



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial**

Diseño de una instalación homologada para ensayo de ventiladores industriales para caudales de hasta 5.800 m³/h

TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y
AUTOMÁTICA**

Autor: Ángel Meseguer Piqueras
Director: Manuel Marcelino Sánchez
Nieto

Cartagena, 23/09/2020



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer todo el apoyo incondicional y ánimo para seguir adelante recibido durante estos años por parte de mis padres, mis hermanos y mi pareja, sin los cuales no habría sido posible llegar hasta aquí.

También agradecer a todos los compañeros y amigos procedentes de todas partes de España, que he conocido en la Universidad Politécnica de Cartagena y que han formado parte de esto en algún momento. Gracias por el compañerismo, las risas en los buenos momentos y el apoyo en los no tan buenos, las horas en la cafetería, las horas en la biblioteca y las interminables tardes en los laboratorios.

Y especialmente darle las gracias a mi tutor Manuel M. Sánchez Nieto, por todo lo que me brindó en mi carrera, por el apoyo prestado en la elaboración de este proyecto y su ayuda en todo momento en esta situación excepcional de pandemia mundial por el Covid-19.

Gracias por hacer que todos estos años fuera de casa merecieran la pena.

Índice

Índice de términos, símbolos, subíndices y abreviaturas.....	7
Términos.....	7
Símbolos y abreviaturas.....	8
Subíndices	9
Capítulo 1 - Introducción.....	11
Capítulo 2 - Objetivos y alcance del proyecto.....	12
Capítulo 3 - Categorías de instalación y configuraciones de ensayo.....	13
3.1 Generalidades	13
3.2 Categorías de instalación	13
3.3 Instalación de ensayos base.....	15
Capítulo 4 - Análisis energético de los elementos de la instalación.....	21
4.1 Compensación de pérdidas para un segmento común de entrada (iCS)	22
4.2 Compensación de pérdidas para un segmento común de salida.....	23
4.2.1 Con un enderezador de estrella (oCS) _{star}	23
4.2.2 Con un enderezador de celdas (oCS) _{cell}	23
4.3 Compensación de pérdidas para conductos largos (LD).....	24
4.3.1 Con un enderezador de estrella (LD) _{star}	24
4.3.2 Con un enderezador de celdas (LD) _{cell}	24
4.4 Cálculo de las pérdidas de los elementos de una instalación de ensayo.....	24
4.4.1 Pérdidas en un segmento común de entrada (iCS)	24
4.4.2 Pérdidas en un segmento común de salida (oCS).....	26
4.4.3 Pérdidas en un conducto largo (LD).....	27
4.4.4 Pérdidas en una cámara de ensayo (iTC y oTC).....	27
4.5 Análisis energético del banco de ensayo base.....	33
4.5.1 Cálculo del caudal másico.....	33
4.5.2 Cálculo de la presión del ventilador auxiliar	34
Capítulo 5 - Sistema de medición y captación de datos.....	45
5.1 Introducción	45
5.2 Medición de las distintas variables	45
5.2.1 Temperatura.....	45
5.2.1.1 Especificaciones técnicas de la sonda de temperatura A2G-60.....	47
5.2.2 Caudal de aire	47
5.2.3 Presión.....	49
5.3 Sistema de adquisición de datos.....	50
5.3.1 Elementos que componen el sistema de adquisición de datos.....	51
5.4 Software para la adquisición de datos Agilent BenchLink Data Logger..	53

Capítulo 6 - Conclusiones	54
Capítulo 7 - Bibliografía	55
Anexo A - Determinación del caudal de aire	56
A.1 Generalidades	56
A.2 Caudalímetros en línea	56
A.3 Métodos por exploración del campo de velocidades	57
A.4 Determinación del caudal utilizando toberas múltiples	57
A.4.1 Instalación	57
A.4.2 Forma geométrica	58
A.4.3 Cálculo del caudal másico	59
A.4.4 Características de las toberas múltiples	59
A.4.5 Incertidumbre	62
A.5 Determinación del caudal utilizando una entrada cónica o boca de campana	62
A.5.1 Instalación	62
A.5.2 Forma geométrica	62
A.5.3 Cálculo del caudal másico	63
A.5.3.1 Generalidades	63
A.5.3.2 Características de las entradas cónicas	63
A.5.3.3 Características de la entrada con boca de campana	63
A.5.4 Incertidumbres	63
A.6 Determinación del caudal utilizando un diafragma	64
A.6.1 Instalación	64
A.6.2 Forma geométrica	64
A.6.3 Cálculo del caudal másico	65
Anexo B - Diferentes componentes en una instalación de laboratorio	66
B.1 Circuitos aerodinámicos para simulación de conductos	66
B.1.2 Segmento común a la entrada del ventilador (iCS)	66
B.1.3 Conducto de simulación de entrada (iDS)	68
B.1.4 Segmento común en la salida del ventilador (oCS)	69
B.1.5 Conducto de simulación de salida (oDS)	70
B.1.6 Conducto largo (LD)	70
B.2 Recinto de ensayos de entrada y salida: ITS y oTS	71
B.3 Sistema de alimentación variable	72
B.3.1 Dispositivo de regulación de caudal	73
B.3.2 Ventiladores auxiliares	73
B.4 Enderezadores	73
B.4.1 Enderezador de celdas	73

B.4.2	Enderezador de estrella.....	74
B.5	Piezas de transición.....	75
B.5.1	Transición rectangular/circular	76
B.5.2	Transición circular/circular	76
B.6	Cámaras de ensayo normalizadas	77
B.6.1	Cámaras de ensayo de entrada normalizadas (iTC)	77
B.6.1.1	Ventilador a ensayar	79
B.6.2	Cámaras de ensayo de salida normalizadas (oTC).....	79
B.6.2.1	Ventilador a ensayar	80
Anexo C	- Ensayos verificación cámaras de ensayo normalizadas.....	82
C.1	Verificación del anillo piezométrico	82
C.2	Prueba de verificación por soplado	82
C.3	Ensayo de verificación de inversión de flujo de aire en la cámara de salida ⁸³	
Anexo D	- Procedimiento de ensayo de fugas en una cámara	84
D.1	Método de la caída de presión	84
D.2	Método del caudalímetro	85
D.3	Método de dos fases.....	86
D.3.1	Generalidades.....	86
D.3.2	Primera fase	86
D.3.3	Segunda fase	87
Anexo E	- Condiciones de referencia	88
Anexo F	- Curvas características de los ventiladores.....	89
F.1	Métodos de trazado	89
F.2	Curva característica completa del ventilador.....	89
F.3	Ensayo para un punto de funcionamiento específico	89
F.4	Problemas por impulsar un caudal distinto al nominal de la instalación en instalaciones a caudal constante.....	91
F.4.1	Caudal inferior al nominal	91
F.4.2	Caudal superior al nominal	91
F.5	Regulación del punto de funcionamiento	91
F.5.1	Regulación por estrangulamiento con compuerta en serie	91
F.5.2	Regulación por by-pass	92
F.5.3	Regulación por variación del régimen de giro.....	92
Anexo G	- Reglas para la conversión de los resultados de los ensayos.....	93
G.1	Generalidades	93
G.2	Leyes de semejanza de los ventiladores	93
G.2.1	Generalidades	93

G.2.2 Semejanza geométrica	93
G.2.4 Número de Mach	94
Anexo H - Local y realización del ensayo	95
H.1 Local de ensayo	95
H.2 Fugas	95
H.3 Fluido utilizado	95
H.4 Velocidad de rotación	95
H.5 Funcionamiento estable	96
H.6 Condiciones ambientes	96
H.7 Lecturas de presión	96
H.8 Ensayos para un punto de funcionamiento específico	96
H.9 Ensayos para obtener la curva característica del ventilador	96

Índice de términos, símbolos, subíndices y abreviaturas

Términos

Ventilador Máquina de álabes giratorios que recibe energía mecánica y la utiliza mediante uno o más rodets dotados de álabes para mantener un caudal continuo de aire que pasa a través de ellos, y cuyo trabajo por unidad de masa normalmente no excede 25 kJ/kg.

Aire normal Por convención, aire con una densidad de 1,2kg/m³.

Instalación de categoría A Instalación con aspiración libre y descarga libre con un tabique.

Instalación de categoría B Instalación con aspiración libre y descarga en conducto.

Instalación de categoría C Instalación con aspiración en conducto y descarga libre.

Instalación de categoría D Instalación con aspiración en conducto y descarga en conducto.

Instalación de categoría E Instalación con aspiración libre y descarga libre sin ningún tabique.

Ventilador en conducto Ventilador utilizado para desplazar el aire en el interior de un conducto.

Ventilador de tabique Ventilador utilizado para mover el aire de un espacio libre a otro, separado del primero por un tabique que tiene una abertura en la cual o sobre la cual se instala el ventilador.

Ventilador centrífugo Ventilador en el cual el aire entra en el rodete en dirección esencialmente axial y sale en una dirección perpendicular al eje.

Ventilador de flujo axial Ventilador en el cual el aire entra y abandona el rodete a lo largo esencialmente de superficies cilíndricas coaxiales al ventilador.

Aspiración del ventilador Abertura, generalmente circular o rectangular, a través de la cual el aire penetra en la carcasa del ventilador

Descarga del ventilador Abertura, generalmente circular o rectangular, a través de la cual el aire abandona finalmente la carcasa del ventilador.

Símbolos y abreviaturas

iCS	Segmento común en la entrada del ventilador a ensayar
iDS	Conducto de simulación en la entrada del ventilador a ensayar
iLD	Longitud de contacto en la entrada del ventilador a ensayar
iTC	Cámara de ensayo en la entrada del ventilador a ensayar
iTS	Espacio libre de ensayo en la entrada del ventilador a ensayar
oCS	Segmento común en la salida del ventilador a ensayar
oDS	Conducto de simulación en la salida del ventilador a ensayar
oLD	Longitud de conducto en la salida del ventilador a ensayar
oTC	Cámara de ensayo en la salida del ventilador a ensayar
oTS	Espacio libre de ensayo en la salida del ventilador a ensayar
F	Ventilador a ensayar
VSS	Sistema de alimentación variable
iNZ	Tobera en la entrada
dNZ	Tobera en el conducto
mNZ	Tobera múltiple
cOR	Diafragma en la cámara
dOR	Diafragma en el conducto
iOR	Diafragma en la entrada
oOR	Diafragma en la salida
b	anchura de una sección de conducto rectangular
c	Velocidad del sonido en un punto
C_p	Calor específico a presión constante
C_v	Calor específico a volumen constante
C	Coeficiente de descarga
d	Diámetro, por ejemplo, del orificio de un diafragma o tobera
D	Diámetro
D_h	Diámetro hidráulico
f_M	Factor de Mach para la corrección de la presión dinámica
g	Aceleración de la gravedad
h	Altura de la sección del conducto rectangular
h_{rel}	Humedad relativa
H_h	Profundidad hidráulica media
L	Longitud de un conducto
Ma	Número de Mach
Ma_u	Número de Mach periférico
n	Frecuencia de giro del rodete
N	Velocidad del rodete
p	Presión absoluta
p_e	Presión manométrica media
p_f	Presión del ventilador
p_{fd}	Presión dinámica del ventilador
p_{fs}	Presión estática del ventilador
P_a	Potencia mecánica en el eje del ventilador

P_e	Potencia consumida por el motor
P_{ed}	Potencia eléctrica consumida por el control de accionamiento
P_o	Potencia suministrada por el motor
P_r	Potencia mecánica en el rodete del ventilador
P_u	Potencia aerodinámica del ventilador
q_m	Caudal másico
q_{Vsg1}	Caudal volumétrico del ventilador en las condiciones de estancamiento
q_{V1}	Caudal volumétrico del ventilador
R	Constante específica del gas
Re_d	Número de Reynolds con un diámetro interior
Re_D	Número de Reynolds
Re_u	Número de Reynolds periférico
t	Tiempo
T	Temperatura
v	Velocidad media del aire
u	Velocidad punta del rodete
α	Coefficiente del caudal de un sistema de medida en línea
Δp	Presión diferencial
ε	Coefficiente de regulación
ξ	Coefficiente de pérdidas
$(\xi_{n-x})_n$	Coefficiente de pérdidas entre las secciones n y x calculado para la sección x
η	Rendimiento
θ	Temperatura absoluta
Λ	Coefficiente de pérdidas por fricción para un conducto recto
μ	Viscosidad dinámica
ρ	Densidad

Subíndices

1	Entrada del ventilador a ensayar
2	Salida del ventilador a ensayar
3	Sección de medición de presión en el lado de entrada del circuito
4	Sección de medición de presión en el lado de salida del circuito
5	Tomas de presión en el cuello o aguas abajo para la medición de Δp en el caudal de entrada
6	Tomas de presión aguas arriba para la medición de Δp y p_{up} en el caudal de salida
7	Tomas de presión aguas arriba para la medición de Δp y p_{up} en el caudal de entrada
8	Tomas de presión en el cuello o aguas abajo para la medición de Δp en el caudal de salida
a	Condiciones ambientales en el local de ensayo
aux	Auxiliar
b	Barómetro

do	Aguas debajo de un sistema de medida de caudal
up	Aguas arriba de un sistema de medida de caudal
eq	Equivalente
f	Ventilador
h	Hidráulico
L	Grande
m	Valor medio aritmético entre las secciones transversales de entrada y salida del ventilador a ensayar
max	Máximo
min	Mínimo
n	Plano de referencia del ventilador; n = 1 para la entrada, n = 2 para la salida
r	Rodete
ref	Referencia
s	Condiciones estáticas
S	Pequeño
sat	Condiciones de saturación
sg	Condiciones de estancamiento
tot	Total
x	Sección y valor medio acumulado, a lo largo del tiempo, en la superficie de la sección transversal del conducto aerodinámico.

Capítulo 1 - Introducción

Hace muchos años que se demostró que los códigos establecidos para el ensayo aerodinámico de ventiladores en distintos países no siempre conducen a los mismos resultados.

Desde hace tiempo ha sido evidente la necesidad de una norma internacional y por ello el Comité Técnico ISO/TC 117 comenzó su trabajo en 1963, para elaborar la norma internacional UNE-EN ISO 5801. Durante las sucesivas ediciones se consiguió reorganizar los contenidos de la misma para definir y permitir todas las configuraciones posibles de los componentes definidos como configuraciones de ensayo normalizadas.

He estudiado detenidamente esta Norma, entre otras, para poder realizar el diseño y análisis energético de una instalación de ensayo concreta.

Del presente trabajo concluyen mis estudios realizados en la Universidad Politécnica de Cartagena siguiendo el plan de estudios BOE 30-11-2011 en la titulación de Grado en Ingeniería Electrónica industrial y automática para la obtención del título.

Capítulo 2 - Objetivos y alcance del proyecto

La caracterización de ventiladores industriales está evolucionando con gran rapidez. Estos cambios se reflejan en las nuevas ediciones de la norma ISO 5801 que están publicándose cada dos años. Se diseñará una instalación de prueba de ventiladores industriales adaptada a la última versión de la normativa. Además se diseñará un bucle de control de la instalación con capacidad para captación y tratamiento de datos.

Los objetivos esenciales de este trabajo son los siguientes:

- El objetivo más importante perseguido con este proyecto es el estudio a fondo de la Norma UNE-EN ISO 5801:2017, para conocer de primera mano cuál es su funcionamiento y cuáles son sus capacidades en caso de tener que implementarla.
- Determinación de las características de los ventiladores de todos los tipos excepto aquellos diseñados únicamente para generar circulación de aire. (véase capítulo 3).
- Diseño de una instalación con la que podemos construir configuraciones de ensayo de varias categorías debido a su gran flexibilidad y a su fácil montaje (véase capítulo 3).
- Análisis energético de cada una de las configuraciones de ensayo posibles. (véase capítulo 4).
- Diseño del bucle de control para el tratamiento y adquisición de datos (véase capítulo 5).

Capítulo 3 - Categorías de instalación y configuraciones de ensayo

En este capítulo describiré cómo la conexión de un conducto a la salida y, o entrada de un ventilador modifica sus características, siendo necesario distinguir entre las distintas categorías de instalación.

3.1 Generalidades

Según la Norma UNE-EN ISO 5801:

El límite superior de trabajo de un ventilador es 25.000 Kj/kg, lo que corresponde a un incremento de la presión del ventilador de aproximadamente 30Kpa, para una densidad media en el ventilador de $1,2\text{Kg/m}^3$.

El fluido de trabajo para los ensayos en circuitos normalizados debe ser aire atmosférico, y la presión y la temperatura deben estar dentro del rango atmosférico normal.

3.2 Categorías de instalación

En la norma ISO 13349 e ISO 5801 se definen cinco categorías de instalación de ventiladores.

- Categoría de instalación A

Aspiración libre y descarga libre.

En este caso se utiliza una cámara de ensayos de entrada o de salida, como se define en el anexo B.

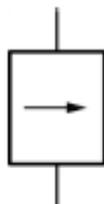


Figura 3.2.1 - Categoría de instalación A

- Categoría de instalación B

Aspiración libre y descarga en conducto.

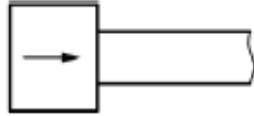


Figura 3.2.2 – Categoría de instalación B

- Categoría de instalación C

Aspiración en conducto y descarga libre.



Figura 3.2.3 – Categoría de instalación C

- Categoría de instalación D

Aspiración en conducto y descarga en conducto.

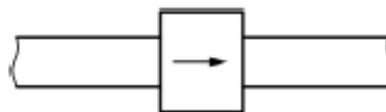


Figura 3.2.4 – Categoría de instalación D

- Categoría de instalación E

Aspiración libre y descarga libre sin tabique. Estamos dentro de un mismo ambiente donde colocamos el ventilador en un cierto punto para que mueva el aire.



Figura 3.2.5 – Categoría de instalación E

En la clasificación anterior, los términos tienen los siguientes significados:

La aspiración o descarga libre significa que el aire entra o sale del ventilador directamente desde o hacia la atmósfera sin obstrucciones. La aspiración o descarga en conducto significa que el aire entra o sale del ventilador a través de un conducto directamente conectado a la entrada o salida del ventilador, respectivamente.

En este documento, y siguiente la Norma UNE-EN ISO 5801, se indican métodos de medición y cálculo para los caudales, las presiones y los rendimientos de los ventiladores considerando todos los efectos de compresibilidad del aire. Para una presión del ventilador inferior a 2000 Pa se puede ignorar la variación de densidad entre la entrada y la salida del ventilador. Otros efectos de compresibilidad se pueden ignorar para valores de velocidad de a inferiores o iguales a 65 m/s (véase Anexo E).

3.3 Instalación de ensayos base

La Norma UNE-EN ISO 5801 agrupa las configuraciones de ensayo en función de la categoría de instalación a la que pertenecen. Así, la categoría de instalación A tiene configuraciones de ensayo desde la A-01 hasta la A-05. La categoría de instalación B desde la B-01 hasta la B-09, la categoría de instalación C desde la C-01 hasta la C-09, y la categoría de instalación D desde la D-01 hasta la D-16.

Estudiando las configuraciones de ensayo que cita la Norma UNE-EN ISO 5801, nos damos cuenta de que se pueden sintetizar en 8 grandes grupos, que no tienen en común la categoría de instalación a la que pertenecen, si no la aspiración o descarga libre, entubada, desde o hacia una cámara de ensayo.

Se distinguen 8 grandes grupos de configuraciones posibles:

- 1) Con cámara de ensayo en la salida

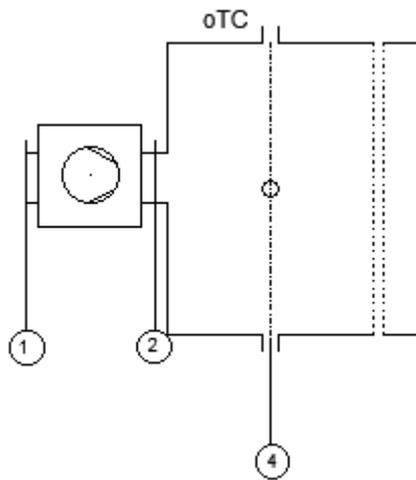


Figura 3.3.1 – Grupo 1 de configuraciones de ensayo

- 2) Con cámara de ensayo en la entrada

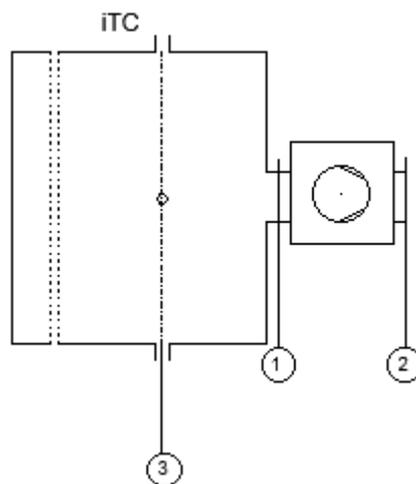


Figura 3.3.2 – Grupo 2 de configuraciones de ensayo

3) Con cámara de ensayo en la entrada y en la salida

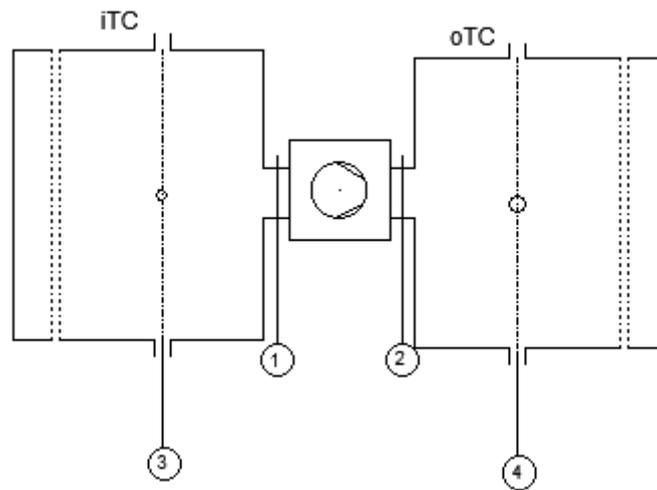


Figura 3.3.3 – Grupo 3 de configuraciones de ensayo

4) Con descarga entubada

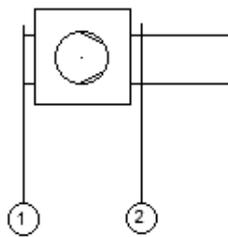


Figura 3.3.4 – Grupo 4 de configuraciones de ensayo

5) Con cámara de ensayo en la entrada y descarga entubada

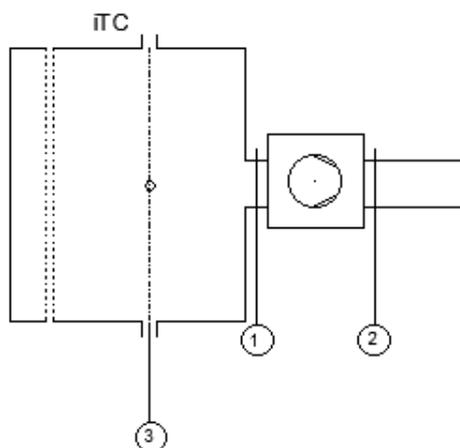


Figura 3.3.5 – Grupo 5 de configuraciones de ensayo

6) Con aspiración entubada

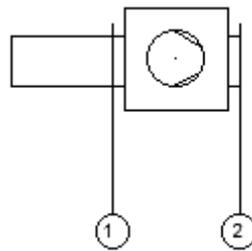


Figura 3.3.6 – Grupo 6 de configuraciones de ensayo

7) Con aspiración entubada y cámara de ensayo en la salida

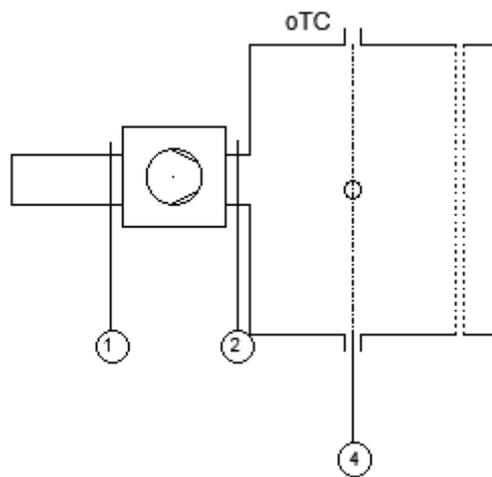


Figura 3.3.7 – Grupo 7 de configuraciones de ensayo

8) Con aspiración entubada y descarga entubada

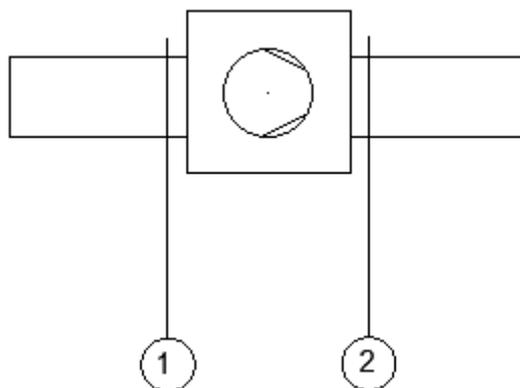


Figura 3.3.8 – Grupo 8 de configuraciones de ensayo

Los grupos de configuraciones 1, 2 y 3 se emplearán para las instalaciones de categorías A, B, C, y D.

Con el fin de habilitar estas configuraciones para categorías de instalación:

- Tipo A, el ventilador se ensayará sin ningún tipo de conducto de entrada o de salida.
- Tipo B, se acoplará al ventilador un conducto de salida.
- Tipo C, se acoplará un conducto a la entrada.
- Tipo D, se acoplará un conducto a la salida y otro a la entrada del ventilador.

Los grupos de configuraciones 4 y 5 se emplearán para ensayos de instalaciones de categorías B y D. Con el fin de habilitar las figuras para la categoría de instalación D se añadirá un conducto en la entrada del ventilador.

Los grupos de configuraciones 6 y 7 se emplearán para ensayos de instalaciones de categorías C y D. Con el fin de habilitar las figuras para la categoría de instalación D se añadirá un conducto en la salida del ventilador.

El grupo de configuraciones 8 se utilizará para el ensayo de instalaciones categoría D.

Por tanto, las más flexibles para el ensayo con ventiladores industriales son las configuraciones 1, 2 y 3, capaces de realizar todos los conexionados.

La siguiente figura representa nuestra instalación de ensayos base. Elegida por pertenecer al grupo de configuraciones de ensayos más flexible, permitiéndonos montar configuraciones de ensayo de categorías de instalación A, B, C y D, pensando en que estamos trabajando con un banco pequeño, pero que tenemos la posibilidad de hacerlo con uno más grande, donde construir nuevas piezas resulta antieconómico.

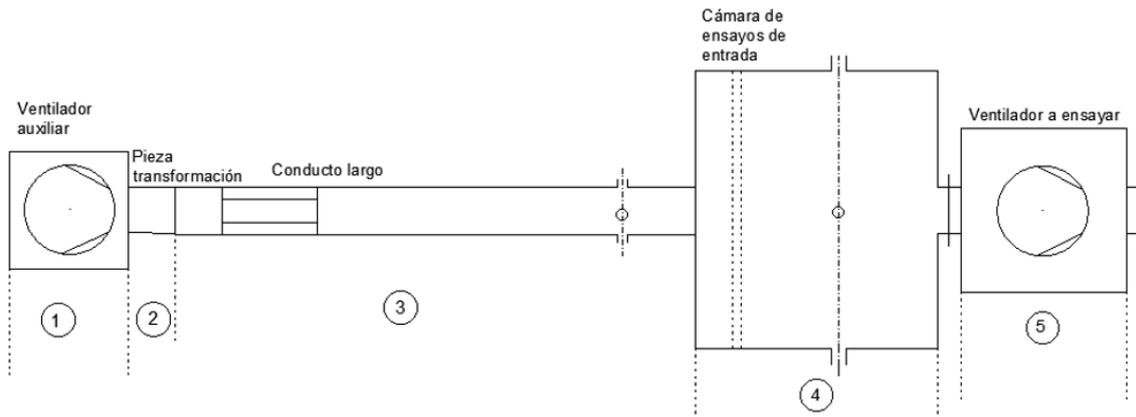


Figura 4.5.1 – Instalación de ensayos base

Donde

- 1) Ventilador auxiliar
- 2) Pieza de transformación
- 3) Conducto largo, formado por: la pieza de unión entre la pieza de transformación y el enderezador, el enderezador tipo estrella, la pieza de unión entre el enderezador y el anillo piezométrico, y el anillo piezométrico.
- 4) Cámara de ensayo de entrada
- 5) Ventilador a ensayar

En la siguiente hoja de cálculo muestro las dimensiones de cada una de las piezas de la instalación de ensayo.

	Diámetro	200 mm							
	Longitud	3266,83 mm							
	Caudal Máx	1,60 m³/s		5.760 m³/h					
Pieza	1	2	3	4	5	6	7	8	
Elemento	Vent.Aux	Pieza transf.	Pre-Enderezador	Enderezador	Pre-Piezométrico	Piezométrico	Pre-Cámara	Cámara	
Diámetro		200	200	200	200	200	200	560,0	
Longitud		200	600	400	1000	200	300	566,83	
		Pieza transf.	Conducto largo					Cámara	

Capítulo 4 - Análisis energético de los elementos de la instalación

Los ventiladores deberán ser capaces de vencer las pérdidas energéticas en la red de conductos producidas por la fricción del aire en la red y por las pérdidas en accesorios que incluyen la energía cinética del flujo en los difusores. A continuación se definen ambos tipos de pérdidas:

- 1 Pérdidas de carga primarias, longitudinales o mayores. Se produce una disipación viscosa por rozamiento a nivel molecular con la pared del tubo. Tienen lugar en tramos rectilíneos de sección constante y en tramos con variaciones graduales de dirección y/o sección. Mayoritarias en redes de distribución muy extensas (>90%).
- 2 Pérdidas de carga secundarias, locales o menores. Se producen por fricción en vórtices generados por desprendimiento de la capa límite. Aparecen en tramos con cambios de sección o de dirección bruscos. Son minoritarias en redes extensas, pero importantes en redes pequeñas.

Los valores convencionales indicados en este capítulo se deben considerar para calcular las pérdidas en los ensayos con circuitos aerodinámicos normalizados.

Los coeficientes de pérdidas por fricción para un conducto se pueden basar en el diámetro hidráulico o en la profundidad hidráulica media. La figura 9 indica los valores para conductos lisos.

El coeficiente de pérdidas por fricción se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\Lambda = 0,005 + 0,42(\text{Re}_{D3})^{-0,3}$$

Donde Λ es el coeficiente de pérdidas por fricción para un conducto recto de longitud igual a un diámetro.

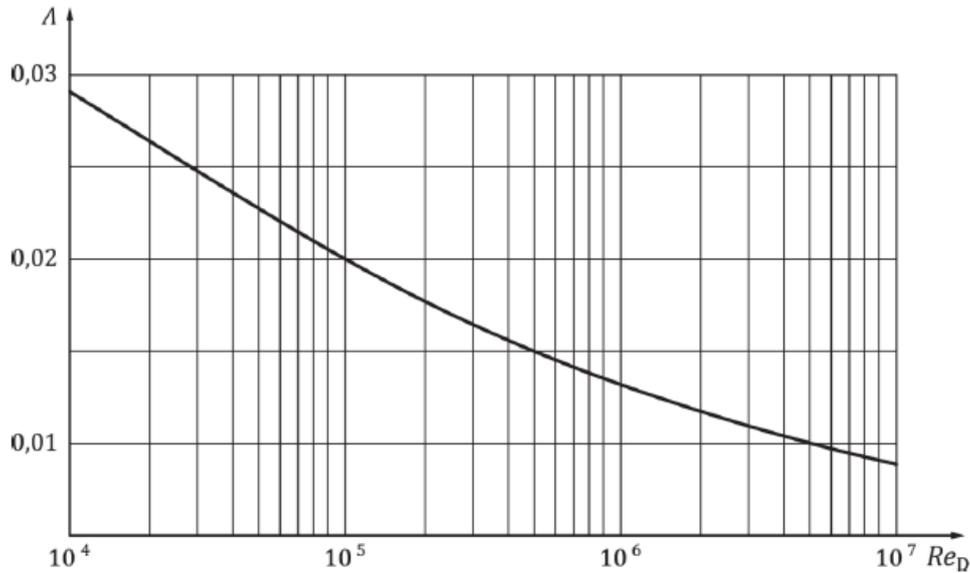


Figura 4 – Coeficiente de pérdidas para un conducto recto de longitud igual a un diámetro

Las compensaciones se calculan para los segmentos comunes de entrada descritos en el anexo B.1.2, los segmentos comunes de salida descritos en el anexo B.1.4 y los conductos largos descritos en el anexo B.1.6 entre el ventilador y el plano de medición de presión. Cuando se incorporen secciones de transición se deben realizar las mismas compensaciones. En los conductos de simulación de entrada o de salida no se admiten pérdidas.

4.1 Compensación de pérdidas para un segmento común de entrada (iCS)

El coeficiente de pérdida convencional $(\xi_{3-1})_3$ entre el plano de medición 3 y la entrada del ventilador se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$(\xi_{3-1})_3 = 0,015 + 1,26(Re_{D3})^{-0,3}$$

Donde

$$Re_{D3} = \frac{v_{m3} D_3 \rho_3}{\mu_3} \approx \frac{v_{m3} D_3}{15} \times 10^6$$

para aire normalizado.

Las pérdidas de energía entre los planos 3 y 1 se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta p_{3-1} = (\xi_{3-1})_3 \frac{\rho_3 v_{m3}^2}{2} f_{M3}$$

4.2 Compensación de pérdidas para un segmento común de salida

4.2.1 Con un enderezador de estrella (oCS)_{star}

El coeficiente de pérdidas convencional del enderezador de estrella, incluido el conducto exterior, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\xi = 0,95 \cdot (Re_{D4})^{-0,12}$$

con

$$Re_{D4} = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot D_4 \cdot \mu_4}$$

El coeficiente de pérdidas convencional $(\xi_{2-4})_4$ entre la salida del ventilador 2 y el plano de medición 4 se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$(\xi_{2-4})_{4\text{-star}} = \Lambda \cdot \frac{L_{2-4}}{D_{h4}} + \xi_{\text{star}}$$

donde

L_{2-4} = es la longitud del conducto entre la salida del ventilador 2 y la sección de medición 4;

Λ es el coeficiente de pérdidas por fricción para un conducto recto de longitud igual a un diámetro calculado mediante $\Lambda = 0,005 + 0,42(Re_{D4})^{-0,3}$.

4.2.2 Con un enderezador de celdas (oCS)_{cell}

El coeficiente de pérdidas por fricción, Λ , para un conducto recto de longitud igual a un diámetro se indica en el apartado 9.2.1.

La relación de longitud equivalente de un enderezador de celdas con un diámetro hidráulico D_h del conducto se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{L_{\text{eq}}}{D_h} = \frac{15,04}{\left[1 - 26,65 \cdot \frac{e}{D_h} + 184,6 \cdot \left(\frac{e}{D_h} \right)^2 \right]^{1,83}}$$

donde

e es el espesor de la pared.

El coeficiente de pérdida convencional $(\xi_{2-4})_{4.\text{cell}}$ se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$(\xi_{2-4})_{4.cell} = \lambda \cdot \left[\frac{L_{2-4}}{D_{h4}} + \frac{L_{eq}}{D_{h4}} \right]$$

donde

L_{2-4} es la longitud del conducto entre la salida del ventilador 2 y la sección de medición 4.

4.3 Compensación de pérdidas para conductos largos (LD)

4.3.1 Con un enderezador de estrella (LD)_{star}

Se deben aplicar los cálculos del apartado 9.2.1

4.3.2 Con un enderezador de celdas (LD)_{cell}

Se deben aplicar los cálculos del apartado 9.2.2

4.4 Cálculo de las pérdidas de los elementos de una instalación de ensayo

En este apartado calcularé las pérdidas de carga de los distintos elementos mencionados anteriormente, para un diámetro $D=200\text{mm}$ del ventilador

4.4.1 Pérdidas en un segmento común de entrada (iCS)

El número de Mach límite a partir del cual se producen efectos de compresibilidad debido a la velocidad del aire es 0,15. Usando esta condición obtengo, a partir de la fórmula de Mach, la velocidad máxima del flujo de aire.

$$\text{Ma} = \frac{V}{c}$$

$$0,15 \geq \frac{V}{343,8}$$

$$V \leq 51,57 \text{ m/s}$$

La velocidad límite por encima de la cual debemos considerar los efectos de compresibilidad del aire se expresa según la siguiente fórmula:

$$V_{2,\text{ref}} = \frac{q_{m,\text{max}}}{\rho_{\text{ref}} \cdot A_2}$$

Con

$$A_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,0314\text{m}^2$$

$$\rho_{\text{ref}} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$q_v = q_{m,\text{max}} \cdot \rho$$

$$q_{v,\text{max}} = 1,62 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

El coeficiente de pérdidas convencional entre el plano de medición 3 y la entrada del ventilador es:

$$(\xi_{3-1})_3 = 0,015 + 1,26(Re_{D3})^{-0,3}$$

Con

$$Re_D = \frac{V_m \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{51,57 \cdot 0,2 \cdot 1,2}{18,06 \cdot 10^{-6}} = 6,853 \cdot 10^5$$

$$(\xi_{3-1})_3 = 0,0374$$

Finalmente las pérdidas de energía entre los planos 3 y 1 se calculan, para un conducto recto de longitud igual a un diámetro, así:

$$\Delta P_{3-1} = (\xi_{3-1})_3 \cdot \frac{\rho \cdot 3 \cdot V_m^2}{2} \cdot f_{M3}$$

La Norma 5801 dice que la longitud de un segmento común a la entrada del ventilador debe ser cuatro veces el diámetro de entrada del ventilador a ensayar, por tanto:

$$\Delta P_{3-1} = (\xi_{3-1})_3 \cdot \frac{\rho \cdot 3 \cdot Vm^2}{2} \cdot f_{M3} \cdot \frac{L_{transf}}{D_1}$$

Con

$$f_{M3} = \frac{P_{sg} - P}{P_d} = \frac{P(1 + \frac{k-1}{2} \cdot Ma^2)^{\frac{k}{k-1}} - P}{\rho \cdot \frac{V^2}{2}} = 1,00575$$

$$\Delta P_{3-1} = 0,0374 \cdot \frac{1,2 \cdot 3 \cdot 51,57^2}{2} \cdot 1,00575 \cdot \frac{L_{transf}}{D_1} = 179.035 \text{ Pa}$$

4.4.2 Pérdidas en un segmento común de salida (oCS)

Según la Norma 5801, la longitud de un segmento común en la salida del ventilador debe ser:

$$L_{oCS} = 6 \cdot D_1$$

El coeficiente de pérdidas convencional del enderezador de estrella, incluido el conducto exterior, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\xi = 0,95 \cdot (Re_{D4})^{-0,12}$$

Con

$$Re_{D4} = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot D_4 \cdot \mu_4} = \frac{4 \cdot q_v \cdot \rho}{\pi \cdot 0,2 \cdot 18,06 \cdot 10^{-6}} = 6,852 \cdot 10^5$$

$$\xi = 0,95 \cdot (6,852 \cdot 10^5)^{-0,12} = 0,1894$$

El coeficiente de pérdidas convencional $(\xi_{2-4})_4$ entre la salida del ventilador 2 y el plano de medición 4 se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$(\xi_{2-4})_{4 \cdot star} = \Lambda \cdot \frac{L_{2-4}}{D_{h4}} + \xi_{star}$$

Donde

L_{2-4} es la longitud del conducto entre la salida del ventilador 2 y la sección de medición 4

Λ es el coeficiente de pérdidas por fricción para un conducto recto de longitud igual a un diámetro, calculado mediante

$$\Lambda = 0,005 + 0,42(\text{Re}_{D4})^{-0,3} = 0,01245$$

$$(\xi_{2-4})_{4\cdot\text{star}} = 0,01245 \cdot \frac{1,2}{0,2} + 0,1894 = 0,264$$

Finalmente, las pérdidas de un segmento común en la salida del ventilador, de longitud $6D_1$ y diámetro D_1 son:

$$\Delta P_{2-4} = (\xi_{2-4})_{4\cdot\text{star}} \cdot \frac{\rho \cdot 3 \cdot V_m^2}{2} \cdot f_{M4} = 1271,67 \text{ Pa}$$

4.4.3 Pérdidas en un conducto largo (LD)

Se deben aplicar los cálculos del apartado 9.4.2.

Con una longitud de $11,5D_1$:

$$\Delta P_{LD} = 1592,04 \text{ Pa}$$

Con una longitud de $10D_1$:

$$\Delta P_{LD} = 1502,65 \text{ Pa}$$

4.4.4 Pérdidas en una cámara de ensayo (iTC y oTC)

Las pérdidas de una cámara de ensayo normalizada se concentran en el uniformizador, cuya misión es asegurar un flujo de aire uniforme en el plano de medida. Está construido por tres pantallas de malla cuadrada construidas con alambre de sección circular donde la superficie libre de paso de aire es del 60%, 50% y 45% con una distancia entre ellas de $0,1D_1$.

Obtengo la ecuación que expresa la variación de carga en función del caudal combinando el balance de potencia en régimen permanente con el balance de masa en un dispositivo horizontal consistente en una reducción de sección, una zona de garganta y un ensanchamiento gradual hasta recuperar la sección original.

$$Q = \alpha \cdot S_1 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right]}}$$

Con

S_1 la superficie reducida de la cámara de ensayo al 60%, 50% y 45%

S_2 la superficie de los orificios de la malla que también varían en función de la reducción del paso

α el coeficiente de caudal de un sistema de medida en línea

Según la norma ISO 5801, la sección transversal de la cámara de ensayo de entrada debe tener una superficie superior a cinco veces la superficie de entrada del ventilador, como se indica a continuación:

$$A_3 \geq 5 \cdot A_1$$

$$D_3 \geq \sqrt{5} \cdot D_1$$

$$D_{3\min} = 2,236 \cdot 200 = 447,20 \text{ mm} = 0,447\text{m}$$

Para calcular el diámetro máximo de la cámara de ensayo redondeo a tres el factor multiplicador del diámetro:

$$D_{3\max} = 3 \cdot D_1 = 600\text{mm} = 0,6\text{m}$$

Elijo un diámetro que pertenezca al rango entre el diámetro mínimo y el diámetro máximo:

$$D_{iTC} = D_3 = 560\text{mm} = 0,56\text{m}$$

$$S_{iTC} = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,56^2}{4} = 0,246\text{m}^2$$

$$S_{iTC60\%} = 0,147m^2$$

El área de los orificios en la reducción de paso del 60% es

$$S_{foro60\%} = 7,85 \cdot 10^{-5}m^2$$

Por tanto, el número de orificios en la sección de paso reducida al 60% es

$$N^{\circ}foros = \frac{0,147}{7,85 \cdot 10^{-5}} = 1882 \text{ foros}$$

$$Q_{foro} = \frac{Q_t}{N^{\circ}foros} = \frac{1,60}{1882} = 8,502 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$8,502 \cdot 10^{-4} = 0,59 \cdot 0,147 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{1,2 \left[\left(\frac{0,147}{7,85 \cdot 10^{-5}} \right)^2 - 1 \right]}}$$

$$\Delta P_{12} = 119,47 \text{ Pa}$$

$$S_{iTC50\%} = 0,123m^2$$

$$S_{foro50\%} = 3,525 \cdot 10^{-5}m^2$$

$$N^{\circ}foros = \frac{0,123}{3,525 \cdot 10^{-5}} = 3493 \text{ foros}$$

$$Q_{foro} = \frac{Q_t}{N^{\circ}foros} = \frac{1,62}{3493} = 4,63 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$4,63 \cdot 10^{-4} = 0,59 \cdot 0,123 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{1,2 \left[\left(\frac{0,123}{3,525 \cdot 10^{-5}} \right)^2 - 1 \right]}}$$

$$\Delta P_{23} = 201,74 \text{ Pa}$$

$$S_{iTC45\%} = 0,1108 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{foro}45\%} = 2,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$N^{\circ}\text{foros} = \frac{0,1108}{2,82 \cdot 10^{-5}} = 3930 \text{ foros}$$

$$Q_{\text{foro}} = \frac{Q_t}{N^{\circ}\text{foros}} = \frac{1,62}{3930} = 4,12 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$4,12 \cdot 10^{-4} = 0,59 \cdot 0,1108 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{1,2 \left[\left(\frac{0,1108}{2,82 \cdot 10^{-5}} \right)^2 - 1 \right]}}$$

$$\Delta P_{34} = 264,84 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{iTC} = \Delta P_{12} + \Delta P_{23} + \Delta P_{34} = 586,05 \text{ Pa}$$

La pérdida de carga en una cámara de ensayo de salida se calcula igual que para una cámara de ensayo de entrada, excepto porque esta vez la sección transversal de la cámara de ensayo de salida debe tener una superficie superior a nueve veces la superficie de salida del ventilador:

$$A_4 \geq 9 \cdot A_2$$

$$D_4 \geq 3 \cdot D_2 \geq 600\text{mm}$$

Para calcular el diámetro máximo de la cámara de ensayo de salida redondeo el factor multiplicador del diámetro:

$$D_{4\text{max}} = 3,5 \cdot D_2 = 700\text{mm}$$

Finalmente elijo un diámetro para la cámara de salida:

$$D_{\text{oTC}} = D_4 = 650\text{mm} = 0,65\text{m}$$

$$S_{\text{oTC}} = \frac{\pi \cdot D_4^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,65^2}{4} = 0,332\text{m}^2$$

$$S_{\text{oTC60\%}} = 0,199\text{m}^2$$

$$S_{\text{foro60\%}} = 5,02 \cdot 10^{-5}\text{m}^2$$

$$N^{\circ}\text{foros} = \frac{0,199}{5,02 \cdot 10^{-5}} = 3964 \text{ foros}$$

$$Q_{\text{foro}} = \frac{Q_t}{N^{\circ}\text{foros}} = \frac{1,62}{3964} = 4,084 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$4,084 \cdot 10^{-4} = 0,59 \cdot 0,199 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{1,2 \left[\left(\frac{0,199}{5,02 \cdot 10^{-5}} \right)^2 - 1 \right]}}$$

$$\Delta P_{12} = 113,99 \text{ Pa}$$

$$S_{\text{oTC50\%}} = 0,1659 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{foro50\%}} = 3,525 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$N^{\circ}\text{foros} = \frac{0,1659}{3,525 \cdot 10^{-5}} = 4706 \text{ foros}$$

$$Q_{\text{foro}} = \frac{Q_t}{N^{\circ}\text{foros}} = \frac{1,62}{4706} = 3,44 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$3,44 \cdot 10^{-4} = 0,59 \cdot 0,1659 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{1,2 \left[\left(\frac{0,1659}{3,525 \cdot 10^{-5}} \right)^2 - 1 \right]}}$$

$$\Delta P_{23} = 164,145 \text{ Pa}$$

$$S_{\text{oTC45\%}} = 0,1493 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{foro50\%}} = 2,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$N^{\circ}\text{foros} = \frac{0,1493}{2,82 \cdot 10^{-5}} = 5294 \text{ foros}$$

$$Q_{\text{foro}} = \frac{Q_t}{N^{\circ}\text{foros}} = \frac{1,62}{5294} = 3,059 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$3,059 \cdot 10^{-4} = 0,59 \cdot 0,1493 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{1,2 \left[\left(\frac{0,1493}{2,82 \cdot 10^{-5}} \right)^2 - 1 \right]}}$$

$$\Delta P_{34} = 202,85 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{OTC} = \Delta P_{12} + \Delta P_{23} + \Delta P_{34} = 480,98 \text{ Pa}$$

4.5 Análisis energético del banco de ensayo base

4.5.1 Cálculo del caudal másico

La presión estática es directamente proporcional a la lectura del manómetro

$$p_e^{(i)} = \rho g h_{e(mmH_2O)}^{(i)}$$

En adelante, la lectura manométrica estática local expresada en mm de agua en el punto i de la sección k se denotará mediante $h_{e k(i)}$

La presión estática manométrica en una sección, por ejemplo la 3, es la media de las medidas del anillo piezométrico

$$p_{m3} = \frac{\sum p_{me3r}}{n}$$

$$h_{e3} = \frac{\sum h_{e3(i)}}{n}$$

La presión dinámica también es directamente proporcional a la lectura del manómetro

$$p_d^{(i)} = \frac{1}{2} \rho U_i^2 = g h_{d(mmH_2O)}^{(i)}$$

La velocidad local del flujo en la posición i será

$$U_i = \sqrt{2g \frac{h_{d(mmH_2O)}^{(i)}}{\rho}}$$

La velocidad media en la sección se obtendrá promediando todas las medidas en cada sección. Por ejemplo, en la sección 3:

$$U_3 = \sqrt{\frac{2g}{\rho_3} \cdot \frac{\sum \sqrt{h_{d(\text{mmH}_2\text{O})}^{(i)}}}{n}}$$

Consecuentemente, la presión dinámica en 3 se define como el valor medio de las medidas del anillo piezométrico

$$h_{d3(\text{mmH}_2\text{O})} = \left(\frac{\sum_i \sqrt{h_{d(\text{mmH}_2\text{O})}^{(i)}}}{n} \right)^2$$

La velocidad tendrá, para los valores habituales de la gravedad y la densidad del agua, la siguiente expresión

$$u_3 = 4,429 \sqrt{\frac{p_{d3}}{\rho_3}}$$

Se obtiene el caudal en la sección 3 y el caudal del ventilador queda

$$Q_3 = U_3 A_3$$

$$Q = Q \left(\frac{\rho_3}{\rho} \right)$$

4.5.2 Cálculo de la presión del ventilador auxiliar

Para el cálculo de la presión del ventilador auxiliar, se procede a la definición de las distintas presiones que hay en la instalación, considerando las pérdidas de carga explicadas anteriormente.

- Presión del ventilador de ensayo:

La presión del ventilador, p_f , y la presión estática del ventilador, p_{fs} , vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$p_f = p_{sg5} + p_{sg5}$$

$$p_{fs} = p_5 + p_{sg4} = p_a + p_{sg4} = p_{esg4}$$

Se definen las condiciones a de la impulsión del ventilador de ensayo:

$$p_5 = p_4$$

$$p_{sg5} = p_5 + \frac{\rho V_{m5}^2}{2} = p_a + \frac{\rho V_{m5}^2}{2}$$

$$p_{esg5} = p_a$$

La presión estática a la que trabaja el ventilador de ensayo, p_4 , se determina por la siguiente expresión:

$$p_{e4} = p_{esg4} + \frac{\rho V_{m4}^2}{2}$$

$$p_4 = p_{sg4} + \frac{\rho V_{m4}^2}{2}$$

Considerando las pérdidas de carga en la cámara de ensayo, ΔP_{iTC} , la presión de remanso en la aspiración del ventilador de ensayo:

$$p_{esg4} = p_{esg3} - \Delta P_{iTC}$$

$$p_{sg4} = p_{sg3} - \Delta P_{iTC}$$

Considerando que la presión en la cámara de ensayo es una presión manométrica, asumiendo:

$$f_{M3} = 1$$

$$p_3 = p_{e3} + p_a$$

Podemos relacionar la presión en la cámara de ensayo con las pérdidas en el tramo de impulsión y de llenado de la cámara como:

$$p_{sg3} = p_3 + \frac{\rho V_{m3}^2}{2} = p_1 - (\Delta P_{iCS} + \Delta P_{LD}) + \frac{\rho V_{m3}^2}{2}$$

$$p_{e3} = p_{esg3} + \frac{\rho V_{m3}^2}{2}$$

Por tanto, podemos obtener la presión en el lado de impulsión del ventilador auxiliar:

$$p_1 = p_3 + (\Delta P_{iCS} + \Delta P_{LD})$$

La presión del ventilador auxiliar, p_f , y la presión estática del ventilador, p_{fs} , vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$p_f = p_{sg1} - p_{sg0}$$

$$p_{sg1} = p_1 + \frac{\rho V_{m1}^2}{2}$$

$$p_{sg0} = p_0 = p_a$$

La presión del ventilador auxiliar queda definida por las pérdidas globales de la instalación y el ventilador que estemos ensayando. Por tanto, el ventilador auxiliar debe suministrar ese salto de presiones para poder realizar el ensayo según la normativa UNE-EN ISO 5801. El ventilador auxiliar no debe crear bombeo o flujo pulsante durante los ensayos.

Las pérdidas de carga que tendrá que superar son:

$$\Delta P_{Base} = \Delta P_{transf} + \Delta P_{LD} + \Delta P_{iTC} = 2357,13 \text{ Pa}$$

A continuación, un inventario de todas las configuraciones de ensayo que aparecen en la Norma ISO 5801 que se pueden montar utilizando únicamente los componentes de nuestra instalación base.

La colocación de elementos que a la entrada tienen requerimientos de dimensiones distintos a los de la salida, podrían construirse con ventiladores de diámetros menores.

A-01: usando únicamente la cámara de ensayos en la salida, las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{A-01} = \Delta P_{oTC} = 480,94 \text{ Pa}$$

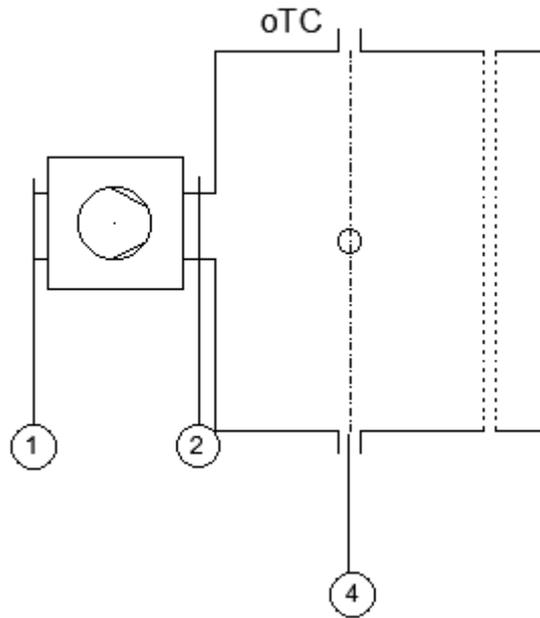


Figura 5.4.2 – Configuración de ensayo A-01

A-02: usando solo la cámara de ensayos en la entrada, las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{A-02} = \Delta P_{iTC} = 586,05 \text{ Pa}$$

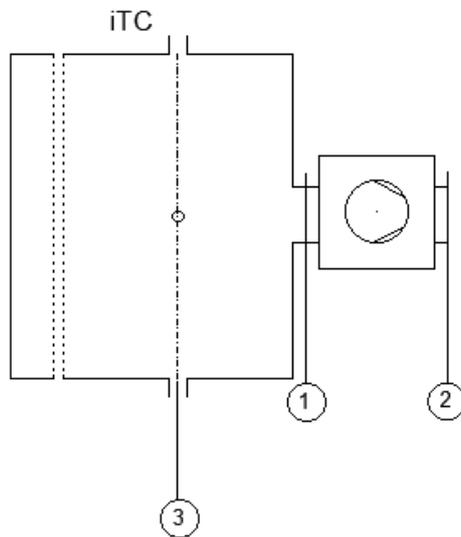


Figura 5.4.3 – Configuración de ensayo A-02

B-01: con un conducto largo, las pérdidas de carga son:

$$\Delta P_{B-01} = \Delta P_{LD} = 1592,04 \text{ Pa}$$

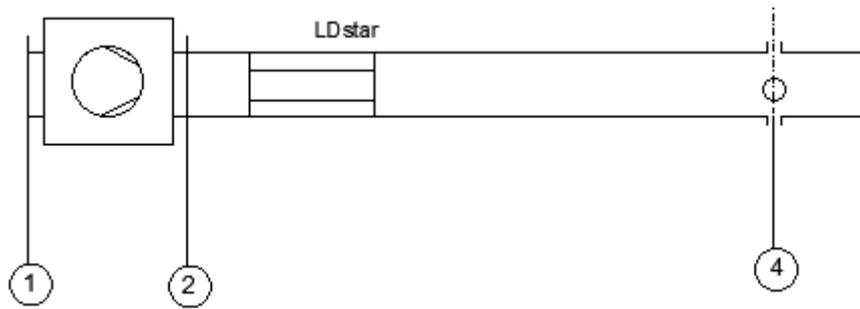


Figura 5.4.3 – Configuración de ensayo B-01

B-02: con una cámara de ensayos en la salida y un conducto de simulación para salida entubada, las pérdidas de carga son:

$$\Delta P_{B-02} = \Delta P_{oTC} = 480,94 \text{ Pa}$$

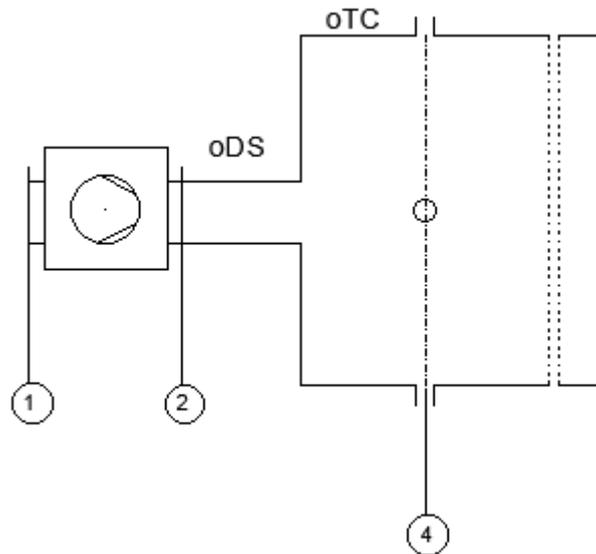


Figura 5.4.5 – Configuración de ensayo B-02

B-03, B-04 y B-05 tienen los mismos componentes. Una cámara de ensayos en la entrada, y un conducto largo en la salida, y las pérdidas de carga son:

$$\Delta P_{B-03} = \Delta P_{B-04} = \Delta P_{B-05} = \Delta P_{iTC} + \Delta P_{LD} = 2178,09 \text{ Pa}$$

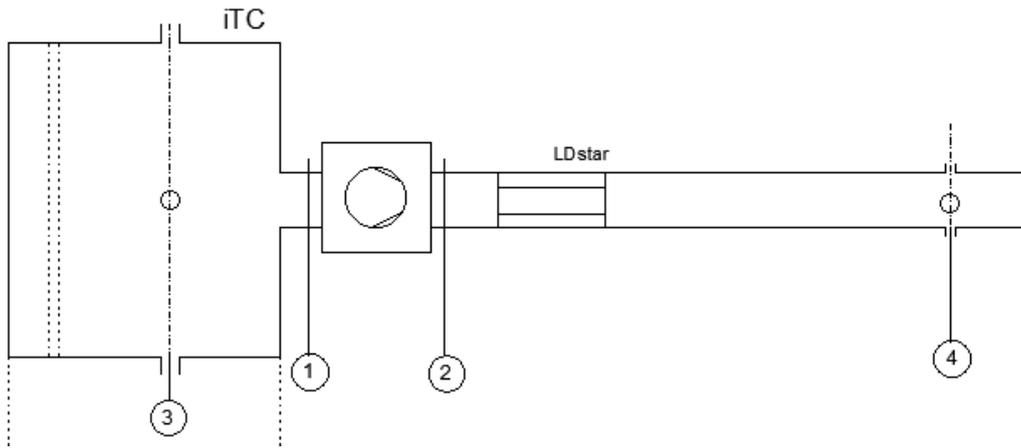


Figura 5.4.5 – Configuraciones de ensayo B-03, B-04, B-05

B-06: con cámara de ensayo de entrada y un conducto de simulación para salida entubada, las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{B-06} = \Delta P_{iTC} = 872,76 \text{ Pa}$$

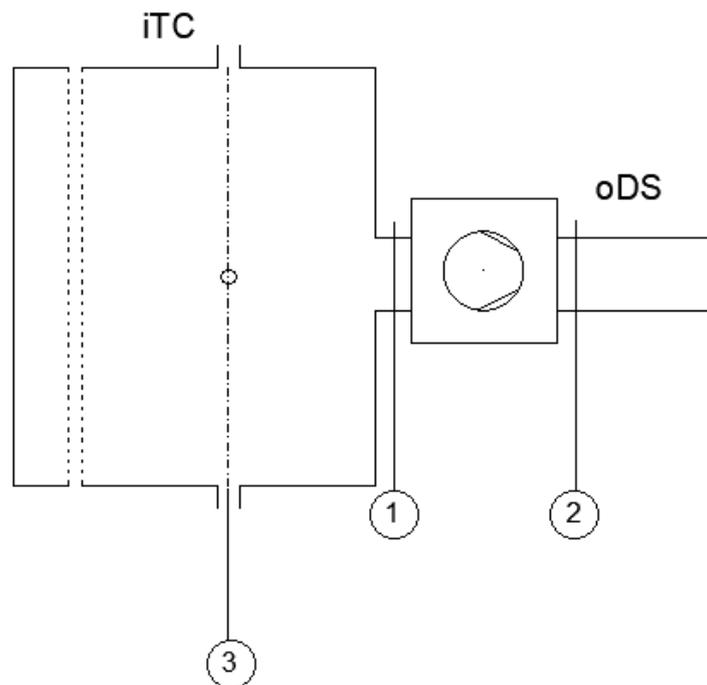


Figura 5.4.7 – Configuración de ensayo B-06

C-01: tiene un conducto largo, y sus pérdidas de carga son

$$\Delta P_{C-01} = \Delta P_{LD} = 1592,04 \text{ Pa}$$

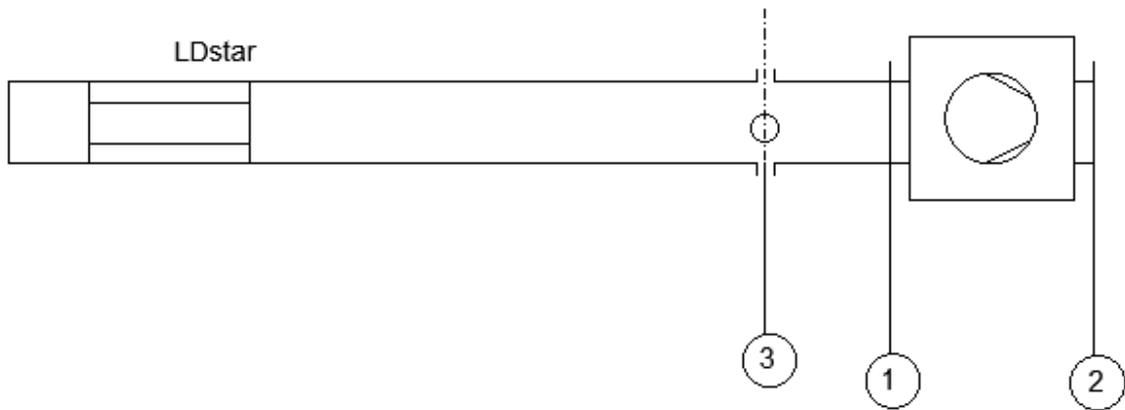


Figura 5.4.7 – Configuración de ensayo C-01

C-02: con una cámara de ensayos en la entrada y con conducto de simulación para entrada entubada, las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{C-02} = \Delta P_{iTC} = 872,76 \text{ Pa}$$

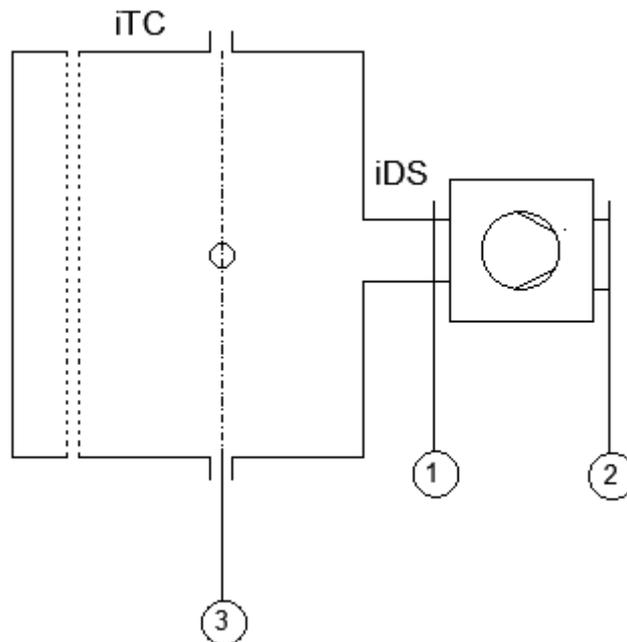


Figura 5.4.9 – Configuración de ensayo C-02

C-03, C-04 y C-05 tienen los mismos componentes, un conducto largo a la entrada, y una cámara de ensayos en la salida, y las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{C-03} = \Delta P_{C-04} = \Delta P_{C-05} = \Delta P_{oTC} + \Delta P_{LD} = 2073,02 \text{ Pa}$$

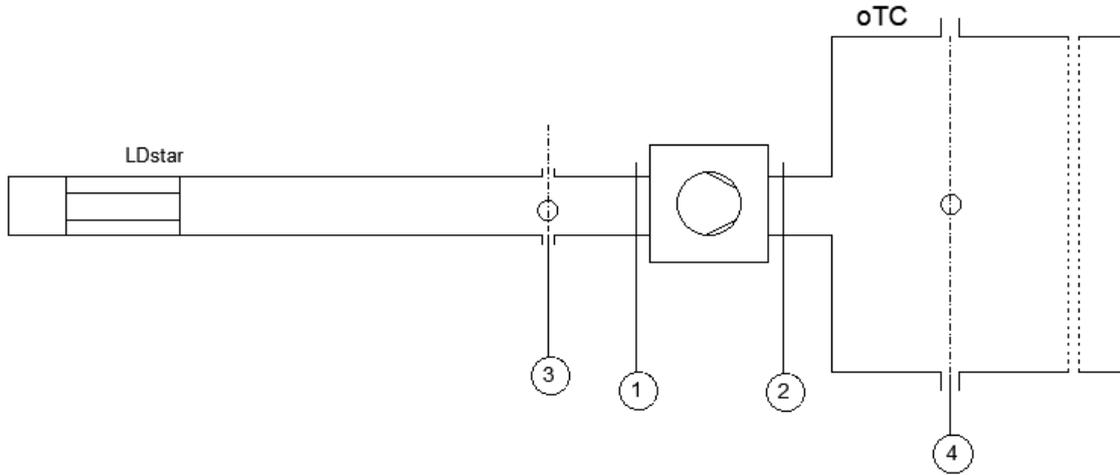


Figura 5.4.10 – Configuraciones de ensayo C-03, C-04 y C-05

C-06: tiene un conducto de simulación para entrada entubada y una cámara de ensayos en la salida, y las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{C-06} = \Delta P_{oTC} = 480,94 \text{ Pa}$$

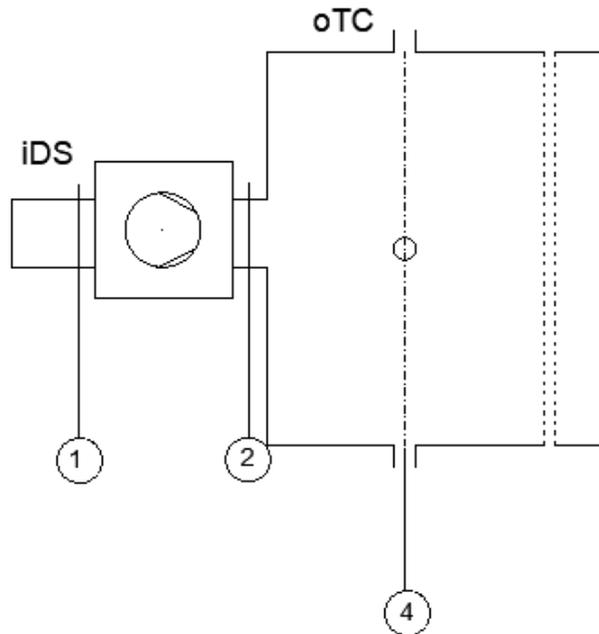


Figura 5.4.11 – Configuración de ensayo C-06

D-04, D-05 y D-06 tienen los mismos componentes, un segmento común y un conducto largo a la entrada, y un conducto de simulación y una cámara de ensayos en la salida, y las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{D-04} = \Delta P_{D-05} = \Delta P_{D-06} = \Delta P_{oTC} + \Delta P_{LD} = 2073,02 \text{ Pa}$$

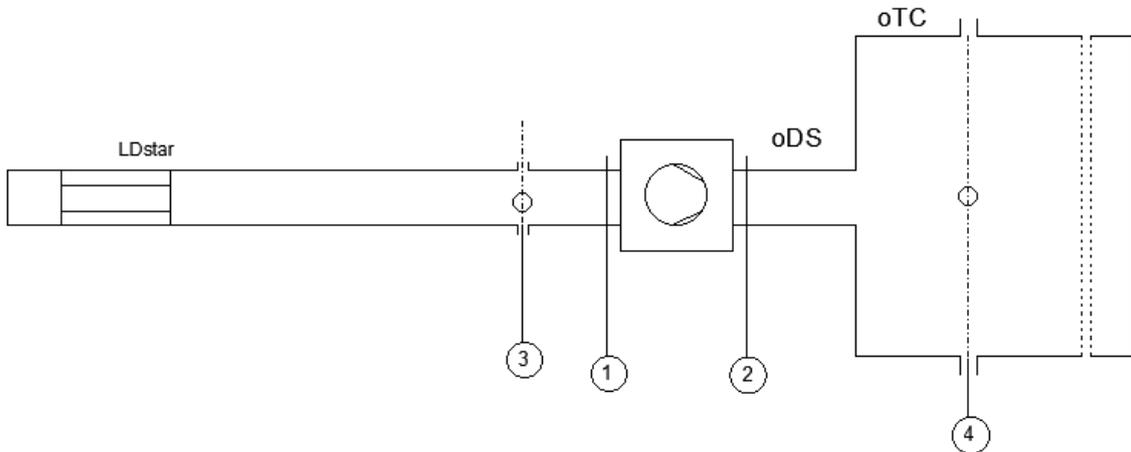


Figura 5.4.12 – Configuraciones de ensayo D-04, D-05 y D-06

D-07: tiene un conducto largo a la entrada y conducto de simulación para salida entubada, y las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{D-07} = \Delta P_{LD} = 1592,04 \text{ Pa}$$

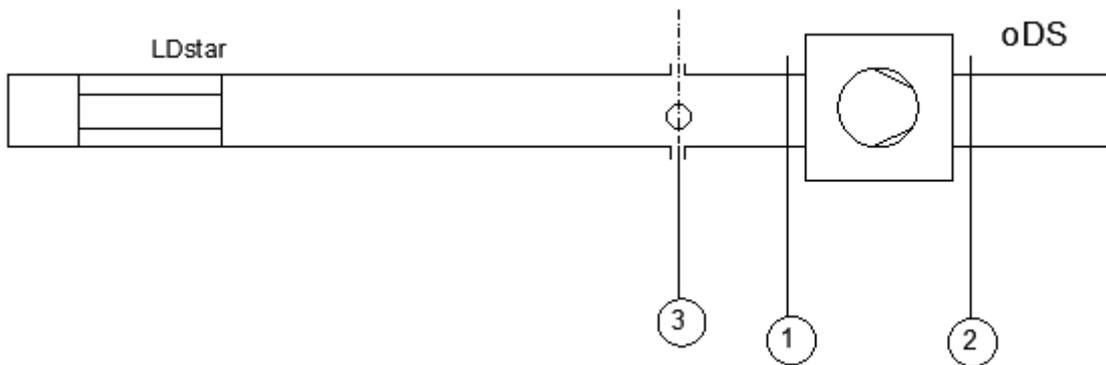


Figura 5.4.13 – Configuración de ensayo D-07

D-08, D-09 y D-10: tienen una cámara de ensayos y un conducto de simulación en la entrada, un segmento común y un conducto largo a la salida, y las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{D-08} = \Delta P_{D-09} = \Delta P_{D-10} = \Delta P_{iTC} + \Delta P_{LD} = 2178,09 \text{ Pa}$$

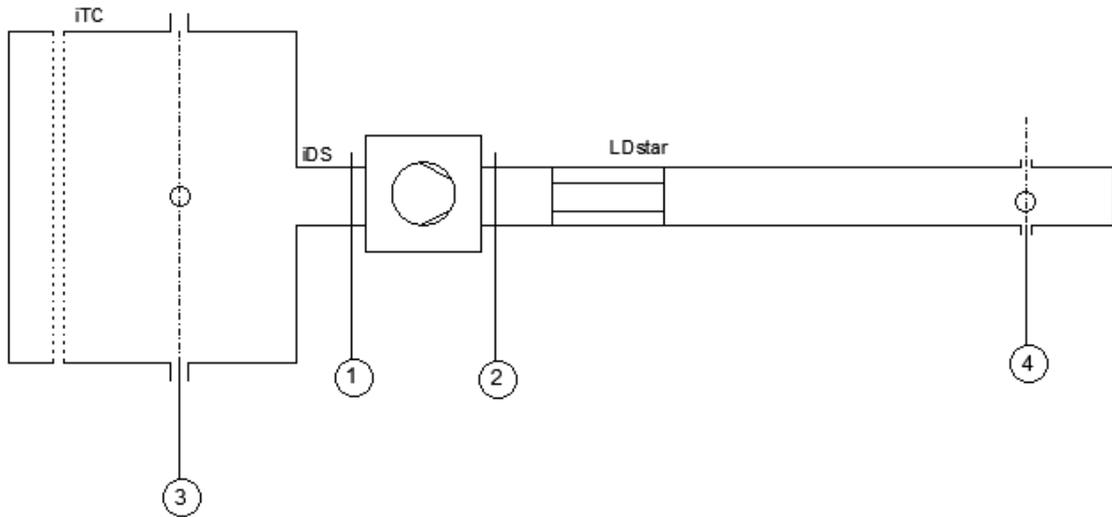


Figura 5.4.14 – Configuraciones de ensayo D-08, D-09 y D-10

D-11: tiene un conducto de simulación para entrada entubada, y un conducto largo a la salida, y las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{D-11} = \Delta P_{LD} = 1592,04 \text{ Pa}$$

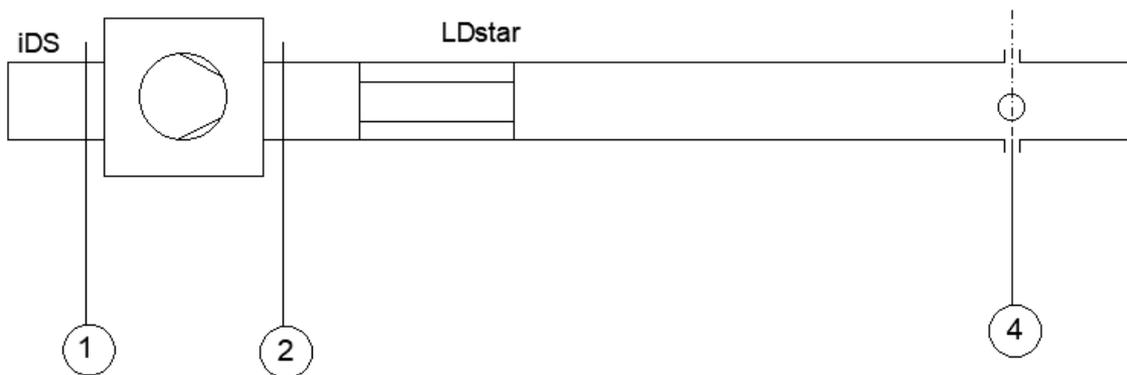


Figura 5.4.15 – Configuración de ensayo D-11

D-15: tiene una cámara de ensayos y un conducto de simulación en la entrada, y un conducto de simulación en la salida, y las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{D-15} = \Delta P_{iTC} = 872,76 \text{ Pa}$$

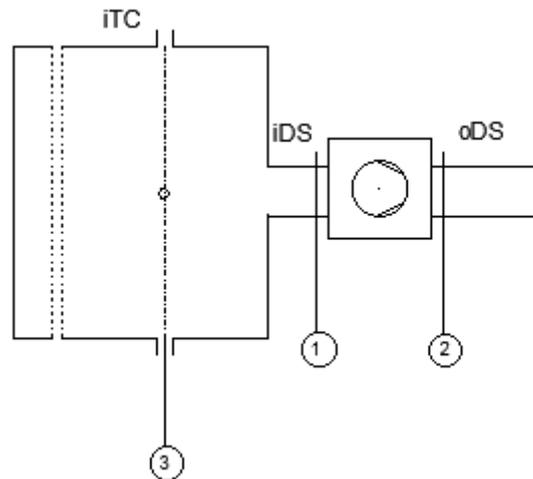


Figura 5.4.16 – Configuración de ensayo D-15

D-16 tiene un conducto de simulación en la entrada, y un conducto de simulación en la salida con una cámara de ensayos, y las pérdidas de carga son

$$\Delta P_{D-16} = \Delta P_{oTC} = 480,94 \text{ Pa}$$

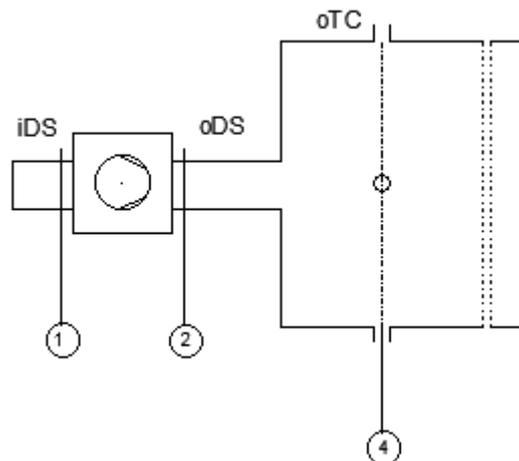


Figura 5.4.17 – Configuración de ensayo D-16

Capítulo 5 - Sistema de medición y captación de datos

5.1 Introducción

En este apartado procederé a explicar cómo he diseñado el sistema de captación de datos y las distintas mediciones necesarias para el banco de ensayo.

El objetivo de hacer estas mediciones es poder realizar la curva característica de funcionamiento del ventilador ensayado, para lo que deberemos medir presiones barométricas para su posterior uso para hallar la velocidad de aire y medir temperaturas en el ensayo.

5.2 Medición de las distintas variables

5.2.1 Temperatura

Para la medición de la temperatura durante los ensayos he optado por la instalación de un sensor de temperatura electrónico para conductos de ventilación, modelo A2G-60.

He seleccionado este sensor por estar especialmente destinado a conductos de aire, por su montaje fácil y directo en el tubo de ensayo, tanto circular como rectangular, por su diseño robusto y por estar diseñado para ser integrado en un sistema de control. Esta sonda de temperatura cuenta con un rango de medida de entre -35°C y $+90^{\circ}\text{C}$, lo que ofrece rango más que suficiente para medir temperaturas, como nosotros mediremos, próximas a la ambiente.

La sonda de temperatura emite la temperatura de medición a través de una señal estándar de entre 4 y 20 mA, con lo cual la sonda de temperatura se puede integrar sin ningún problema con distintos sistemas de control. Esta característica nos facilita el trabajo ya que no hay que instalar ningún tipo de transductor para que convierta una medida física en una analógica o digital sino que directamente puede ir conectada a la tarjeta multiplexora.

Esta sonda de temperatura cumple los requisitos de precisión de la Norma UNE-EN ISO 5801 de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Las figuras 5.2.1 a) y b) muestran la sonda de temperatura y sus dimensiones, en mm.



Figura 5.2.1 a) Sensor de temperatura A2G-60

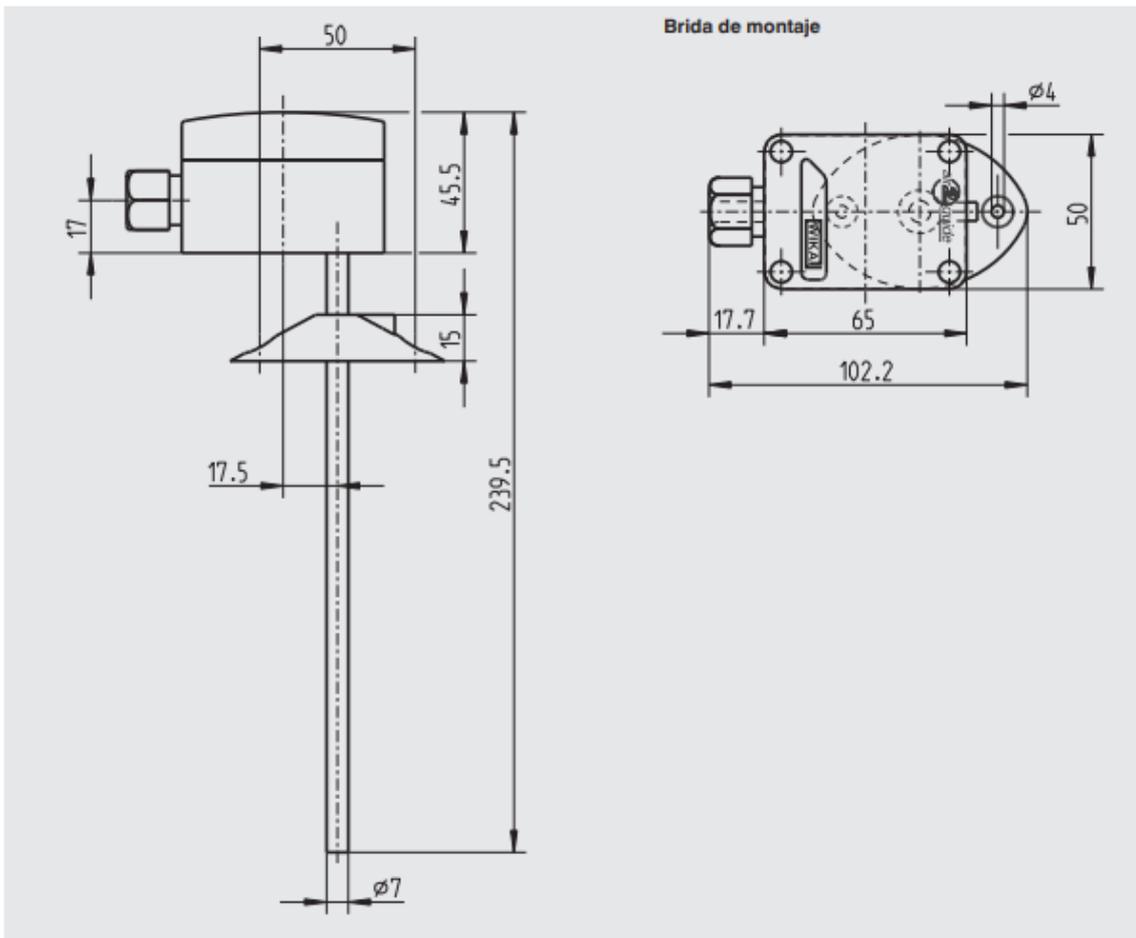


Figura 5.2.1 b) Dimensiones de la sonda de temperatura

5.2.1.1 Especificaciones técnicas de la sonda de temperatura A2G-60

Alimentación	15 ... 24 V DC / 24 V AC \pm 10 %
Rango de medición	-35°C ... +90°C
Precisión de la medición	\pm 1% del rango de medición
Consumo de energía eléctrica	035 W / 0,82 VA
Elemento sensible	Sensor de temperatura pasivo (Pt1000, A DIN y Ni1000)
Salida transmisor	TRA 4 ... 20 mA (2-hilos)
Casquillo del sensor	Acero inoxidable 1.4571
Tipo de protección	IP65
Peso	150g
Brida de montaje	Material PA6.6, +130 °C max.
Conexión eléctrica	Prensaestopa M16

5.2.2 Caudal de aire

El caudalímetro elegido, modelo FLOWSIC600-XT se utiliza para medir caudales de medios gaseosos en sistemas de ventilación y climatización. El principio de medición es el siguiente:

Los transductores ultrasónicos son montados en un tubo completamente lleno con el fluido. Las señales ultrasónicas son enviadas alternativamente por un transductor y recibidas por el otro. Las magnitudes medidas pueden ser determinadas de los tiempos de tránsito de las señales ultrasónicas.

Dado que el fluido en el que se propaga el ultrasonido se encuentra en movimiento, el tiempo de tránsito de la señal ultrasónica en dirección de flujo es más corto que en contracorriente. Se mide la diferencia de tiempo de tránsito Δt , que permite determinar la velocidad media de flujo en el trayecto recorrido por las señales ultrasónicas. Aplicando una corrección del perfil es posible calcular el valor medio de la velocidad del caudal relativo a la superficie de la sección, que es proporcional al caudal volumétrico.



Figura 5.2.2.1 – FLOWSIC600-XT

5.2.2.1 Especificaciones técnicas del caudalímetro FLUXUS G601

Magnitudes de medida	Flujo volumétrico en condiciones reales, volumen en condiciones reales, velocidad del gas, velocidad del sonido, corrección de volumen opcional mediante ordenador de flujo electrónico integrado (EVC)
Principio de medición	Medición diferencial del tiempo de tránsito ultrasónico
Rango de medición	Q_{\min} 5 m ³ /h ... 750 m ³ /h Q_{\max} 1.000 m ³ /h ... 120.000 m ³ /h
Precisión	≤ 0,05 % del valor medido
Funciones de diagnóstico	i-diagnostics™: diagnóstico integrado del dispositivo y diagnóstico inteligente avanzado de dispositivos y aplicaciones a través del software de manejo FLOWgate™
Temperatura del gas	-40 °C ... +180 °C
Presión de servicio	0 bar ... 160 bar
Temperatura ambiente	-40 °C ... +70 °C
Humedad ambiental	≤ 95 %
Salidas analógicas	4 ... 20 mA, ≤ 250 Ω Activa/pasiva, con aislamiento galvánico
Salidas digitales	4 salidas: 2 x estado, 2 x impulso: ≤ 30 V, 50 mA
Modbus	✓
Ethernet	✓
HART	✓

5.2.3 Presión

Esta medida es una de las más importantes en nuestro proyecto puesto que esta medida dará lugar a la curva de funcionamiento del ventilador ensayado, dada esta importancia debemos tener una precisión alta, la norma UNE-EN_ISO_5801 nos indica que la precisión de un transductor de presión no deberá ser menor que los 200 Pa.

El tubo pitot seleccionado para el conducto largo es suministrado por la empresa SICOSistemas de control. Se trata de 18 tubos pitot de la marca DWYER modelo 160-8 y 6 tubos pitot modelo 160.18.

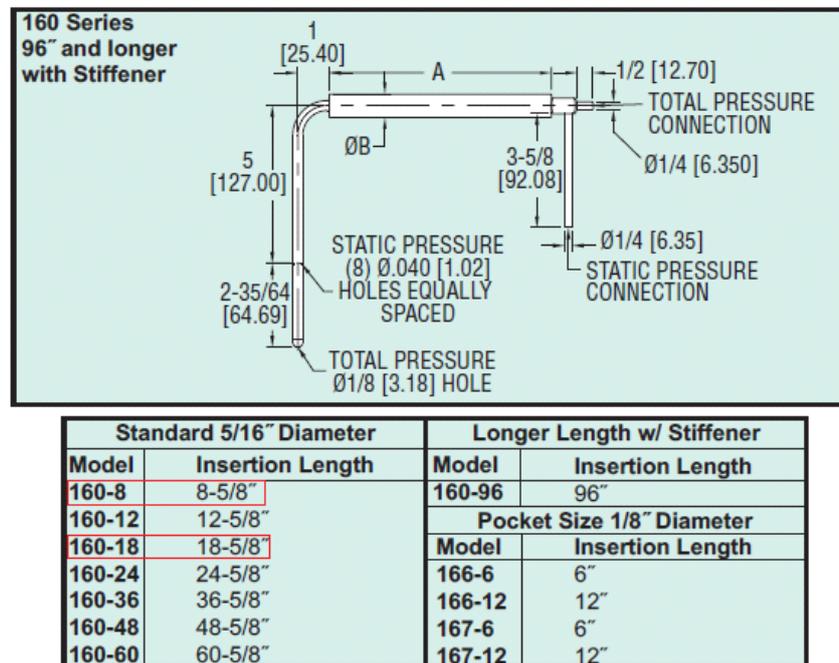


Figura 5.2.3 – Tubos pitot

El tubo de pitot nos da una señal de salida física, es decir, el dato de presión pero nosotros necesitamos una señal analógica o digital para poder monitorizarlo en la computadora por lo que se procede a instalar un transductor de presión a cada tubo de pitot.

El transductor de presión seleccionado JUMO dTRANS p32.



Figura 5.2.3.1 - Transductor de presión JUMO dTRANS p32

5.3 Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital).

Se tratará de un sistema de adquisición de datos implementado para la adquisición y monitoreo, en tiempo real, de los parámetros que caracterizan el comportamiento del banco de ensayo.

El sistema de adquisición de datos se encarga de traducir la magnitud física medida en una magnitud eléctrica a través de la tarjeta multiplexora 34921A.

En lo que respecta a los parámetros a medir en nuestra instalación, se ha implementado la adquisición de datos para realizar mediciones de tipo meteorológicos como la temperatura, presión barométrica del aire.

La función principal del sistema de adquisición de datos es transmitir la información obtenida a través de sus canales de entrada, de diferentes señales las cuales son previamente captadas mediante el uso de diferentes sensores. Siendo capaz de monitorizar varios canales al unísono y de almacenar los registros realizados.

Consiste en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora.

Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

Este sistema se ejecuta puesto que en nuestro proyecto el flujo de datos o medidas va a ser de gran magnitud por lo que debemos monitorizarlo.



Figura 5.3 – Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos

5.3.1 Elementos que componen el sistema de adquisición de datos

Transductores: Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente de salida. Las magnitudes de entrada, denominadas variables de instrumentación, pueden ser la temperatura o presión que vamos a medir.

Fase de acondicionamiento: La señal de salida de un sensor no suele ser válida para su procesado. Por lo general requiere de una amplificación para adaptar sus niveles a los del resto de la circuitería. Un ejemplo de amplificador es el amplificador de instrumentación, que es inmune a cierto tipo de ruido.

No sólo hay que adaptar niveles, también puede que la salida del sensor no sea lineal o incluso que ésta dependa de las condiciones de funcionamiento (como la temperatura ambiente o la tensión de alimentación) por lo que hay que linealizar el sensor y compensar sus variaciones. La compensación puede ser por hardware o software, en este último caso ya no es parte del acondicionador.

El objetivo del acondicionador es hacer que el valor mínimo de la variable a medir por las sondas o transductores se imponga a la entrada del convertidor analógico-digital como el valor mínimo del voltaje que acepta.

Amplificador de instrumentación: Un amplificador de instrumentación es un tipo particular de amplificador diferencial que fue provisto de buffers de entrada, eliminando la necesidad de equiparar impedancias, lo cual lo hace un amplificador adecuado para mediciones y testeo de equipos.

Los amplificadores de instrumentación son utilizados en aplicaciones en las que se requiere gran precisión y estabilidad a corto y largo plazo.

Cuando un sistema de adquisición de datos tiene varios canales de entrada y cada uno de estos canales tiene una entrada diferente necesitaremos un amplificador de ganancia regulable.

Conversor analógico/digital: Es un dispositivo electrónico capaz de convertir una señal analógica de voltaje en una señal digital con un valor binario. Se

utiliza en equipos electrónicos como computadora, grabadores de sonido y de vídeo, y equipos de telecomunicaciones.

La señal analógica, que varía de forma continua en el tiempo, se conecta a la entrada del dispositivo y se somete a un muestreo a una velocidad fija, obteniéndose así una señal digital a la salida del mismo.

Tarjeta multiplexora 34921A: Esta tarjeta nos permite poder unir todas las señales de entrada provenientes de los sensores en un solo componente y dar una única salida.



Figura 5.3.1 a) Tarjeta multiplexora 34921A

Data logger 34980A Agilent Technologies: Seleccionamos esta solución ya que es un sistema compacto, fácil de usar, con alto rendimiento, y sus características lo hacen idóneo para nuestra aplicación.

Número de canales	80 canales
Voltaje de entrada máximo	300 V
Corriente de entrada máxima	1A
Ancho de banda	45 MHz



Figura 5.3.1 b) Data logger 34980A

5.4 Software para la adquisición de datos Agilent BenchLink Data Logger

Debido a que la densidad de datos es muy grande se hace necesario el empleo de un software para gestionar y tratar los datos obtenidos en el ensayo.

El Data logger 34980A contiene un software desarrollado por la empresa con las funciones que necesitamos. Las funciones que necesitamos no solo es la de visualizar todas la mediciones sino la de graficar con ellas las curvas de funcionamiento de los ventiladores ensayados.

Este software tiene una función de elaborar gráficas de gran precisión por lo que lo hace una herramienta indispensable para nuestro sistema.

La interfaz del software hace que sea muy sencilla su utilización.

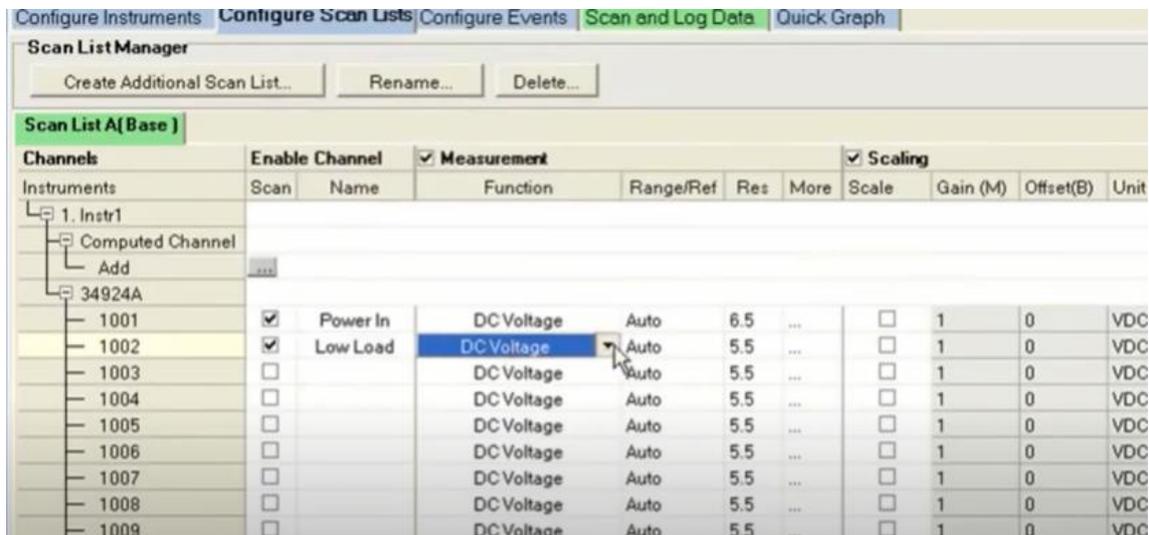


Figura 5.4 a) Software Datalogger

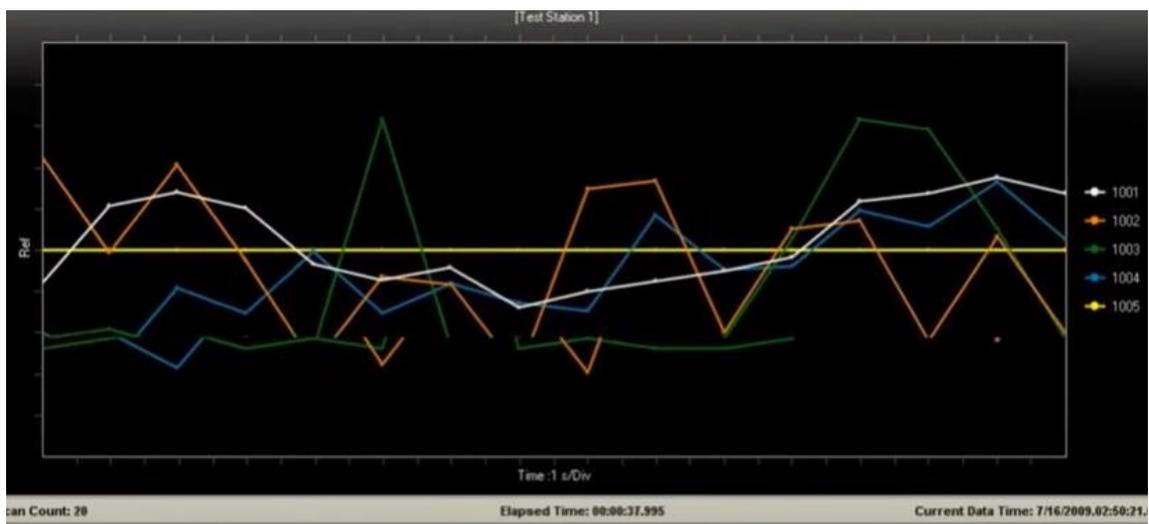


Figura 5.4 b) Software Datalogger

Capítulo 6 - Conclusiones

Este informe presenta tres resultados:

- 1) Estudio de todos los elementos estructurales de una instalación de ensayo.
- 2) Descripción de todos los modos de interconexión adecuados para cada tipo de ensayo.
- 3) Análisis energético de cada una de las posibles configuraciones de nuestra instalación base.
- 4) Diseño detallado de un bucle de control, adquisición y tratamiento de datos para un banco de ensayo para ventiladores industriales de 200mm de diámetro y caudales de hasta $5.800 \text{ m}^3/\text{h}$

Capítulo 7 - Bibliografía

- [1] ISO 5801, Ventiladores. Ensayos aerodinámicos usando circuitos normalizados.
- [2] ISO 13349, Ventiladores. Vocabulario y definiciones de categorías.
- [3] Guía técnica de selección de equipos de transporte de fluidos. Bombas y ventiladores.
- [4] ISO 13350, Ventiladores. Ensayos de comportamiento de ventiladores de chorro.
- [5] ISO 5167, Medición del caudal de fluidos mediante dispositivos de presión diferencial intercalados en conductos en carga de sección transversal circular.
- [6] Mecánica de fluidos. Manuel M. Sánchez Nieto. ETSII-UPCT.
- [7] Documentación aportada por el director del proyecto.

Anexo A - Determinación del caudal de aire

A.1 Generalidades

Este anexo especifica diferentes métodos de medición de caudal que son apropiados para los ensayos de los ventiladores, indicando en cada caso la incertidumbre de medición correspondiente. El flujo debe estar totalmente exento de turbulencias.

En estas condiciones, se permiten dos métodos básicos de medición de caudal: el uso de un caudalímetro en línea o la exploración del campo de velocidades.

A.2 Caudalímetros en línea

Los caudalímetros que se pueden utilizar son toberas multi-Venturi, entradas cónica o de boca de campana y diafragmas. Las toberas múltiples solo se utilizan dentro de una cámara de ensayos. La entrada cónica o de boca de campana solo se puede utilizar en la entrada de un circuito aerodinámico, aspirando aire del espacio libre. El diafragma se puede utilizar en la entrada o en la salida de un circuito aerodinámico, así como entre dos secciones de un circuito.

La expresión general del caudal másico a través de un caudalímetro de presión diferencial en línea es la que se indica a continuación:

$$q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{up} \cdot \Delta p}$$

Donde

- q_m es el caudal másico;
- d es el diámetro del cuello;
- ρ_{up} es la densidad aguas arriba;
- Δp es la diferencia de presión;
- α es el coeficiente de caudal;
- ε es el factor de expansibilidad;

La diferencia de presión en un caudalímetro en línea se debe medir con una incertidumbre que no exceda de $\pm 1,4\%$ del valor observado.

Las toberas múltiples tienen una pérdida de presión relativamente baja y una sensibilidad más baja a las turbulencias en el flujo de entrada. El diafragma, en particular, genera pérdidas de presión más elevadas, y se requiere un ventilador auxiliar para extender la curva característica del ventilador hasta el caudal volumétrico máximo. Para los ensayos en uno o varios puntos preseleccionados de la curva característica del ventilador, un diafragma puede, simultáneamente a la medida del caudal, controlar la caída de presión, lo que puede ser una propiedad útil.

A.3 Métodos por exploración del campo de velocidades

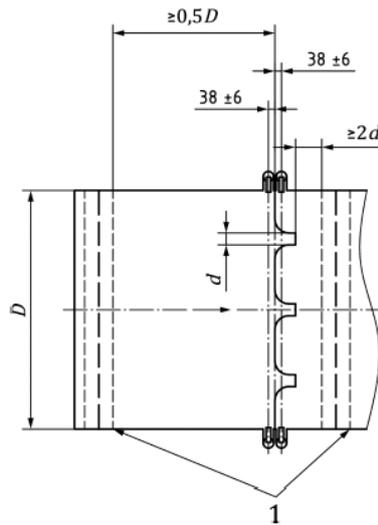
La velocidad local se debe medir en un determinado número de posiciones a través de un conducto y los valores individuales se combinan, utilizando una técnica de integración, para obtener una estimación de la velocidad media en el conducto. La medición de la superficie de la sección transversal del conducto en el plano de exploración permite el cálculo del caudal.

A.4 Determinación del caudal utilizando toberas múltiples.

A.4.1 Instalación

Para ensayos en circuitos normalizados, se deben utilizar múltiples toberas dentro de las cámaras de entrada o de salida. Las toberas pueden ser de diferentes tamaños, pero deben estar colocadas simétricamente con respecto al eje de la cámara, tanto en tamaño como en radio. Los ejes de la o las toberas y de la cámara en la que están instaladas deben ser paralelos.

Las toberas múltiples se deben colocar de forma que la línea central de cada tobera esté a una distancia superior o igual a $1,5 d$ de la pared de la cámara. La distancia mínima entre los centros de cualquiera de las dos toberas utilizadas simultáneamente debe ser de $3 d$, donde d es el diámetro de la tobera grande.



Leyenda

1 Enderezadores de caudal

Figura A.4.1 – Unidad de toberas múltiples

A.4.2 Forma geométrica

Las dimensiones de las toberas múltiples y sus tolerancias se indican en la figura A.4.1.

El perfil debe ser axialmente simétrico y el borde de salida debe ser cuadrado, afilado, y libre de rebabas, muescas o redondeos. La longitud del cuello de la tobera, L , debe estar entre $0,6 d \pm 0,005 d$ o $0,5 d \pm 0,005 d$.

Las toberas deben tener una forma elíptica como se representa en la figura A.4.2.a y A.4.2.b.

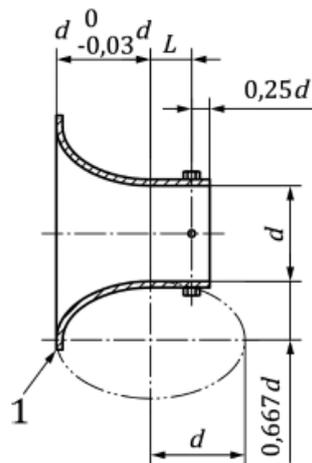


Figura A.4.2.a – Toberas con tomas de presión en el cuello

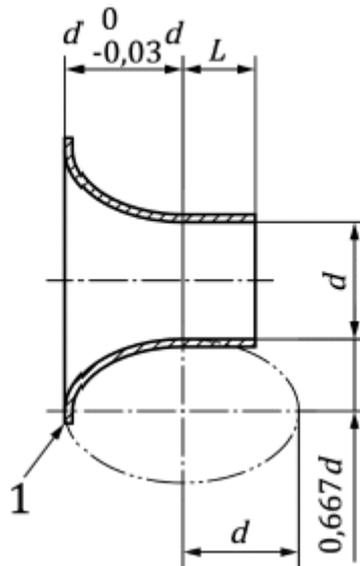


Figura A.4.2.b – Toberas sin tomas de presión en el cuello

Leyenda

- 1 Radio de carenado aproximadamente $0,05d$, si es necesario

A.4.3 Cálculo del caudal másico

El caudal másico para una tobera múltiple se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$q_m = \varepsilon \cdot \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot d_i^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{up} \cdot \Delta p}$$

Donde

$$\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot d_i^2)$$

es la suma de los cuadrados de los diámetros de la tobera multiplicados por sus coeficientes de caudal.

A.4.4 Características de las toberas múltiples

El coeficiente de caudal de la tobera, α , se indica en la figura A.4.4.1 o se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\alpha = \left[0,9986 - \frac{7,006}{\sqrt{Re_d}} + \frac{134,6}{Re_d} \right] \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \alpha_{Aup} \cdot \beta^4}} \right] = \frac{C}{\sqrt{1 - \alpha_{Aup} \cdot \beta^4}} \text{ para } L/d = 0,6$$

y

$$\alpha = \left[0,9986 - \frac{6,688}{\sqrt{Re_d}} + \frac{131,5}{Re_d} \right] \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \alpha_{Aup} \cdot \beta^4}} \right] = \frac{C}{\sqrt{1 - \alpha_{Aup} \cdot \beta^4}} \text{ para } L/d = 0,5$$

Donde

Re_d es el número de Reynolds en función del diámetro de salida, que se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

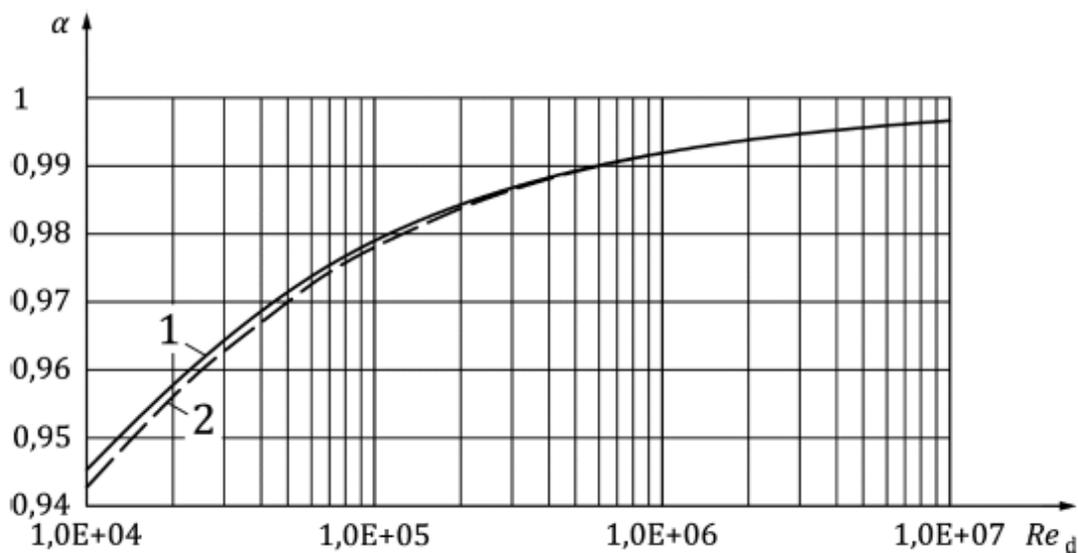
$$Re_d = 0,95 \cdot \varepsilon \cdot d \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \rho_{up} \cdot \Delta p}}{\mu_{up}}$$

Donde

α_{Aup} es el coeficiente de energía cinética aguas arriba de la tobera, igual a 1,043 para una tobera en un conducto y a 1 para una tobera o toberas múltiples en una cámara o una tobera de entrada libre;

$\beta = \frac{d}{D}$ (que se puede tomar como 0 en una cámara) ($b < 0,525$ para una tobera en conducto);

C es el coeficiente de descarga de la tobera.



Leyenda

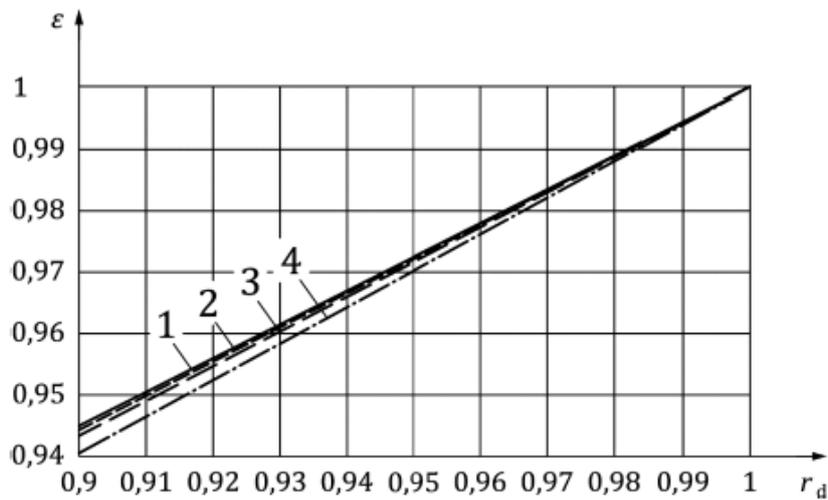
- 1 L/d = 0,6
- 2 L/d = 0,5

FIGURA A.4.4.1 – Coeficiente de caudal para las toberas utilizadas en una cámara ($\beta = 0$)

El factor de expansibilidad se indica en la figura A.4.4.2 y también se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \left[\frac{\kappa \cdot r_d^{\frac{2}{\kappa}} \cdot \left(1 - r_d^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)}{(\kappa-1) \cdot (1-r_d)} \right]^{0,5} \cdot \left[\frac{1-\beta^4}{1 - r_d^{\frac{2}{\kappa}} \cdot \beta^4} \right]^{0,5}$$

Donde
$$r_d = \frac{p_{up} - \Delta p}{p_{up}} = 1 - \frac{\Delta p}{p_{up}}$$



Leyenda

- 1 $\beta = 0$
- 2 $\beta = 0,3$
- 3 $\beta = 0,4$
- 4 $\beta = 0,5$

Figura A.4.4.2.b – Factores de expansibilidad para toberas utilizadas en una cámara

A.4.5 Incertidumbre

La incertidumbre en el coeficiente de descarga C es de $\pm 1,2\%$ para $Re_d > 1,2 \times 10^4$

A.5 Determinación del caudal utilizando una entrada cónica o boca de campana

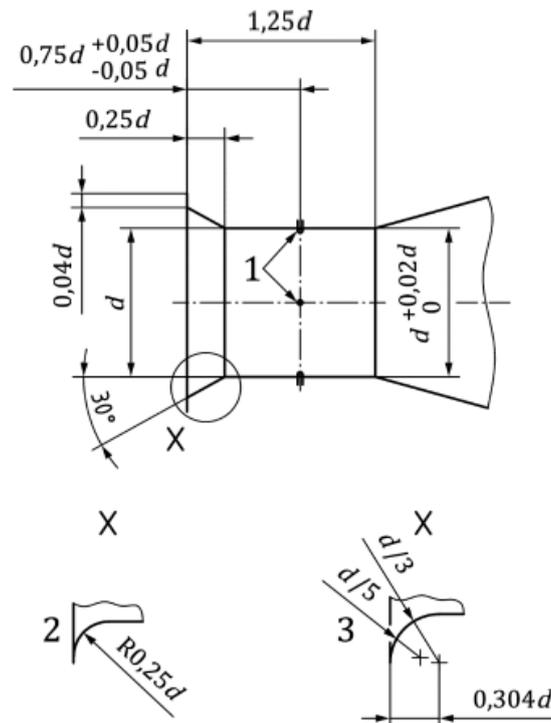
A.5.1 Instalación

La entrada cónica solo se debe utilizar cuando se aspira el aire de un espacio abierto (libre).

Los ejes de la entrada y del circuito aerodinámico deben coincidir.

A.5.2 Forma geométrica

Las dimensiones y tolerancias de la entrada cónica o de la boca de campana se indican en la siguiente figura:



Leyenda

1 Cuatro tomas de presión de la pared

2 y 3 Entradas alternativas de boca de campana (2: toberas en un arco y 3: toberas en dos arcos)

Figura A.5.2 – Geometría de una entrada cónica o boca de campana

A.5.3 Cálculo del caudal másico

A.5.3.1 Generalidades

Las entradas cónicas o con boca de campana no se deben utilizar cuando $Re_d < 20.000$.

El caudal másico se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{up} \cdot \Delta p}$$

A.5.3.2 Características de las entradas cónicas

El coeficiente compuesto $\alpha\varepsilon$ es independiente del número de Reynolds Re_d

A.5.3.3 Características de la entrada con boca de campana

Para una entrada con boca de campana de la forma “tobera de un arco”:

$$\alpha = 1 - 0,004 \cdot \sqrt{\left(\frac{10^6}{Re_d}\right)} \pm 0,003 \text{ y } \varepsilon = 1 - 0,55 \cdot \frac{\Delta p}{p_1}$$

Para una entrada con boca de campana de la forma “tobera de dos arcos”:

$$\alpha = 0,99 \pm 0,01 \text{ y } \varepsilon = 1 - 0,55 \cdot \frac{\Delta p}{p_1}$$

A.5.4 Incertidumbres

Para la entrada cónica y de boca de campana, la incertidumbre del coeficiente compuesto $\alpha\varepsilon$ y del coeficiente de caudal α es la misma. La incertidumbre básica, cuando $Re_d > 3 \times 10^5$, y cuando no se permite una pantalla de carga en la pieza de conexión, es de $\pm 1,5\%$. Se debe añadir, cuando sea aplicable, la incertidumbre adicional asociada al bajo nivel de Re_d y a la pantalla de carga. La incertidumbre adicional, como porcentaje debido al bajo nivel de Re_d se indica a continuación:

$$\pm \left(\frac{2 \cdot 10^4}{Re_d} - \frac{1}{15} \right)$$

La incertidumbre adicional debida a la presencia de una pantalla uniforme es del 0,5% y se debe añadir ariméticamente.

A.6 Determinación del caudal utilizando un diafragma

A.6.1 Instalación

Para ensayos en circuitos normalizados, se puede utilizar un diseño común de diafragma en la entrada de un conducto de ensayo, en la salida de un conducto de ensayo o entre conductos aguas arriba y aguas abajo del mismo diámetro.

Hay dos tipos alternativos de tomas de presión disponibles: el anillo piezométrico, que es generalmente el más apropiado para conductos pequeños, y las tomas de presión de pared para diámetros más grandes.

A.6.2 Forma geométrica

El diafragma debe tener las dimensiones indicadas en la figura A.6.2. El diafragma se debe fabricar con un material que no sea susceptible de corrosión durante el servicio de trabajo, y debe estar protegido contra daños y posibles deterioros durante su manipulación y limpieza.

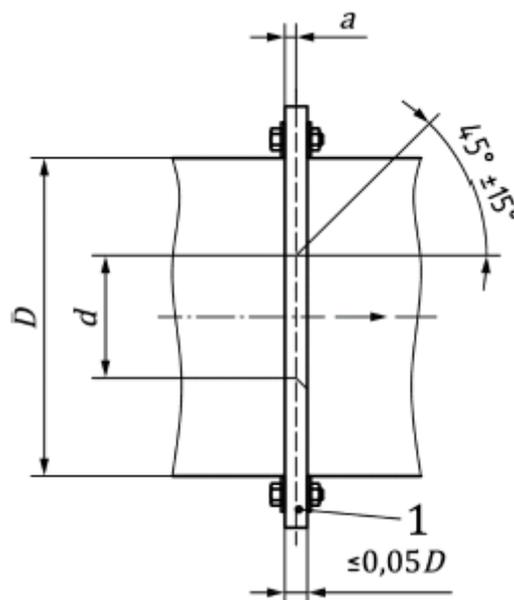


Figura A.6.2 – Detalle del diafragma

A.6.3 Cálculo del caudal másico

Las definiciones o limitaciones de las cantidades en el lado derecho de la siguiente ecuación difieren ligeramente de acuerdo con la instalación de diafragma adoptada y, por ello, se consideran por separado en cada caso:

$$q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{\text{up}} \cdot \Delta p}$$

El diámetro del conducto, D , debe ser superior o igual a 50 mm.

La incertidumbre con la que se conoce $\alpha \varepsilon$ puede tomarse como $\pm 0,5\%$ siempre que el número de Reynolds referido al diámetro del orificio d sea superior o igual a 10^5 .

Anexo B - Diferentes componentes en una instalación de laboratorio

La instalación del laboratorio es una combinación de cámaras de ensayo, conductos, unidades de medición de caudal o presión, enderezadores, piezas de transición y un sistema de alimentación variable.

Para configurar las instalaciones de los tipos A, B, C, D y E se combinan estas unidades, definidas a continuación:

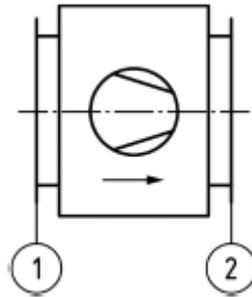


Figura B – Ventilador a ensayar

B.1 Circuitos aerodinámicos para simulación de conductos

Los circuitos aerodinámicos normalizados para instalaciones de ventiladores de categoría B, C o D deben incorporar los segmentos comunes de simulación adyacentes a la entrada y, o salida del ventilador que se describen en este capítulo.

B.1.2 Segmento común a la entrada del ventilador (iCS)

Este segmento comprende la parte del circuito aerodinámico de ensayo del lado de entrada adyacente al ventilador e incorpora un conjunto de tomas de pared.

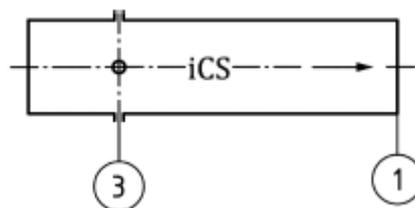


Figura B.1.2.1 – Segmento común a la entrada del ventilador

La sección adyacente a la entrada del ventilador tiene la misma sección transversal que la entrada del ventilador a la que está conectado y su longitud, L_{S1} , es:

$$L_{S1} = D_{H1}$$

donde

D_{H1} es el diámetro hidráulico en la entrada del ventilador.

Si el aire entra directamente desde la atmósfera sin ninguna obstrucción o si el segmento común se instala aguas abajo de la cámara de ensayos de entrada como una simulación de conductos, se debe utilizar una boca de campana en la entrada. (Véase figura B.1.2.2).

Si se instala un dispositivo de regulación de caudal o un ventilador auxiliar aguas arriba del segmento común, se debe utilizar un enderezador aguas arriba del segmento común para proporcionar al plano de medición 3 condiciones exentas de turbulencias, para una medición fiable de la presión.

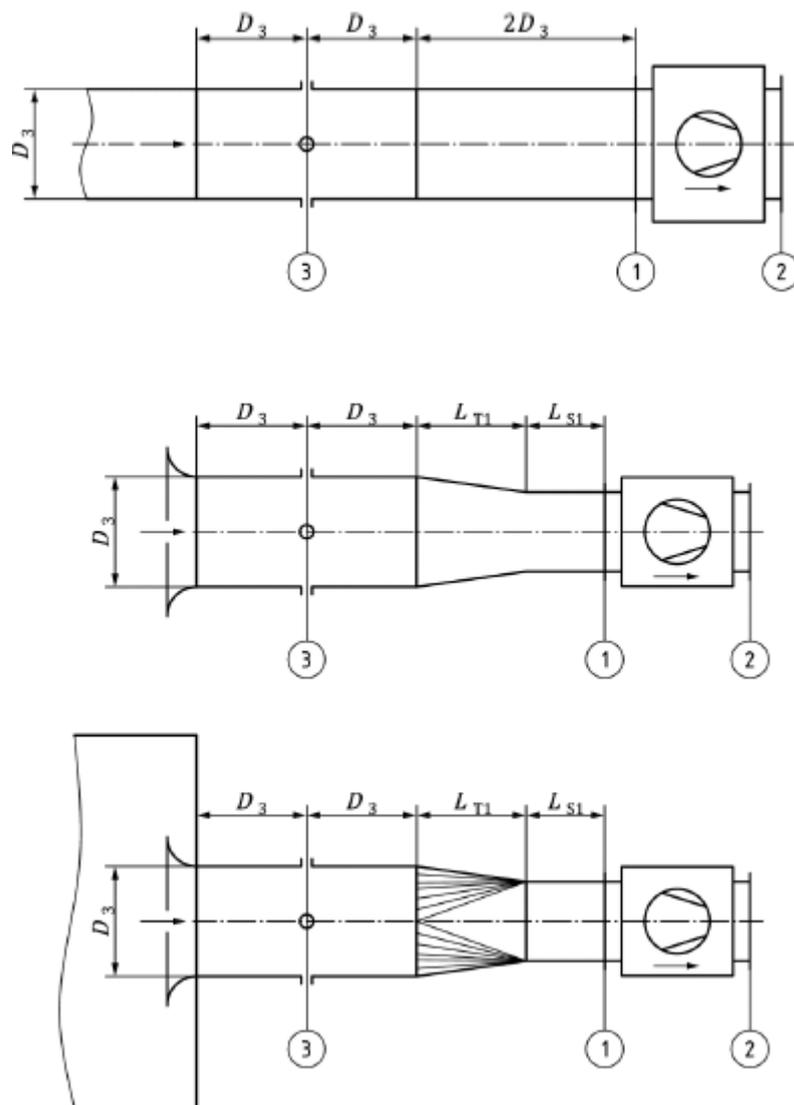


Figura B.1.2.2 – Segmento común en la entrada del ventilador.

B.1.3 Conducto de simulación de entrada (iDS)

Un ventilador ensayado para su utilización con entrada libre pero adaptable para entrada por conducto se puede convertir, para el ensayo, de la primera a la segunda forma añadiendo un conducto de simulación en su entrada.

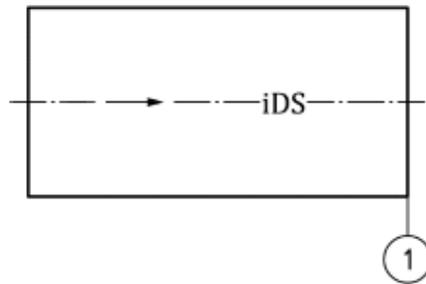


Figura B.1.3.1 – Conducto de simulación de entrada

El conducto de simulación debe tener la misma sección transversal que la entrada del ventilador a la que está conectado, con la longitud L_{S1} calculada mediante:

$$L_{S1} \geq D_{h1}$$

Una longitud de entrada igual es la relación normal y proporciona unas características reales para un ventilador con entrada por conducto pero, en ciertos casos, se necesita un conducto más largo para conseguir que el ventilador desarrolle toda la presión de entrada en puntos de caudal cero o cercanos. En estos casos, se permite extender este elemento como se necesite.

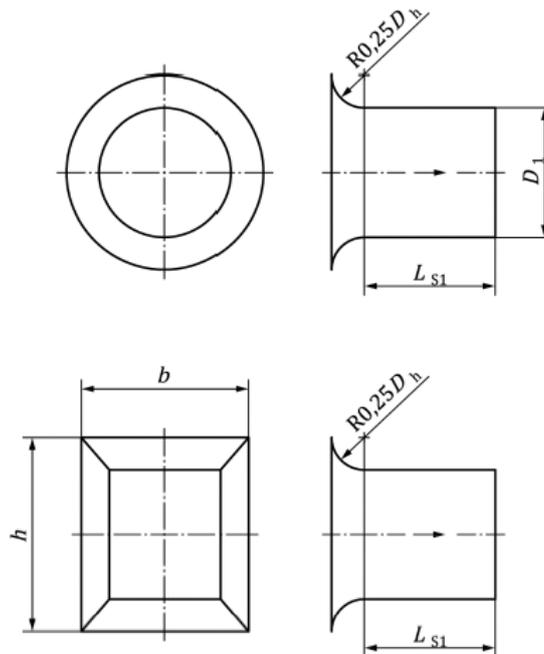


Figura B.1.3.2 – Conducto de simulación de entrada con boca de campana.

B.1.4 Segmento común en la salida del ventilador (oCS)

Este segmento comprende la parte del circuito aerodinámico del lado de salida adyacente al ventilador. Incorpora un enderezador de flujo estándar de tipo estrella y un conjunto de tomas de pared.

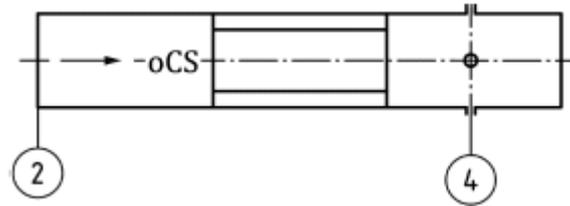


Figura B.1.4.1 – Segmento común en la salida del ventilador

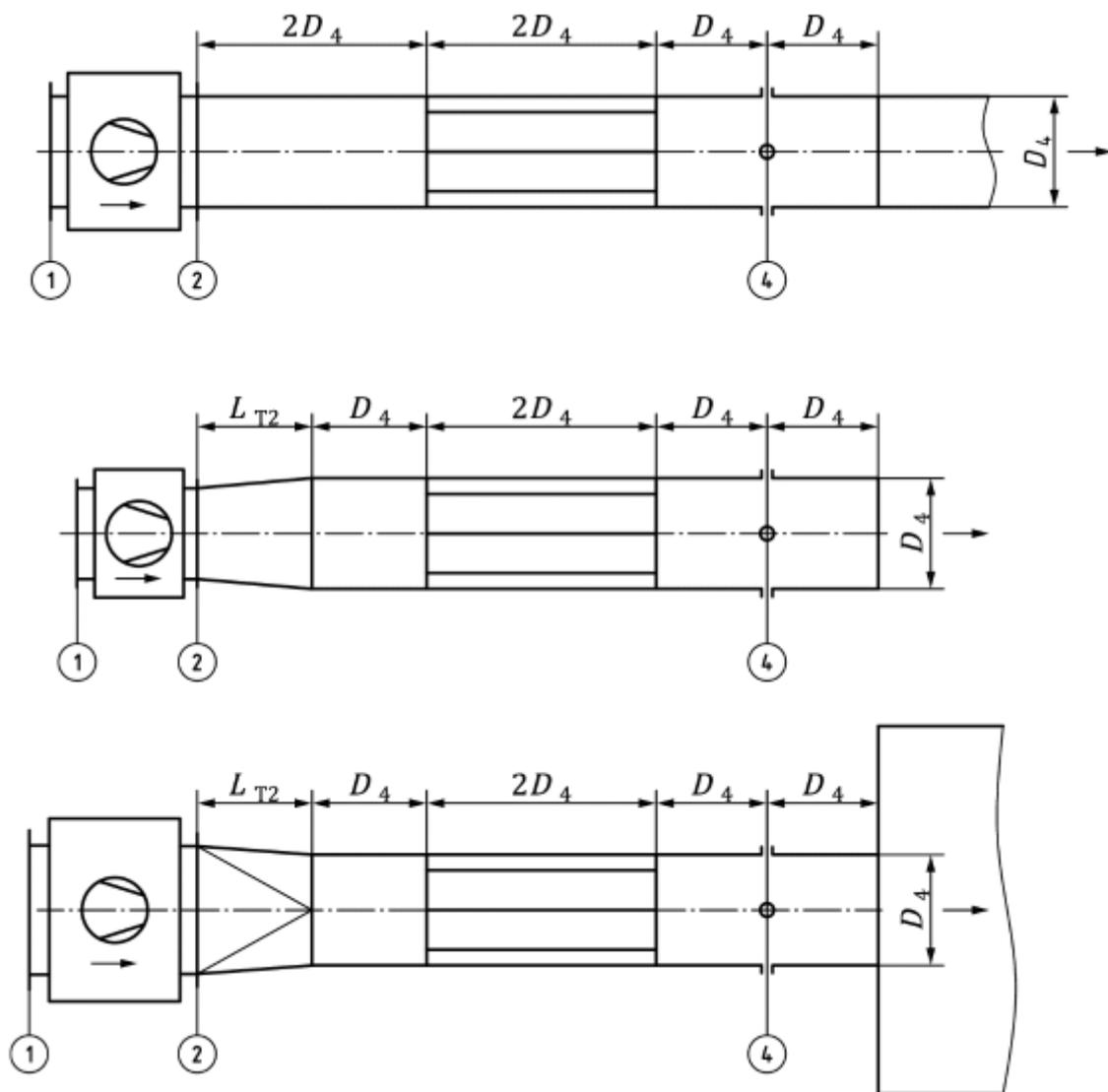


Figura B.1.4.2 – Segmento común en la salida del ventilador [con enderezador de flujo (se muestra el tipo estrella)]

Para ventiladores grandes puede ser difícil realizar los ensayos con circuitos aerodinámicos comunes estandarizados en la salida, incluido el enderezador. En este caso, las características del ventilador se pueden medir utilizando un conducto de simulación en el lado de salida.

B.1.5 Conducto de simulación de salida (oDS)

Un ventilador ensayado para su utilización libre pero adaptable para salida por conducto se puede convertir para el ensayo, de la primera a la segunda forma, añadiendo un conducto de simulación en su salida.

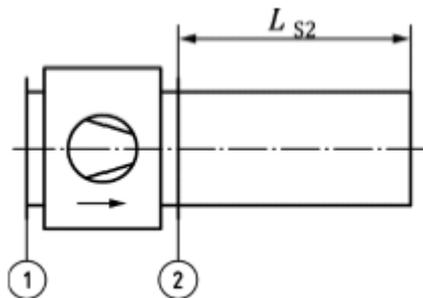


Figura B.1.5 – Conducto de simulación en la salida

La sección de simulación debe tener la misma sección transversal que la salida del ventilador a la que está conectado, y la longitud se debe determinar mediante la siguiente condición:

$$2 \leq L_{s2} / D_{h2} \leq 4$$

El conducto de simulación de salida se puede utilizar con una cámara de ensayo de salida (oTC) o un recinto de ensayos de salida (oTS).

La presión estática de salida del ventilador a ensayar no se mide en este conducto, pero se considera igual a la presión estática en el recinto de ensayos de salida (oTS) o a la cámara de ensayo de salida (oTC).

B.1.6 Conducto largo (LD)

Un conducto largo debe ser recto y tener una sección circular uniforme. La longitud del conducto entre el enderezador y el tubo Pitot debe ser superior o igual a $5 D_x$.

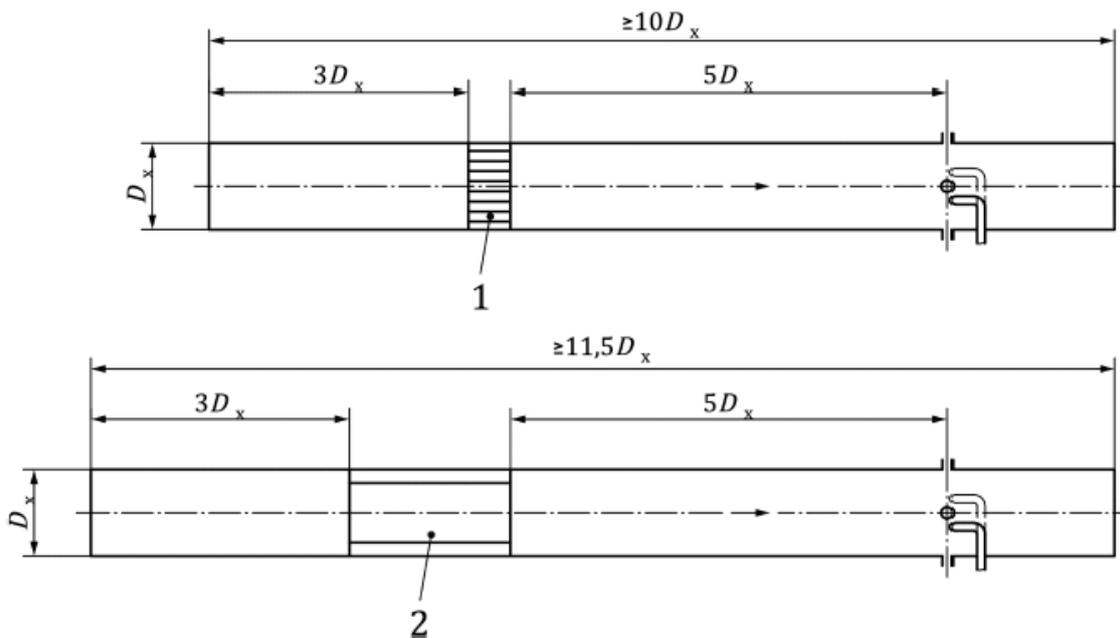


Figura B.1.6 – Conducto largo

Leyenda

- 1 Enderezador de celdas
- 2 Enderezador de estrella

B.2 Recinto de ensayos de entrada y salida: iTS y oTS

La presión en el lado de entrada se mide en 3: iTS, iTC, iSC o LD

En las configuraciones A y B (aspiración libre):

iTS:

- Aspiración libre y sin obstrucciones.
- Solo se permite una entrada de boca de campana.
- “3” es la presión estática medida en el recinto de ensayos libre donde la velocidad del aire es despreciable (presión atmosférica).

En las configuraciones C y D (aspiración en conducto):

iDS:

- $1D \leq L_{iDS} \leq 3D$; $\xi_{iDS} = 0$
- “3” es la presión estática medida en el recinto de ensayos libre donde la velocidad del aire es despreciable. No se permiten piezas de transición u otros conductos.

iCS:

- iDS en o sobre iTC se permite iCS; $L_{iCS} = 4D$; $\xi_{iCS} = 0$
- Se permiten piezas de transición y otros conductos.
- iCS en o sobre iTC se permite LD.

LD:

- $L_{LD} = 11,5D$; $\xi_{iDS} \neq 0$
- Se permiten piezas de transición y otros conductos.
- Se permite LD en o sobre iTC.

No se permite ninguna otra unidad de medición de presión en la entrada del ventilador a ensayar.

La presión en el lado de salida se mide en "4": oTS, oTC, oCS o LD.

En las configuraciones A y C (Descarga libre):

oTS:

- Aspiración libre y sin obstrucciones.
- No se permite conducto.
- "4" es la presión estática medida en el recinto de ensayos libre, donde la velocidad del aire es despreciable (presión atmosférica).

En las configuraciones B y D (descarga en conducto):

oDS:

- $2D \leq L_{oDS} \leq 4D$; $\xi_{oDS} = 0$
- "4" es la presión estática medida en el recinto de ensayos libre donde la velocidad del aire es despreciable.
- No se permiten piezas de transición u otros conductos.
- oDS en o sobre oTC se permite oCS.

oCS:

- $L_{oCS} = 6D$; $\xi_{oCS} \neq 0$
- Se permiten piezas de transición y otros conductos.
- oCS en o sobre oTC se permite LD.

LD:

- $L_{LD} = 15D$; $\xi_{LD} \neq 0$
- Se permiten piezas de transición y otros conductos.
- Se permite LD en o sobre oTC

Tal y como aparece en el capítulo 3, "1" y "2" son las secciones de aspiración y descarga del ventilador a ensayar, y "3" y "4" son las secciones de medición de presión en el lado de entrada y de salida del circuito.

No se permite ninguna otra unidad de medición de presión en la salida del ventilador a ensayar.

B.3 Sistema de alimentación variable

El sistema de alimentación variable se instala preferentemente en la salida de la instalación de ensayo o se separa del ventilador a ensayar y de las unidades de medición de caudal o presión, mediante una cámara de ensayo o un conducto de al menos 2D. Se utiliza para variar el punto de funcionamiento en la instalación del laboratorio y puede incluir un dispositivo de regulación de caudal, un ventilador auxiliar o una combinación de ambos.

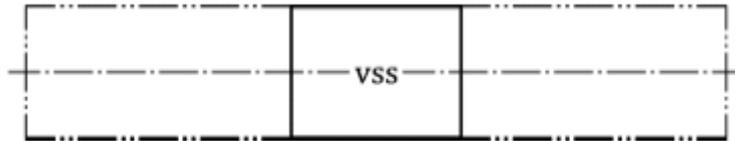


Figura B.3 – Sistema de alimentación variable

B.3.1 Dispositivo de regulación de caudal

Se pueden utilizar dispositivos de regulación de caudal para variar el punto de funcionamiento del ventilador a ensayar. En el conducto, aguas abajo del dispositivo de regulación, se debe utilizar un enderezador para impedir perturbaciones del caudal en las secciones de medición de caudal o presión, o en la entrada del ventilador a ensayar.

B.3.2 Ventiladores auxiliares

Se pueden utilizar ventiladores auxiliares para controlar el punto de funcionamiento del ventilador a ensayar. Se debe diseñar para producir la presión suficiente en el caudal requerido para superar las pérdidas a lo largo de la instalación de ensayo. Los ventiladores auxiliares no deben crear una sobrecarga o flujo pulsante durante los ensayos. Se debe interponer un enderezador de celdas entre el ventilador auxiliar y cualquier circuito aerodinámico de ensayos al que esté conectado, para impedir perturbaciones en el caudal en las secciones de medición de caudal o presión o en la entrada o la salida del ventilador a ensayar.

B.4 Enderezadores

En presencia de turbulencias, es imposible la medición simple de presión o caudal volumétrico. Por ello, se debe colocar un enderezador cuando se realizan ensayos en un conducto situado en el lado de salida del ventilador.

B.4.1 Enderezador de celdas

El enderezador de celdas se utiliza para reducir turbulencias. No mejora las distribuciones asimétricas de velocidad.

El enderezador de celdas consiste en un nido de celdas de igual sección transversal, cada una con anchura w y longitud L . El espesor de la pared debe ser inferior o igual a $0,005 D$.

$$w = 0,075 D$$

$$L = 0,45 D$$

$$e \leq 0,005 D$$

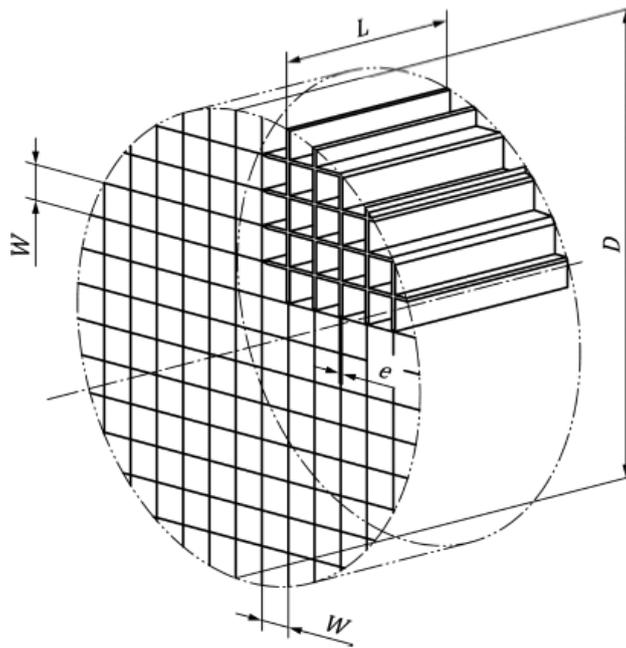


Figura B.4.1 Enderezador de flujo de celdas

B.4.2 Enderezador de estrella

El enderezador de estrella está diseñado para eliminar las turbulencias, pero es de poca utilidad para igualar las distribuciones asimétricas de velocidad. A diferencia del tipo celda, permite que la presión estática se iguale a medida que el aire fluye a través de él. El enderezador de estrella está construido con ocho láminas radiales de longitud $2D$ y un espesor inferior o igual a $0,007D$. Las láminas estarán dispuestas de forma equidistante en la circunferencia con una desviación angular inferior o igual a 5° entre láminas adyacentes.

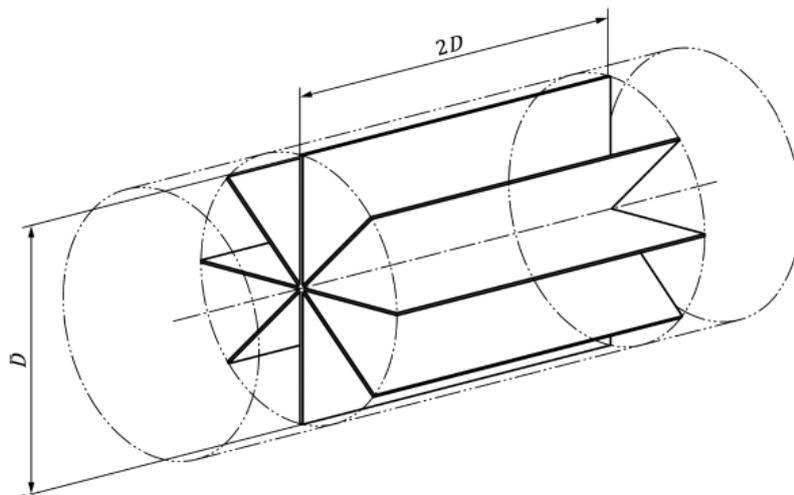


Figura B.4.2 - Enderezador de flujo de estrella

B.5 Piezas de transición

Se pueden utilizar secciones de transición para adaptar diferencias de superficie y, o forma dentro de los límites indicados.

Para un segmento común en la entrada del ventilador (iCS):

$$0,95 < A_3/A_1 < 2,25 \quad \text{para sección circular } A_1.$$

$0,95 < A_3/A_1$ para sección rectangular A_1 , no hay límite superior para A_3 o para la relación de aspecto b/h (donde $b > h$), pero el ángulo de expansión entre los lados cortos debe ser inferior o igual a 15° y el ángulo de contracción entre los lados largos debe ser inferior o igual a 30° .

$$L_{T1}/D_{h3} = 1 \quad \text{para sección rectangular } A_1$$

Para un segmento común en la salida del ventilador (oCS):

$$0,95 < A_4/A_2 < 1,07 \quad \text{para todas las formas de } A_2.$$

$$L_{T2}/D_4 = 1 \quad \text{para todas las formas de } A_2.$$

El coeficiente de fricción de la sección de transición es el de un conducto de diámetro D_4 y longitud L_{T2} .

Se necesitarán piezas de transición adicionales para conectar componentes de la instalación de diferentes formas o dimensiones de sección transversal, que se puedan utilizar en ambos sentidos de flujo y deben cumplir la siguiente condición:

$$L \geq 4 \cdot \left[\sqrt{\frac{4 \cdot A_L}{\pi}} - \sqrt{\frac{4 \cdot A_S}{\pi}} \right]$$

donde

A_L es la superficie mayor de la pieza de transición;

A_S es la superficie menor de la pieza de transición.

B.5.1 Transición rectangular/circular

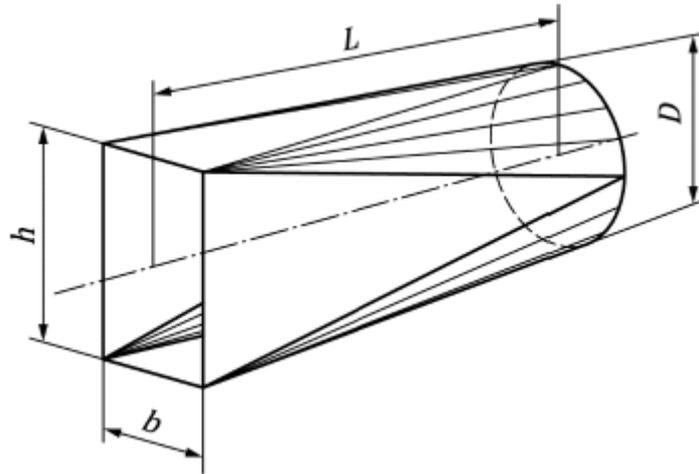


Figura B.5.1 - transición rectangular/circular

B.5.2 Transición circular/circular

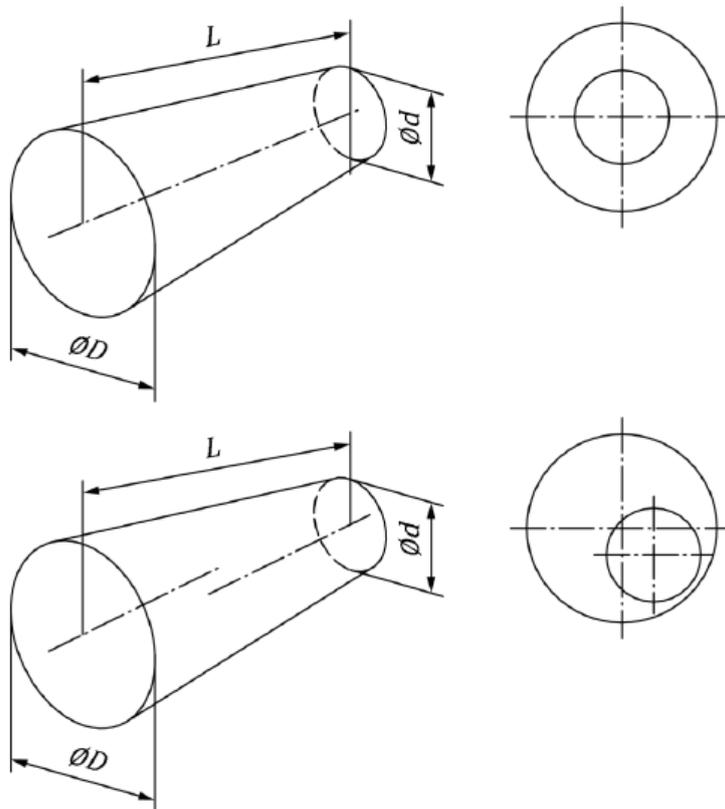


Figura B.5.2 – Transición circular/circular

B.6 Cámaras de ensayo normalizadas

Se puede incorporar una cámara de ensayo en la instalación de un laboratorio para tener una estación de medición, para simular las condiciones que se prevé que el ventilador encuentre en servicio, o ambas cosas. La sección transversal de la cámara de ensayo puede ser circular o rectangular.

Si es necesario, se deben instalar enderezadores de caudal en las cámaras para conseguir los patrones de caudal requeridos.

La efectividad de los enderezadores de caudal de aire en todas las cámaras se debe verificar mediante los ensayos descritos en el Anexo X.

B.6.1 Cámaras de ensayo de entrada normalizadas (iTC)

La sección transversal de la cámara de ensayo puede ser circular, con un diámetro interior D_3 , o rectangular $b_3 \cdot h_3$ con $2/3 < b_3/h_3 < 3/2$

La dimensión D_3 corresponde al diámetro hidráulico de la sección transversal calculada mediante:

$$D_3 = D_{h3}$$

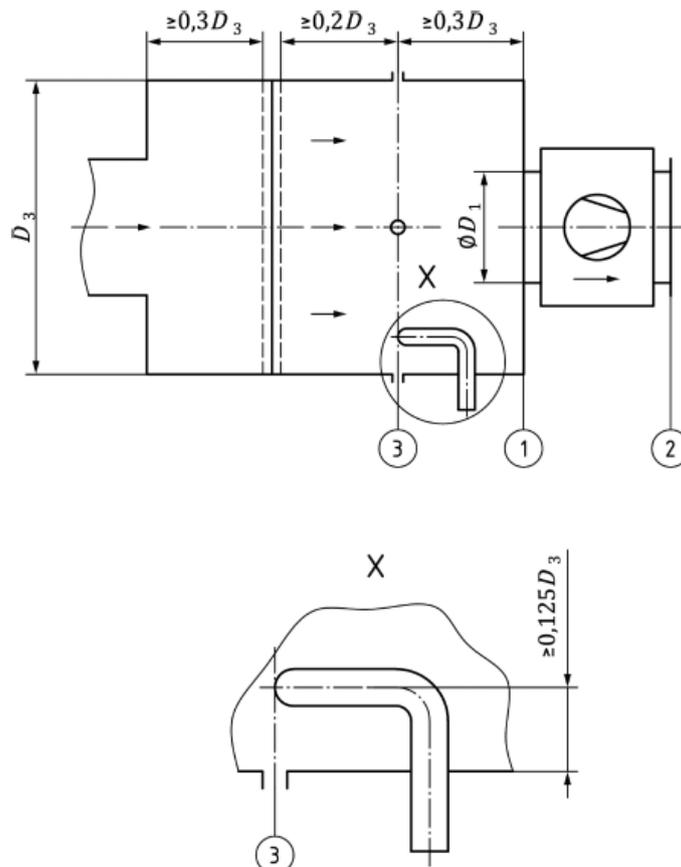


Figura B.6.1.1 – Cámaras de ensayo de entrada

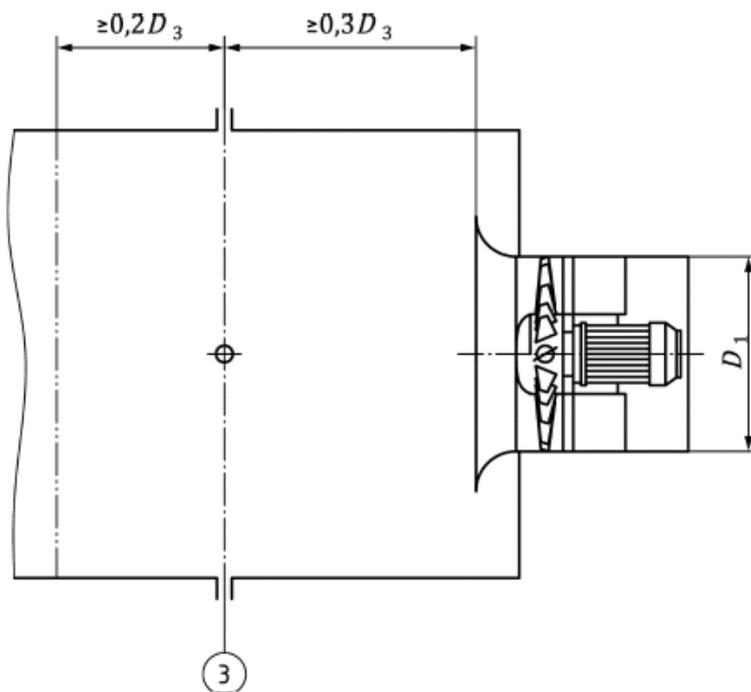
Nota: Las tomas de presión de pared y el tubo Pitot se pueden utilizar independientemente o juntos.

La longitud de la cámara debe ser suficiente para alojar cualquier ventilador a ensayar sin invadir la distancia mínima que se muestra en las figuras B.6.1.1 y B.6.1.2.

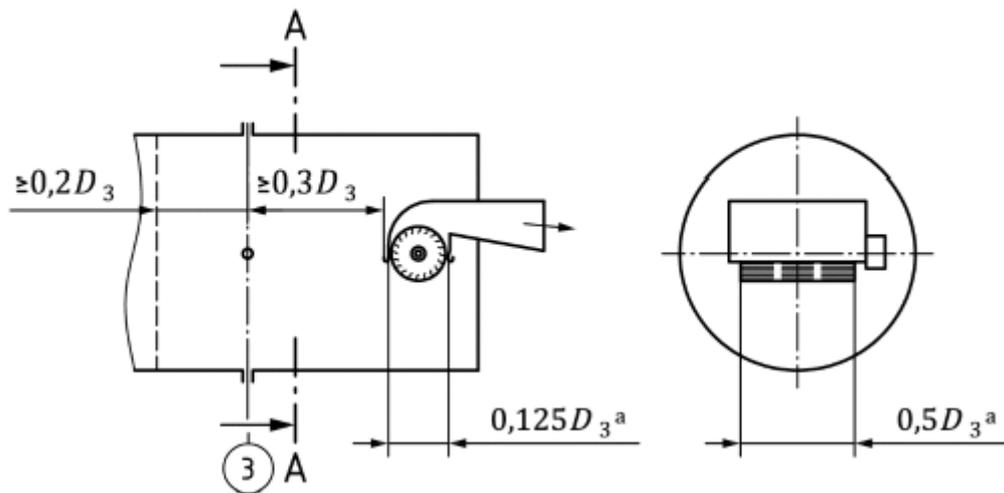
Para ventiladores donde se requiere una distancia mínima en la cámara entre la toma de presión y el siguiente segmento del ventilador, dependiendo de las condiciones de instalación, será necesario incrementar la longitud de la cámara de ensayo en función de las dimensiones mínimas indicadas en la figura B.6.1.2.

El plano 3 de medición de presión está a una distancia (véanse las figuras B.6.1.1 y B.6.1.2):

- superior o igual a $0,3 D_3$ aguas arriba de la primera distorsión aguas abajo, y
- superior o igual a $0,2 D_3$ aguas debajo de los estabilizadores de caudal.



a) ejemplo de un ventilador axial



b) ejemplo de un ventilador tangencial

Figura B.6.1.2 – ejemplos de instalaciones de ventiladores con cámara de ensayo en el lado de entrada

B.6.1.1 Ventilador a ensayar

La sección transversal de la cámara de entrada debe tener una superficie superior a cinco veces la superficie de entrada del ventilador, como se indica a continuación:

$$A_3 \geq 5 A_1$$

En una cámara de sección transversal rectangular, cualquier lado debe ser superior a dos veces el diámetro de entrada:

$$B_3 \geq 2 D_1$$

B.6.2 Cámaras de ensayo de salida normalizadas (oTC)

La sección transversal de la cámara puede ser circular, con un diámetro interior D_4 , o rectangular $b_4 \cdot h_4$ con $2/3 < b_4/h_4 < 3/2$.

Las dimensiones D_2 y D_4 corresponden al diámetro hidráulico de la sección transversal indicada a continuación:

$$D_4 = D_{h4}$$

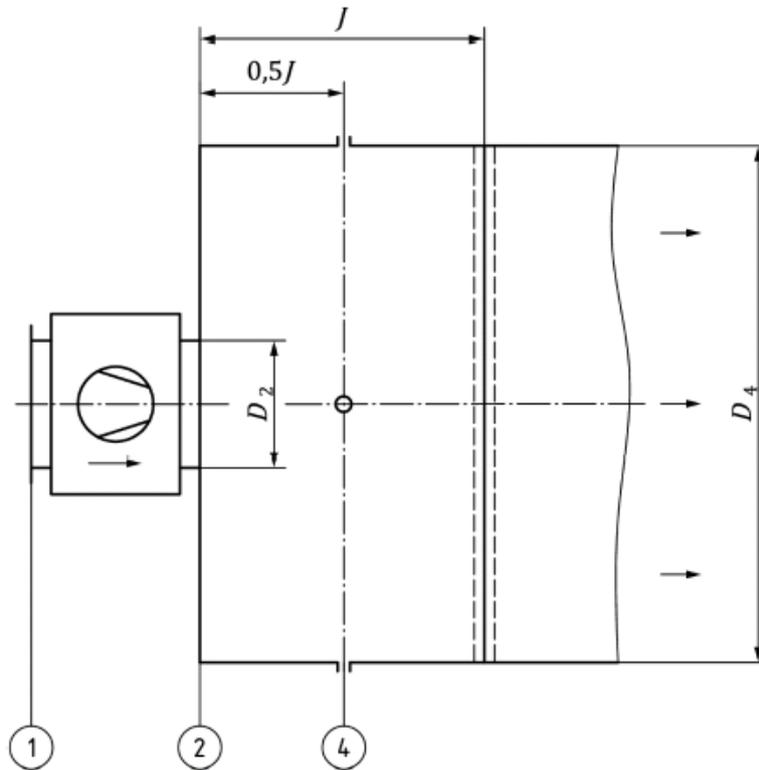


Figura B.6.2 – Cámaras de ensayo en el lado de salida

Nota 1: La distancia J es superior o igual al diámetro del conducto de salida para los ventiladores con el eje de rotación perpendicular al flujo de descarga ($J \geq D_{h2}$), y superior o igual a dos veces el diámetro del conducto de salida para los ventiladores con el eje de rotación paralelo al flujo de descarga ($J \geq 2 D_{h2}$).

B.6.2.1 Ventilador a ensayar

Las dimensiones de la cámara de salida son muy grandes en relación con las dimensiones del ventilador (equivalente a un gran espacio abierto).

La sección transversal de la cámara de ensayo de salida (véase figura **TAL1**) debe tener una superficie superior a nueve veces la superficie de salida del ventilador o del conducto de salida para ventiladores con el eje de rotación perpendicular al flujo de descarga, como se indica a continuación:

$$A_4 \geq 9 A_2$$

La superficie de la sección transversal de la cámara de ensayo de salida para ventiladores con el eje de rotación paralelo al flujo de descarga debe ser superior o igual a dieciséis veces la superficie de salida del ventilador o del conducto de salida, como se indica a continuación:

$$A_4 \geq 16 A_2$$

B.7 Dispositivos de medición de caudal

Las distancias y los conductos rectos en la entrada y en la salida de los dispositivos de medición de caudal se definen en el Anexo A. Los distintos dispositivos de medición de caudal son:

1. Tobera en la entrada (iNZ)
2. Diafragma en la entrada (iOR)
3. Sonda Pitot
4. Toberas múltiples en la cámara (mNZ)
5. Diafragma en la cámara (cOR)
6. Tobera en el conducto (dNZ)
7. Diafragma en el conducto (dOR)
8. Diafragma en la salida (oOR)

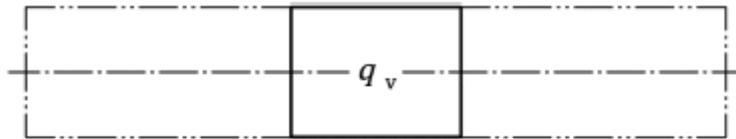


Figura B.7 – Dispositivos de medición de caudal

Anexo C - Ensayos verificación cámaras de ensayo normalizadas

Si es necesario, se deben instalar estabilizadores de caudal en las cámaras para conseguir los patrones de caudal requeridos.

La efectividad de los estabilizadores de caudal de aire en todas las cámaras se debe verificar mediante los ensayos descritos en los apartados C.1, C.2 y C.3.

Algunos ensayos de validación requieren que el caudal y la presión se determinen antes de que los estabilizadores de caudal hayan demostrado su efectividad. Se puede considerar que los ensayos realizados en estas condiciones (sin verificar los estabilizadores de caudal) son suficientemente precisos para utilizarse con el fin de establecer los criterios de aceptación.

Una vez que los estabilizadores de caudal han demostrado que se han cumplido todos los criterios de aceptación aplicables, la cámara se puede utilizar en el futuro para todos los ensayos dentro de los límites definidos por los criterios de aceptación.

C.1 Verificación del anillo piezométrico

Se tienen que medir las lecturas de presión individuales para cada toma de presión del anillo piezométrico. Cuando la media de estas lecturas es inferior o igual a 1.000 Pa, todas las lecturas individuales deben estar dentro del 5% de la media. Cuando la media de estas lecturas es superior a 1.000 Pa, todas las lecturas individuales deben estar dentro del 2% de la media.

C.2 Prueba de verificación por soplado

Este ensayo evalúa la capacidad de los estabilizadores de caudal de aire para proporcionar un flujo de aire sensiblemente uniforme aguas arriba de un plano de medición. Para este ensayo, los puntos de medición se reparten igualmente espaciados en un plano $0,1 D_h$ aguas debajo de los estabilizadores de caudal.

Para los ensayos de los estabilizadores aguas arriba de la pared de la boquilla, el ventilador auxiliar se debería accionar a su caudal máximo, todas las boquillas deben estar abiertas, la entrada de la cámara debe estar abierta y la superficie de entrada debe ser igual a la superficie más grande permitida por la sección transversal de la cámara.

Para los ensayos de los estabilizadores aguas arriba del ventilador a ensayar, el ventilador auxiliar se debería accionar a su caudal máximo, la mitad de las boquillas deben estar abiertas, la salida de la cámara debe estar abierta y la superficie de salida debe ser igual a la superficie más grande permitida por la sección transversal de la cámara.

Se deben medir las velocidades de flujo y determinar el promedio. Si la velocidad máxima es inferior a 2 m/s o si el valor de la velocidad máxima es inferior al 125% del promedio, las pantallas estabilizadores son aceptables.

C.3 Ensayo de verificación de inversión de flujo de aire en la cámara de salida

Uno de los fines de los estabilizadores de caudal es absorber la energía cinética del chorro aguas arriba y permitir su expansión normal como si fuera un espacio no confinado. Esto requiere un poco de flujo de retorno para suministrar aire para mezclar en los límites del chorro. Si los estabilizadores son demasiado restrictivos, se producirá un flujo excesivo de retorno.

Para verificar que el flujo inverso en el plano de medición de presión estática del ventilador no es excesivo, se deben realizar una serie de ensayos. Cada ensayo se debe realizar con una apertura variable en la entrada de la cámara, a partir del 11% de la superficie de la cámara y con porcentajes de aberturas cada vez más pequeños. Cada ensayo se debe realizar con todas las boquillas abiertas y el ventilador auxiliar a su caudal máximo. En cada ensayo se debe verificar que la presión estática aguas abajo de los estabilizadores de caudal es menor que la presión estática del ventilador en el plano de medición.

La serie de ensayos se puede detener con el primer conjunto de condiciones que cumpla el requisito anterior.

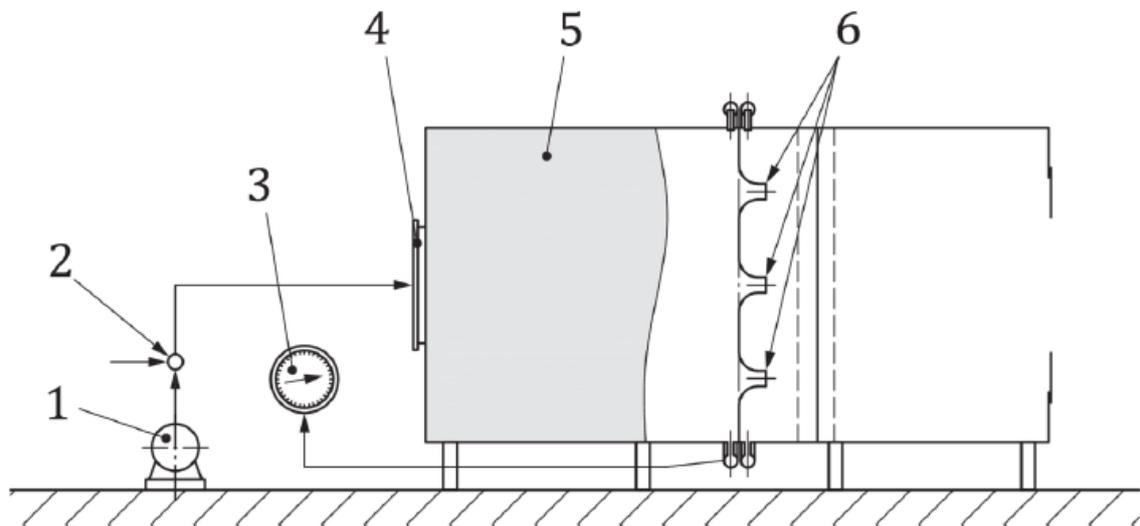
Anexo D - Procedimiento de ensayo de fugas en una cámara

El volumen de interés es el volumen entre el plano de medición y el equipo de movimiento de aire. Para una cámara de entrada, la presión podría ser negativa y, para cámaras de salida, las presiones de ensayo pueden ser positivas.

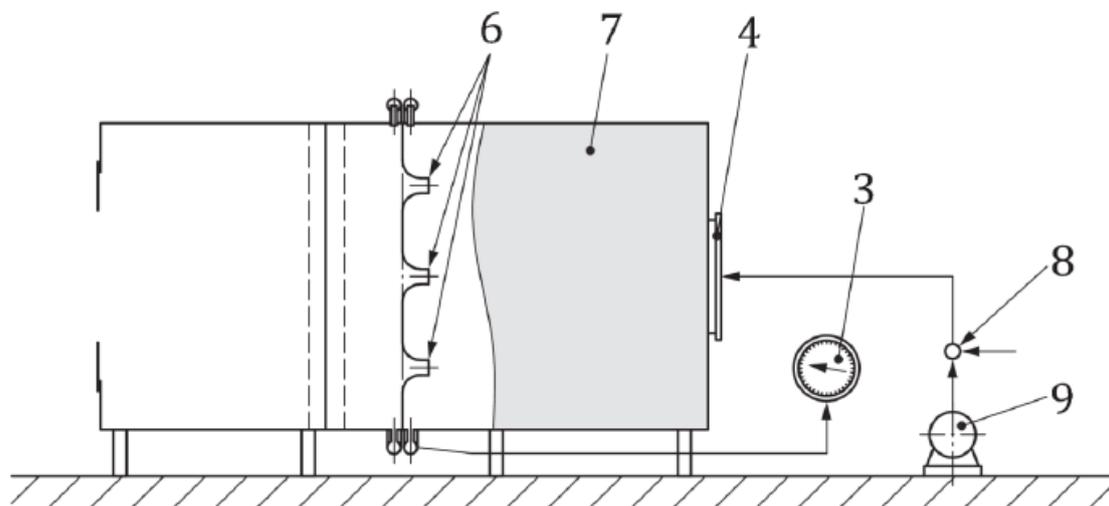
Se recomiendan tres métodos de ensayo para determinar las tasas de fuga.

D.1 Método de la caída de presión

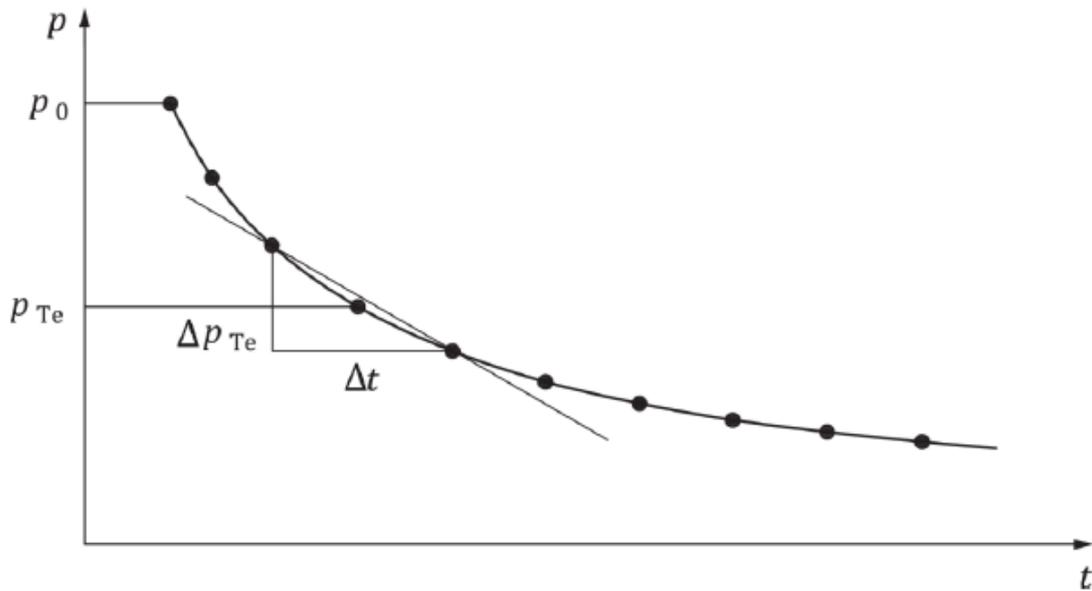
Las figuras D.1 - a) y b) representan configuraciones típicas de ensayo donde la cámara está sellada, presurizada y la válvula cerrada.



a) Configuración de la cámara del lado de salida



b) Configuración de la cámara del lado de entrada



c) Gráfico mostrando la caída de presión en la cámara en función del tiempo

Leyenda

1 Ventilador	7 Cámara de ensayos
2 Válvula	8 Válvula de ensayo
3 Manómetro	9 Bomba de vacío
4 Posición del ventilador a ensayar	p Presión, en pascales
5 Cámara de ensayos	t Tiempo, en segundos
6 Toberas conectadas	

Figura D – Método de control por caída de presión para ensayos de fugas

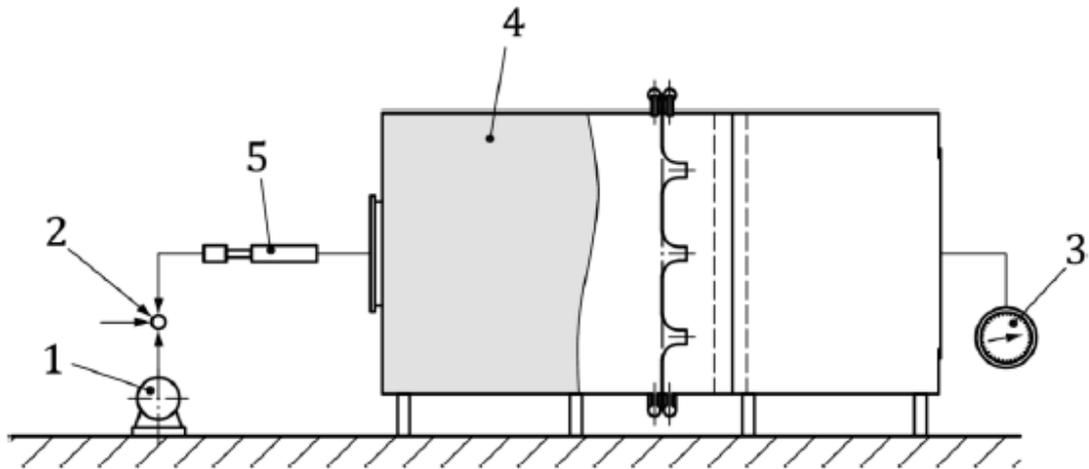
Se presuriza o despresuriza la cámara de ensayos a una presión de ensayo, p_t , superior a la presión a la que se quieren medir las fugas. Se cierra la válvula de control.

En el tiempo $t = 0$, se comienza a cronometrar y se registra la presión en intervalos de tiempo periódicos para conseguir una curva de caída como la representada en la figura Y.1 - c). Se continúa registrando la presión hasta que esta no varíe significativamente.

Las variaciones rápidas de presión indican una fuga importante que se debe localizar y corregir.

D.2 Método del caudalímetro

La figura D.2 muestra la instalación de ensayo.



Leyenda

- 1 Ventilador
- 2 Válvula
- 3 Manómetro
- 4 Cámara de ensayo
- 5 Caudalímetro

Figura D.2 – Instalación de ensayo de fugas, método del caudalímetro

El procedimiento consiste en presurizar o despresurizar la cámara después de que esté sellada y utilizar un caudalímetro para establecer la tasa de fuga. La presión en la cámara se mantiene constante. El caudalímetro dará una lectura directa de la tasa de fuga.

D.3 Método de dos fases

D.3.1 Generalidades

Para las cámaras de ensayo divididas en dos partes por una pared, el ensayo de fugas en una única fase propuesto en los capítulos D.2 y D.3 no permiten distinguir entre las fugas a través de la envolvente exterior de la cámara o a través de la pared de las toberas.

Un método de medición en dos partes puede dar información independiente de las dos fugas.

D.3.2 Primera fase

La conexión de la cámara de ensayo con el ventilador o con el conducto de ensayo se sella con un método equivalente al de la conexión típica con la carcasa del ventilador o el conducto de ensayo.

Una tobera pequeña que tenga una superficie de cuello, A_{tn} , se abre en la pared de la tobera, mientras que todas las demás toberas están selladas. El ventilador auxiliar funciona para llevar la mitad de la cámara situada entre la pared de las toberas y el ventilador auxiliar a una presión negativa (para cámaras de salida) o a una presión positiva (para cámaras de entrada) de la misma magnitud que la presión típica dentro de la cámara, en relación con la presión exterior.

La presión negativa o la presión positiva se mide junto con la presión diferencial a través de la pared de las toberas, Δp_a .

D.3.3 Segunda fase

Una tobera pequeña se monta en un orificio en un panel que cierra la abertura de la cámara de ensayos donde normalmente se conecta el ventilador al conducto de ensayo.

Se sellan todas las toberas en la pared de las toberas.

El ventilador auxiliar funciona para llevar la mitad de la cámara aguas abajo para cámaras de salida a una presión negativa, o la mitad de la cámara aguas arriba de una cámara de entrada a una presión positiva de la misma magnitud que la presión diferencial típica en la pared de las toberas.

Se miden los nuevos valores de presión negativa o presión positiva junto con la presión diferencial a través de la pared de las toberas, Δp_b .

Al resolver la siguiente fórmula se pueden estimar las superficies de fuga equivalentes, a través de la mitad de la cámara ubicada entre la apertura de conexión y la pared de las toberas, A_C , y a través de la propia pared de las toberas:

$$\begin{aligned}\sqrt{dp_b} (A_{tn} + A_W) &= \sqrt{p_{Sa}} \cdot A_C \\ \sqrt{dp_b} \cdot A_W &= \sqrt{p_{Sb}} (A_{tn} + A_W)\end{aligned}$$

La fuga en condiciones de ensayo, Q_L , se puede estimar finalmente mediante la siguiente fórmula, para cada punto de medición, como una función de la presión estática del ventilador, p_{sf} , de la presión diferencial en la pared de las toberas, Δp , y de la densidad del aire, ρ , proporcionando una estimación del error de medición debido a las fugas en la cámara:

$$Q_L = Q_C + Q_W = A_C \cdot \sqrt{\frac{2p_{sf}}{\rho}} + A_W \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Anexo E - Condiciones de referencia

Cuando se ensayan ventiladores de baja o media presión utilizando circuitos normalizados, se puede suponer que la velocidad del aire es lo suficientemente baja para que se pueda ignorar su influencia en la temperatura. Pero para una presión del ventilador superior a 2.000 Pa se debe considerar el cambio de la densidad con la presión estática y la temperatura.

Para los ensayos de ventiladores de alta presión, se debe distinguir entre los valores de estancamiento y valores estáticos de presión, temperatura y densidad.

Para obtener una evaluación rápida del límite por encima del cual se deben considerar los efectos de compresibilidad debidos a la velocidad del aire, la velocidad de referencia, $v_{2.ref}$, se define mediante la siguiente fórmula:

$$v_{2.ref} = \frac{q_{m,max}}{\rho_{ref} \cdot A_2}$$

Las condiciones de referencia del aire son las del aire normalizado, la sección de referencia es la salida del ventilador y el caudal másico de referencia es el caudal másico máximo del ventilador.

El límite de velocidad de referencia por encima del cual se debe realizar una distinción entre el estancamiento y los valores estáticos de temperatura, presión y densidad se considera igual a 65 m/s. Este valor corresponde a $Ma_x \approx 0,2$ con $\theta_{sgx}/\theta_x < 1,01$, y $f_{Mx} < 1,01$.

Anexo F - Curvas características de los ventiladores

F.1 Métodos de trazado

Los resultados reales del ensayo, o los resultados después de la conversión, se deben dibujar como una serie de puntos de ensayo en función del caudal volumétrico de entrada. Se deben trazar curvas suaves a través de esos puntos, con líneas discontinuas uniendo los huecos donde no se puedan obtener resultados estables.

Se pueden utilizar los resultados obtenidos de conversiones, indicando claramente en las curvas dibujadas los resultados que están fuera de los límites de conversión.

Para los ventiladores en los que la presión de diseño del ventilador es superior a 2.000 Pa, las indicaciones de la densidad de salida del ventilador se deben trazar utilizando la relación ρ_1 / ρ_m para $v_{2.ref} \leq 65$ m/s o la relación ρ_{sg1} / ρ_{sgm} para $v_{2.ref} > 65$ m/s.

F.2 Curva característica completa del ventilador

Es la curva característica del ventilador que se extiende desde presión estática cero hasta caudal volumétrico de entrada cero.

Normalmente solo se utiliza una parte de esta curva, y se recomienda que el suministrador indique el rango de los caudales volumétricos de entrada en los que puede trabajar el ventilador. Fuera del rango de los caudales volumétricos de entrada normales, es probable que aumente la incertidumbre de medición y se pueden desarrollar flujos no satisfactorios en la entrada o en la salida.

F.3 Ensayo para un punto de funcionamiento específico

Los ensayos para un punto de funcionamiento específico deben incluir como mínimo tres puntos de ensayo para obtener una pequeña parte de la curva característica del ventilador, incluyendo tanto el caudal volumétrico de entrada como la presión específica o la presión estática del ventilador.

Se debe dibujar también una línea de resistencia del sistema, pasando por el punto de trabajo especificado y de forma que la presión varíe con el cuadrado del caudal volumétrico de entrada y pase por el origen.

En la práctica no se calcula directamente la curva resistente sino el punto de funcionamiento deseado o nominal ($Q^*_i, \Delta p^*_i$).

El trazado de la curva resistente se realiza directamente: la pérdida de carga es proporcional al caudal al cuadrado.

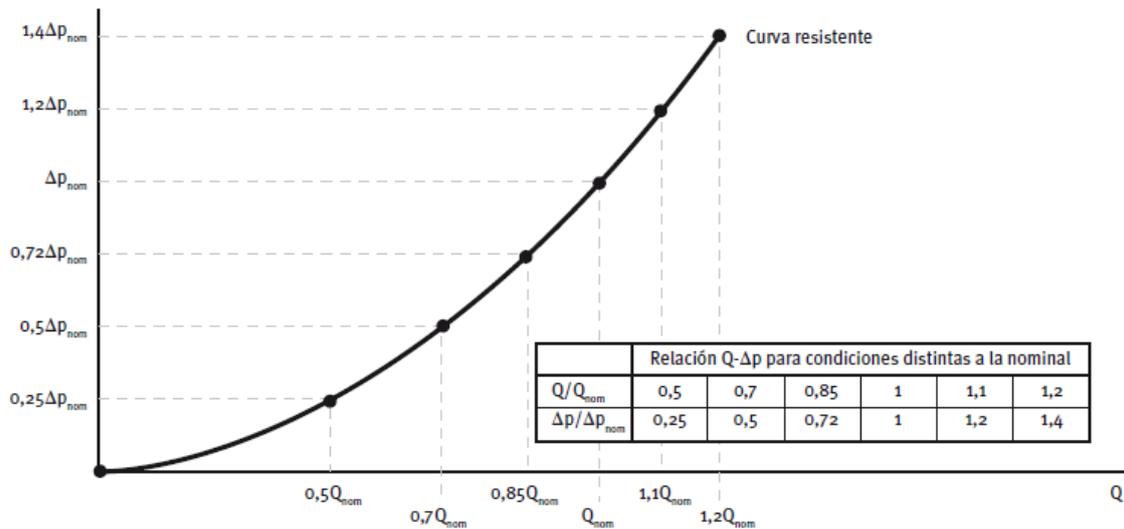


Figura F.3.1 – Relación presión-caudal para distintos puntos de la curva de la instalación

El punto de funcionamiento de la instalación se determina de la intersección de la curva característica de la instalación $\Delta p_i = f(Q)$ con la curva característica del ventilador $\Delta p_{E,V} = f(Q)$.

La Figura 11.3.2 muestra la determinación gráfica del punto de funcionamiento de la instalación ($Q_f, \Delta p_f$) dado por la intersección de la curva del ventilador (curva descendente) con la curva de la instalación (curva ascendente).

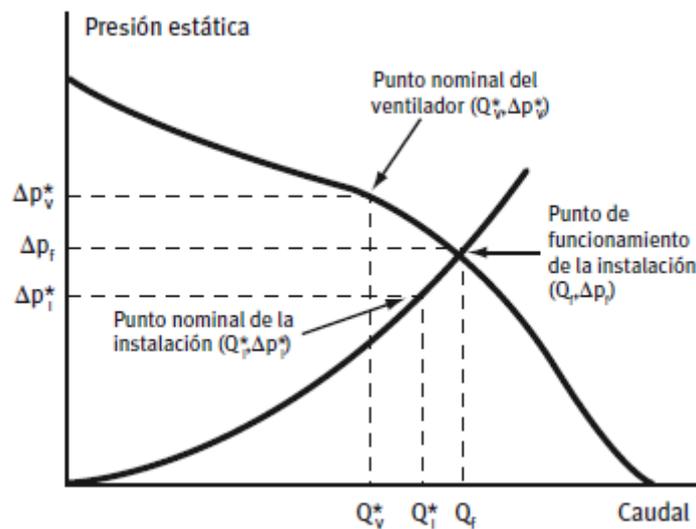


Figura F.3.2 – Punto de funcionamiento de la instalación

El punto de funcionamiento real de la instalación ($Q_f, \Delta p_f$) debe estar:

- Lo más próximo posible al punto nominal de la instalación ($Q^*_i, \Delta p^*_i$) de forma que se impulse el caudal deseado.
- Lo más próximo al punto nominal del ventilador ($Q^*_v, \Delta p^*_v$) para que el rendimiento esté próximo al rendimiento máximo.

F.4 Problemas por impulsar un caudal distinto al nominal de la instalación en instalaciones a caudal constante.

F.4.1 Caudal inferior al nominal

En una instalación de climatización, si el caudal de funcionamiento es inferior al nominal, la temperatura del aire de impulsión será distinta a la nominal.

En el caso de instalaciones de ventilación, se renovará un volumen de aire inferior al de diseño, produciéndose problemas de higiene por baja calidad del aire interior.

F.4.2 Caudal superior al nominal

En una instalación a caudal constante, si se impulsa más caudal del necesario se tendrá un mayor consumo energético: las pérdidas de presión son proporcionales al cuadrado del caudal $\Delta p \propto Q^2$ y la potencia es proporcional al cubo del caudal $P_v \propto Q^3$.

En el caso de ventilación, el exceso de caudal de aire exterior produce, además, un aumento de la demanda energética de la instalación de climatización o calefacción.

F.5 Regulación del punto de funcionamiento

Para ajustar el caudal de funcionamiento Q_f al caudal nominal de la instalación Q^*_i se puede emplear uno de los siguientes sistemas de regulación:

F.5.1 Regulación por estrangulamiento con compuerta en serie

Realizando una pérdida de carga adicional por estrangulamiento de una compuerta se consigue ajustar el caudal al valor deseado. Se trata de un ajuste de caudal por cambio de la curva resistente de la instalación.

F.5.2 Regulación por by-pass

Una forma común de ajustar el caudal en instalaciones de climatización por conductos consiste en realizar un by-pass en los conductos de impulsión y retorno. Se consigue una regulación del caudal impulsado a la instalación sin reducir el caudal de aire que pasa por la batería de frío o calor.

El sistema puede ser bueno desde el punto de vista de regulación del sistema pero muy malo desde el punto de vista del consumo energético del ventilador. El ventilador impulsa el flujo que pasa por el by-pass que no representa ningún beneficio a la instalación

F.5.3 Regulación por variación del régimen de giro

La variación de la velocidad de giro del ventilador permite ajustar el caudal a su valor nominal con poca penalización energética. Actualmente, se trata del sistema habitual de regulación en los sistemas de ventilación y climatización con caudal de aire variable. Se emplean convertidores de frecuencia con motores trifásicos y reguladores de velocidad que varían la tensión de alimentación en motores monofásicos de reducida potencia.

Anexo G - Reglas para la conversión de los resultados de los ensayos

G.1 Generalidades

Los resultados de los ensayos solo se pueden comparar directamente con los valores garantizados si, durante el ensayo de aceptación, las medidas de las características aerodinámicas del ventilador se toman en las condiciones especificadas.

En muchos ensayos realizados en ventiladores, no es posible reproducir y mantener exactamente las condiciones de funcionamiento y, o accionamiento en el circuito de ensayo como se especifica en las condiciones de funcionamiento. Solo los resultados convertidos a esas condiciones de funcionamiento se pueden comparar con los valores especificados.

Durante un ensayo de laboratorio, la densidad del aire y la velocidad de rotación pueden variar ligeramente de un punto de determinación a otro. Puede ser conveniente convertir todos los puntos de prueba a una densidad nominal, a una velocidad constante o a ambas.

Para ventiladores muy grandes, se pueden realizar ensayos de modelos en circuitos normalizados cuando el ensayo a plena escala real es impracticable debido a las limitaciones de suministro de potencia o a las dimensiones de los circuitos normalizados.

G.2 Leyes de semejanza de los ventiladores

G.2.1 Generalidades

Dos ventiladores que tengan similares condiciones de caudal tendrán características de funcionamiento similares. El grado de semejanza de las características de funcionamiento dependerá del grado de semejanza de ambos ventiladores y de los caudales a través de los ventiladores.

G.2.2 Semejanza geométrica

Dos ventiladores diferentes son geoméricamente semejantes cuando todos los ángulos correspondientes son iguales en los dos ventiladores, y cuando todas las relaciones entre dimensiones correspondientes de ambos ventiladores sean iguales.

La semejanza geométrica completa requiere que se consigan proporciones dimensionales iguales también para los valores de espesores, holguras y rugosidades, así como otras dimensiones lineales de pasos de flujo.

G.2.3 Semejanza del número de Reynolds

La semejanza del número de Reynolds es necesaria para mantener iguales la relación de los espesores de la capa límite, los perfiles de velocidad y las pérdidas de fricción, como se indica en la siguiente fórmula:

$$Re_u = \frac{u \cdot D_r \cdot \rho_1}{\mu_1}$$

Cuando aumento el número de Reynolds periférico, los coeficientes de pérdida por fricción disminuyen.

G.2.4 Número de Mach

Para los números de Mach periféricos superiores a 0,15 pueden surgir importantes diferencias si Ma_u no se mantiene igual durante las condiciones de ensayo y en las condiciones especificadas.

En ventiladores, el número de Mach periférico viene indicado en la siguiente fórmula:

$$Ma_u = \frac{u}{\sqrt{\kappa \cdot R_{wet} \cdot \theta_1}}$$

Cuando este número de Mach aumenta, el número de Reynolds periférico aumenta, al igual que la presión del ventilador.

Cuando la presión del ventilador aumenta, la densidad media del ventilador aumenta, mientras que la relación entre la densidad de entrada y la densidad media del ventilador disminuye. Este es el motivo por el que, cuando Ma_u aumenta, las características y el rendimiento del ventilador aumentan inicialmente y a continuación tienden a disminuir.

Este efecto depende del tipo de ventilador, del diseño del rodete y de la posición del punto de funcionamiento en la curva característica del ventilador.

Anexo H - Local y realización del ensayo

H.1 Local de ensayo

Todos los circuitos de ensayo deben ser rectos. Las uniones entre las distintas secciones del circuito deben estar correctamente alineadas y exentas de protuberancias internas.

El ensamblaje del ventilador con su circuito de aire de ensayo se debe ubicar de forma que, cuando el ventilador no esté funcionando, no haya en las cercanías de la entrada y la salida del ensamblaje corrientes de aire con velocidades superiores a 1m/s. se debe tener cuidado para evitar la presencia de cualquier obstáculo que pueda modificar significativamente el flujo de aire en la entrada o en la salida del ventilador a ensayar o la configuración de ensayo.

H.2 Fugas

Las fugas de la instalación de ensayo entre el plano de medición de caudal y el ventilador a ensayar deben ser despreciables en relación con el caudal máximo del ventilador a ensayar.

Se debe realizar un ensayo de estanquidad antes de la utilización inicial y después, periódicamente, tomando medidas correctivas si es necesario. Véase en el Anexo D los métodos de ensayo de estanquidad recomendados.

H.3 Fluido utilizado

El fluido utilizado para los ensayos con circuitos normalizados debe ser aire atmosférico.

H.4 Velocidad de rotación

Para obtener las características a velocidad constante, el ventilador preferentemente debe operar a una velocidad próxima a la especificada. Cuando la velocidad sea sustancialmente diferente, o cuando el ventilador se vaya a utilizar con un gas distinto del aire, o con una densidad diferente, se deben aplicar los requisitos del capítulo 9.

H.5 Funcionamiento estable

Antes de realizar las mediciones en cualquier punto de la curva de caudal del ventilador, éste debe funcionar hasta que se consiga su régimen de funcionamiento estable. Si no es posible alcanzar el régimen estable, se puede realizar la medición y se debe registrar la inestabilidad en el informe de ensayo.

H.6 Condiciones ambientales

Durante las series de tomas requeridas para determinar las curvas características del ventilador se deben tomar lecturas dentro del local de ensayo de la presión atmosférica, la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo. Si las condiciones ambientales varían, se deben tomar suficientes lecturas para obtener por promedio (para cada punto de ensayo de la curva característica) un valor que sea compatible con la precisión requerida.

H.7 Lecturas de presión

La presión en los circuitos de ensayo se deben observar durante un periodo superior o igual a 1 minuto para cada punto de la curva característica del ventilador. Las fluctuaciones rápidas se deben amortiguar en el manómetro y, si las lecturas siguen todavía mostrando variaciones aleatorias, se debe registrar un número suficiente de tomas para asegurar que se obtiene un promedio de tiempo dentro de los límites de precisión requeridos.

H.8 Ensayos para un punto de funcionamiento específico

Los ensayos para un punto de funcionamiento específico deben contener como mínimo tres puntos de ensayo para determinar una pequeña parte de la curva característica que incluya dicho punto. Los puntos medidos se deben indicar en el trazado.

H.9 Ensayos para obtener la curva característica del ventilador

Los ensayos para determinar las curvas características de un ventilador deben contener un número suficiente de puntos de ensayo que permitan trazar la curva característica dentro del rango normal de funcionamiento. Se requerirán puntos de ensayo más cercanos donde exista la evidencia de un cambio brusco en la pendiente de la curva característica.