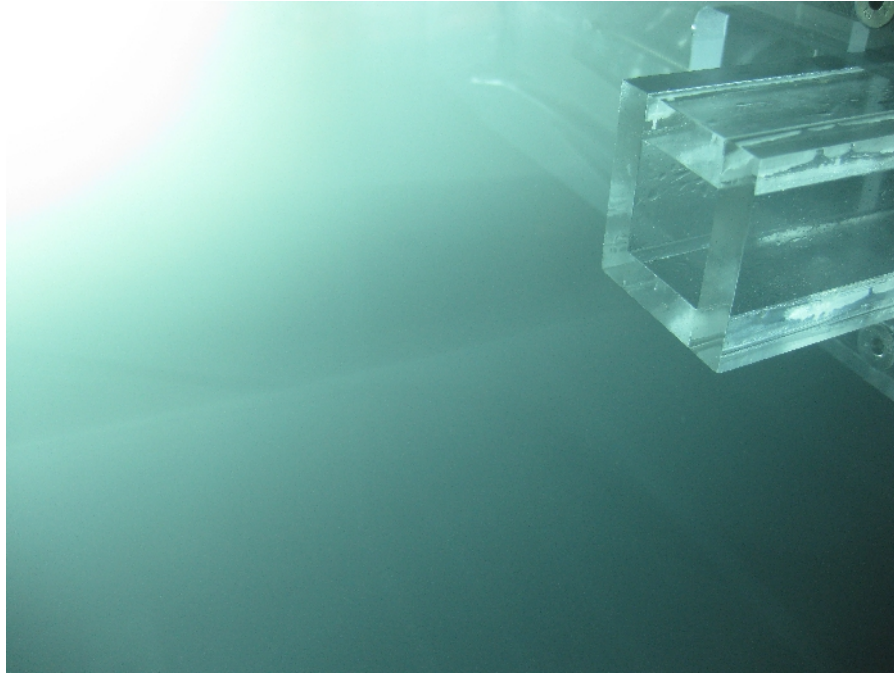
---

### ***D.1.- Model Data***

This model has some data that I have introduced or that I have assumed. First are the dimensions of the model. The model used in the study is a box with a moving wall with predefined dimensions. This model is made of transparent plastic and the dimensions are 70cmx50cmx210cm. The max length that can be used with moving wall is around 180cm.

### ***D.2.- Inlet data***

The inlet of the model is a square duct made of plastic with a thickness of 6mm and an internal size of 21mmx21mm. The inlet has the possibility to be oriented in a horizontal plane. The angle allowed by the inlet is from  $45^\alpha$  to  $-45^\alpha$ .



*Figura 56.: Inlet of the model.*

### **D.3.- Fan data**

The model runs with a fan of variable speed. The speed can change from a speed close to zero to values of 0,5 l/s to values until 16 l/s. The characteristics of the fan are:

Voltage:  $\Delta$ -Y 220-380V

Intensity: 0,73/0,42 A

Fan speed: 2740 U/min

Power: 0,14KW

Pressure:  $\Delta P_s=1180$  Pa

### **D.4.- Light sheet data**

The information of the light sheet that is used to make the photos and the videos is the next that can be find in

[http://www.philips.oprawy.pl/katalogi/katalog\\_opraw/pdf/focus\\_PCV\\_740\\_745\\_eng.pdf](http://www.philips.oprawy.pl/katalogi/katalog_opraw/pdf/focus_PCV_740_745_eng.pdf).

Philips Focus Generator PCV740



Voltage: 200V - 240V / 50 – 60 Hz

Gear: Electronic Driver

Lamp system: Reflector lamp is integrated in aluminium housing

### ***D.5.- Laser Doppler Data***

This focus generator is connected by optic fibre to a group of glass cylinder that produce a light sheet of 4 cm. So the videos and pictures taken shows the movement of the air in a volume equal to the area showed with depth of 4 cm.

The laser Doppler equipment has lot of data that need to be introduced into the Floware. The laser Doppler has many things that have to be introduced in the computer each time that we want to measure. For example we have to adapt the values of the bandwidth and the data validation for each group of measures if we want to get good results in the measures. The way to select the values of input data in the laser Doppler have been determined in the results chapter because it have been necessary do some previously measures to know how to chose that input data. More data of the laser is included in the FlowLite Installation and User's guide.

One important thing when we are choosing the parameters of the laser is the focus length. In this project have been used the length of 160mm which gives the best results. The lens of 500mm which can still get results and the lens of 800mm which rarely get results.

### ***D.6.- Environment Data***

The room in which the model is situated has two big openings to the outside space. The outside space is the Gävle University develop building in Brynas. When the model is working with smoke for more than one hour (depends on the smoke generation intensity) the room gets to much polluted by the smoke and we can't introduce fresh air without particles to watch the difference between the air jet and smoked air in the room. To refresh the ambient in the room we need fifteen minutes with the two openings uncover.

Mateo de Guadalfajara

Zaragoza a 16 de febrero de 2011