



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
INSTALACIÓN PARA SIMULAR ESTORNUDOS**

Autora:

Álvarez Dehesa, Diana Victoria

Tutor:

**Castro Ruiz, Francisco
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, julio de 2019.

RESUMEN

La transmisión de enfermedades infecciosas a través del aire es un tema de gran interés dentro del ámbito de la sanidad. La tos y los estornudos son las fuentes más frecuentes de partículas infecciosas. En este trabajo se procederá al diseño de un simulador de estornudos para así poder evaluar los modelos que describen la difusión de estas partículas infecciosas.

Se estudian los parámetros que caracterizan fluidodinámicamente el estornudo y el diseño de instalaciones ya existentes para su análisis. A partir de ahí, se expone una configuración inicial, con la descripción de cada uno de sus componentes y cálculos necesarios para su diseño. Una vez concretado todo esto, se realiza el modelado en 3D de las distintas piezas que hay que fabricar y se elaboran los correspondientes planos.

Por último, se describen las etapas de fabricación de los elementos de la instalación, incluyendo el material y máquinas empleadas para ello, y se presenta una estimación de su presupuesto de fabricación.

PALABRAS CLAVE: Estornudo, transmisión enfermedades, partículas infecciosas, gotas, flujo bifásico.

ABSTRACT

The airborne transmission of infectious diseases is a subject of great interest within the health field. Coughing and sneezing are the most frequent sources of infectious particles. Along this work, a sneezing simulator will be designed in order to evaluate the models describing the diffusion of these infectious particles.

On the one hand, parameters that characterize fluidodynamically sneezing are studied and the design of existing installations is analyzed. From there, an initial configuration is exposed, with the description of each of its components and necessary calculations for its design. Once everything mentioned is completed, the 3D modeling of the different elements that have to be manufactured and their corresponding plans are made.

Finally, the manufacturing stages of the elements of the installation are described, as well as the material and machines used for it, and an estimation of its manufacturing budget is presented.

KEYWORDS: Sneeze, transmission of disease, infectious particles, droplets, two-phase flow.

Índice

Introducción y objetivos.....	1
- Introducción.....	1
- Objetivos.....	1
- Estructura del trabajo.....	2
Capítulo 1. Nociones básicas.	3
1.1 Caracterización de los estornudos.....	3
1.2 Estudio de instalaciones existentes para simular la tos y el estornudo.....	6
1.2.1 Ventajas e inconvenientes de cada una de las instalaciones.....	12
Capítulo 2. Diseño de la instalación.....	15
2.1. Idea inicial.....	15
2.2. Dimensionamiento de conductos.....	16
2.2.1. Presión del ventilador centrífugo.....	17
2.2.2. Presión del ventilador del ciclón.....	21
2.3. Generador de gotas.....	23
2.3.1. Funcionamiento del generador.....	23
2.3.2. Ensayo para determinar la concentración.....	24
2.4. Dimensionamiento del ciclón.....	29
2.5. Válvula de apertura.....	32
2.6. Ventilador centrífugo.....	33
2.7. Generador de filamentos.....	34
Capítulo 3. Desarrollo de los elementos de la instalación.	37
3.1. Diseño del acoplamiento ventilador – válvula.....	37
3.2. Diseño de la cámara principal.....	37
3.3. Diseño del ciclón.....	39
3.4. Diseño de la estructura soporte.....	40
3.5. Diseño de los codos.....	41
3.6. Conductos.....	41
3.7. Imagen de la instalación completa.....	42
Capítulo 4. Plan de construcción de la instalación.....	45
4.1. Material y método.....	45
4.2. Proceso para la fabricación.....	45
4.2.1. Cámara principal.....	45

4.2.2. Ciclón	46
4.3. Presupuesto	48
4.3.1. Costes directos.....	48
4.3.2. Costes indirectos	49
4.3.3. Coste total.....	49
Conclusiones.....	51
Bibliografía.....	53
Anexo I. Generador TSI 9307	55
Anexo II. Planos de la instalación	57

Introducción y objetivos

- Introducción

La gripe y los resfriados, así como otras más severas como la meningitis o la gripe aviar, son enfermedades infecciosas que se transmiten a través del aire. Es por eso que los mecanismos de transmisión de estas enfermedades siempre han sido un tema de interés sanitario en todo el mundo. Entre las fuentes más frecuentes que producen partículas infecciosas, origen de las infecciones, se encuentran los estornudos, la tos, el habla, o simplemente la respiración.

Entender y caracterizar los fenómenos fluidomecánicos que aparecen en estos mecanismos, puede ayudar a controlar la transmisión de enfermedades a través del aire. Un estudio realizado en una estación de tren, un centro comercial y un hospital, reveló que aproximadamente una de cada cuatro personas no se cubren la boca al toser o estornudar [1]. Esto provoca que otras personas sanas, puedan inhalar las partículas o gotas producidas por los sujetos infectados, o bien los residuos de las mismas después de la evaporación, y por tanto, contraer la enfermedad.

Estas gotas exhaladas presentan diferentes tamaños, dependiendo de los cuales recorrerán más o menos distancia, y lo que es más importante, transportarán mayor o menor cantidad de microorganismos con ellas.

Además, ya que actualmente la gente pasa la mayor parte del tiempo en espacios de trabajo cerrados, podrían ser fácilmente infectados por estas enfermedades de transmisión aérea si hubiera una pandemia.

Por todo esto, hay una clara necesidad para la comunidad científica de predecir y controlar la transmisión de estas enfermedades a través del aire. Conocer con precisión la distribución de tamaños y distancias recorridas por las gotas espiratorias, ayudaría en la formulación de estrategias de prevención y protección, consiguiendo así disminuir los impactos sociales y económicos negativos que traen consigo estas pandemias.

- Objetivos

Dentro de las distintas fuentes de partículas infecciosas, origen de estas enfermedades, en este trabajo se abordará el estornudo, que es una de las de las más peligrosas debido a que es donde la velocidad es más elevada y la que mayor cantidad de gotas de saliva genera.

El objetivo de este trabajo consiste en diseñar y plantear la construcción de una pequeña instalación que reproduzca las características fluidomecánicas de un estornudo, para así posteriormente poder caracterizar, mediante la técnica PIV

(*Particle Image Velocimetry*), la propagación de gotas que se produce tras un estornudo.

Se busca diseñar una instalación que sea modular, robusta, que permita variar los parámetros del estornudo, y en la que este pueda ser caracterizado.

- Estructura del trabajo

Primeramente se analizarán los estudios existentes sobre estornudos, para así poder caracterizar cada uno de los parámetros que los gobiernan y seleccionar los requisitos que precisará la instalación. A continuación, se estudiarán instalaciones ya existentes para la caracterización de estornudos, señalando los aspectos más interesantes de cada una de ellas que puedan servir de utilidad en el diseño.

Posteriormente, se realizará un diseño de la instalación, con la descripción, cálculos correspondientes (dimensionamientos, pérdidas de carga, ensayos, etc.), y caracterización cada uno de los elementos que la conforman. Una vez esté todo definido, se presentará el modelado en 3D de las piezas necesarias, donde se plantearán las mejoras y simplificaciones en el diseño, con sus planos correspondientes.

Por último se planteará la construcción de la instalación, estableciendo los pasos a seguir en la fabricación y montaje, así como el material y maquinaria utilizados, realizando además una estimación de los costes.

Capítulo 1. Nociones básicas.

1.1 Caracterización de los estornudos

Un estornudo es, según la RAE, la expulsión violenta del aire de los pulmones, por la espiración involuntaria y repentina promovida por un estímulo que actúa sobre la membrana pituitaria. Puede estar causado por múltiples factores, tanto de carácter clínico como puede ser la rinitis (rinitis alérgica, rinitis infecciosa o de otros tipos), como por causas inocuas, como mirar a una luz brillante o por la estimulación física del nervio trigémino (al tirar del pelo o depilarse las cejas) [2]. Por lo tanto, se podría decir que un estornudo es un fenómeno no estacionario de flujo bifásico (aire-agua).

A pesar de las pequeñas diferencias que puede haber entre los estornudos producidos por unas personas u otras (dependiendo de la edad, masa corporal, etc.), en este primer capítulo se procederá a cuantificar, aproximadamente, los parámetros que los caracterizan.

En 2009 se realizó un estudio para medir, entre otras cosas, el flujo volumétrico de aire que se expulsa durante la tos [3]. Para ello se colocó una máscara con un espirómetro a un grupo variado de personas. Con los resultados obtenidos, visibles en la Figura 1, se obtuvieron un rango de valores de flujo de aire de entre 3 y 8.2 L/s para hombres, y 1.6 y 6 L/s para mujeres.

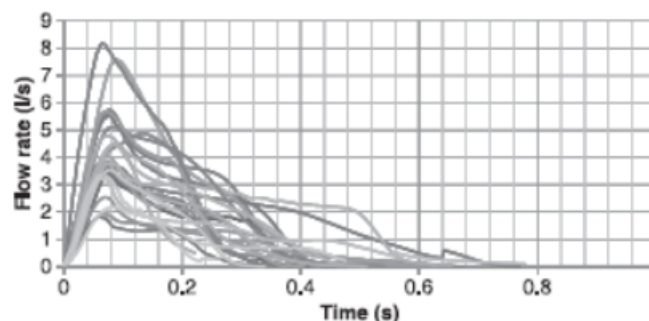


Figura 1. Flujo de aire obtenido en [1].

En un estornudo la velocidad del fluido es mayor, pero la sección de paso que atraviesa es la misma que en la tos, por lo tanto, el flujo de aire será más elevado.

Para estimarse la duración de un estornudo, se realizaron unas grabaciones de video a alta velocidad en 2016 [4] de personas estornudando, donde se observó con gran precisión que puede aproximarse la duración de los mismos en torno a 0.2-0.25 segundos, tardando un poco más en desaparecer la nube de gotas completamente.

Respecto a la velocidad del estornudo, en la Tabla 1. Velocidad del estornudo. se recogen distintos valores según los trabajos de diversos autores. Esta variación se debe al empleo de diferentes métodos para su obtención.

Tabla 1. Velocidad del estornudo.

REFERENCIA	VELOCIDAD DEL ESTORNUDO (m/s)
Scharfman et al. [4]	14 - 35
Zhao et al. [5]	20
Nishimura et al. [6]	8
Gao et al. [7]	20

Debido a estas velocidades, las gotas que transporta el estornudo, pueden alcanzar una distancia máxima de entre 0.6 y 0.9 metros [4, 6].

También existe en la literatura un amplio rango en torno a los tamaños de las partículas de saliva expelidas en el estornudo. Como se puede observar en la Tabla 2. Tamaños de las gotas que transporta un estornudo., los diámetros de estas gotas oscilan entre valores de 1 μm a 1 mm, o incluso se ha comprobado la presencia de pequeños filamentos líquidos que terminan rompiéndose en gotas. De nuevo, esta variación en los tamaños se debe a los diferentes métodos que se han utilizado para medirlas y de su resolución temporal, ya que estas gotas al ser de pequeño tamaño se evaporan rápidamente.

Tabla 2. Tamaños de las gotas que transporta un estornudo.

REFERENCIA	TAMAÑO DE LAS GOTAS (μm)
Duguid [8]	2 - 100, con un máximo en 4 - 8
Han et al. [9]	341.5 - 398.1
Johnson et al. [10]	1 - 1000
Scharfman et al. [4]	160 - 1000, además de filamentos
Wan et al. [11]	1.5 - 1500, con un máximo en 12
Zhao et al. [5]	10 - 100, pero se fragmentan

Para conocer la concentración de gotas en un estornudo, se realizó un estudio [12] que dictaminó una cantidad del orden de magnitud de 10^9 gotas/ m^3 durante la tos. Además, basándose en las mediciones de Duguid [8], se puede aproximar la concentración durante el estornudo como 200 veces la existente durante la tos [13]. Esto indicaría un valor del orden de 10^{11} gotas/ m^3 . Sin embargo, en un estudio más reciente [14] se concluyó que la concentración de gotas durante la tos era de $2.4 \cdot 10^6$ - $5.2 \cdot 10^6$ gotas/ m^3 , la cual está 3 órdenes de magnitud por debajo de la estimada según [12].

La densidad de la saliva es ligeramente superior a la del agua, siendo de aproximadamente $1050 \text{ Kg}/\text{m}^3$, debido a la mucosidad y a las sales que lleva disueltas. Según [11], disolviendo 12 gramos de cloruro de sodio y mezclando 76 gramos de glicerina pura en 1 litro de agua destilada, puede obtenerse una solución que simula la saliva.

Por último, sólo queda caracterizar la geometría de la boca y la dirección del flujo al estornudar. En el estudio realizado en [3], se obtuvo que el área de salida en los hombres es de $4 \pm 0.95 \text{ cm}^2$, mientras que en las mujeres es de $3.37 \pm 1.40 \text{ cm}^2$. Tomando un valor medio de 4 cm^2 , y aproximando el área de la boca a un círculo, este tendría 2.4 cm de diámetro.

Además, en ese mismo estudio [3] se observó que el estornudo se produce en una dirección descendente en diagonal, caracterizada por los ángulos de la Figura 2, cuyos valores son $\theta=90^\circ$, $\theta_1= 15\pm 5^\circ$ y $\theta_2= 40\pm 4^\circ$.

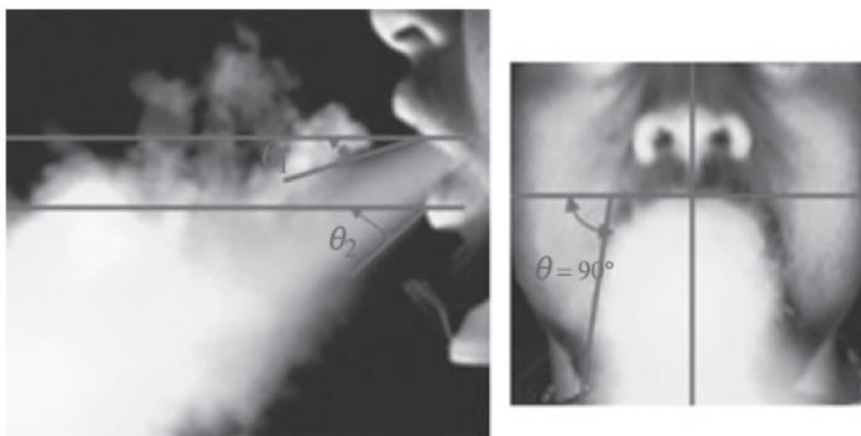


Figura 2. Ángulos para caracterizar la dirección del estornudo [3].

Por lo tanto, las características que definen un estornudo, en las cuales se basarán los requisitos que deberá cumplir la instalación, pueden verse resumidas en la Tabla 3.

Tabla 3. Características del estornudo.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Flujo volumétrico	Mayor a 8 L/s
Duración del estornudo	0.2 segundos
Velocidad de salida	20 m/s
Tamaño de gotas	1 μm - 1 mm, siendo la mayoría más próximas a 1 μm .
Concentración de gotas	Mínimo del orden de 10^6 gotas/ m^3
Diámetro de la sección de salida	2.4 cm
Dirección del estornudo	Diagonal descendente

1.2 Estudio de instalaciones existentes para simular la tos y el estornudo.

A continuación, se presenta una descripción de instalaciones ya existentes para simular la tos y el estornudo, con un análisis de las características de cada una de ellas y los elementos que las constituyen.

I. Instalación de Liu et al.

En 2014, [15] utilizó la instalación de la Figura 3. El experimento consistía en generar un flujo de aire con gotas de diferentes tamaños en suspensión, y así observar cómo afectaba el tamaño de las gotas al transporte en la región del chorro de tos y en las proximidades de un sujeto situado cerca del mismo.

La cámara central de la instalación, tiene unas dimensiones de $0.25 \times 0.25 \times 0.25$ m³, por lo que posee una capacidad de 15.6 litros. El chorro de tos se produce mediante la inyección en la cámara de aire a presión, contenido en un tanque situado aparte, controlada por una válvula solenoide de respuesta rápida. En el interior de la cámara se puede observar una rejilla o “enderezador” de flujo, para así crear un flujo unidireccional tipo pistón.

Según [15], en condiciones ideales, la tasa de gotas que el chorro de aire no arrastra a su paso, es muy baja.

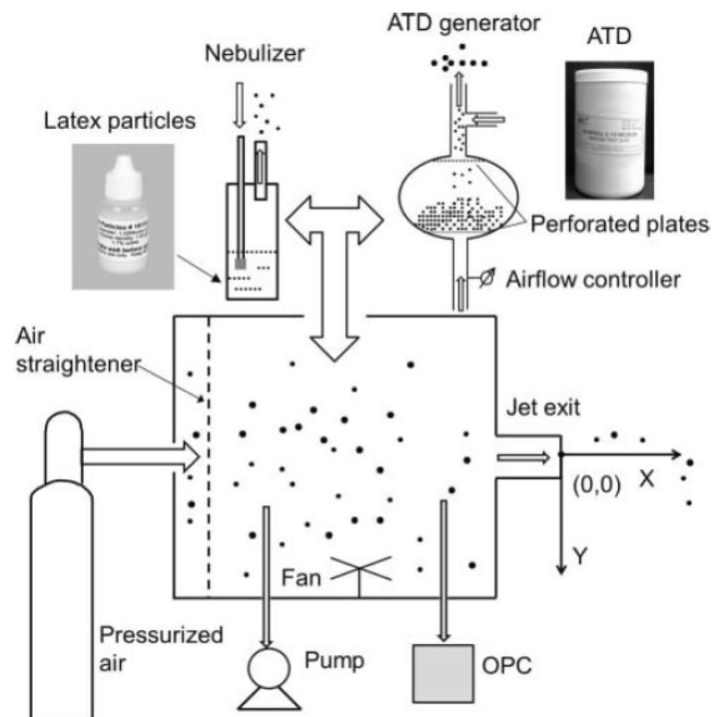


Figura 3. Instalación de Liu et al. para simular la tos [15].

En la parte superior, Figura 3, se tiene un generador de gotas (o nebulizador). Cuando este se enciende, se activa un compresor o bomba de vacío conectado a la cámara que extrae aire, para así mantener una ligera depresión en el interior, evitando que las partículas generadas salgan de ella por el conducto de salida antes del chorro de tos. Además, en la parte inferior hay un pequeño ventilador para conservar la mezcla.

El tubo de salida que utiliza es de 6 cm de largo, con un diámetro de 2.4 cm para simular el tamaño de la boca humana mencionado anteriormente.

En este caso, se ajustaron los parámetros para que la velocidad de salida del chorro fuera de 6.08 m/s y durara un intervalo de tiempo de 1 segundo.

Además del nebulizador, que generaba gotas de $0.77 \mu\text{m}$ y $2.5 \mu\text{m}$, se creó otro generador de gotas (el ATD) que proporcionaba partículas de mayor tamaño (hasta $7 \mu\text{m}$). Para todas estas gotas utilizaron un fluido tipo látex, con una densidad de 1.05 g/cm^3 , que simulaba la saliva.

II. Instalación de Wan et al.

La instalación de la Figura 4 ha sido utilizada en varias investigaciones por los autores de [11], para estudiar la dispersión y deposición de las partículas que se expulsan al toser en diferentes ambientes, como una sala de hospital o una cabina de avión.

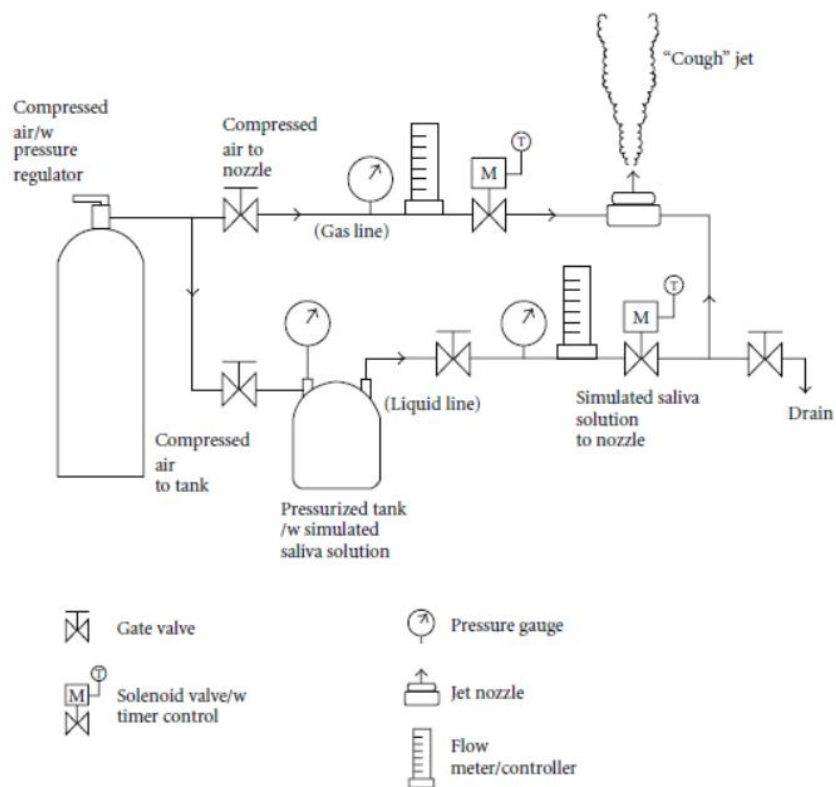


Figura 4. Instalación de Wan et al. para simular la tos [11].

Este simulador de tos, Figura 4, consiste en una boquilla neumática alimentada mediante dos líneas de suministro, una con aire a presión y otra con líquido. El aire proviene de un tanque, que consta además con un regulador para controlar la presión del aire comprimido que expulsa, cuya salida se divide en dos ramas, yendo una rama directamente a la boquilla, y la otra a otro tanque que contiene el líquido, produciendo así la atomización del mismo. El líquido empleado es la simulación de saliva cuya obtención, ya descrita anteriormente, se consigue con 12 gramos de cloruro de sodio y 76 gramos de glicerina pura en 1 litro de agua destilada.

El aire a presión y el líquido atomizado se mezclan externamente en la punta de la boquilla, a través de un tapón o casquillo de aire, produciendo un flujo de inyección en forma de cono completo con un ángulo sólido de aproximadamente $34^\circ (\pm 17^\circ)$ desde el eje central).

El sistema de control de presión y flujo para producir el chorro de tos deseado es visible en la Figura 4, mediante el conjunto de válvulas y reguladores de presión de la instalación. Con estos, se fueron ajustando todos los parámetros hasta conseguir la distribución y la cantidad de gotas deseada, mediante la medición del chorro de salida con un sistema IMI (*Interferometric Mie Imaging*).

Además, se observa también en el esquema una purga en la línea de líquido.

III. Instalación de Ren et al.

En [16] construyeron la instalación de la Figura 5 para simular la tos y así estudiar la efectividad del arrastre, por parte del aire, de la mucosidad que se almacena en los conductos que van a los pulmones (tráquea y bronquios).

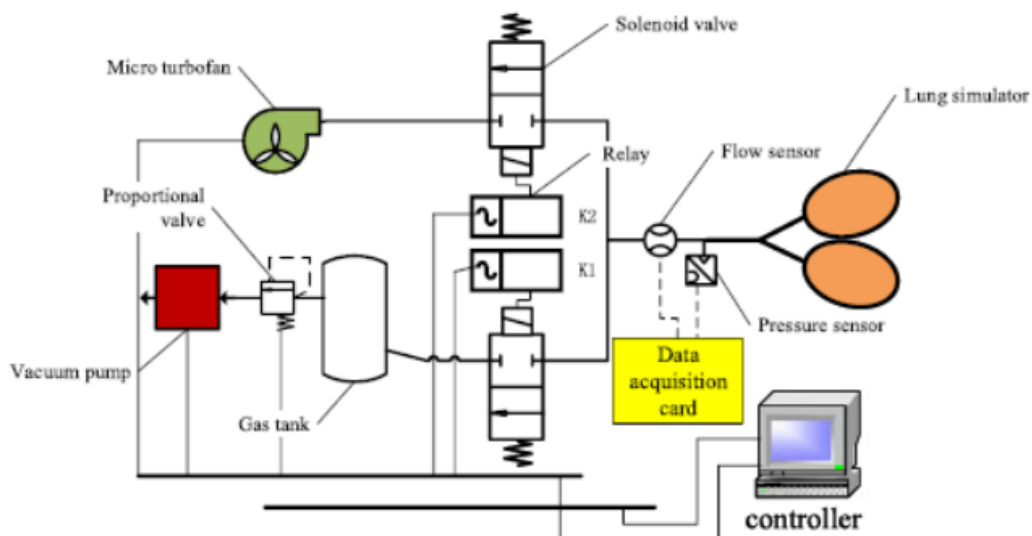


Figura 5. Instalación de [16] para estudiar el efecto de la tos en la mucosidad.

La instalación, basada en un sistema neumático, consiste en un tanque de gas (de 10 L), unido a una bomba de vacío que genera una depresión, mediante una válvula proporcional con la cual se establece el valor de esa presión; y un pequeño ventilador turbo para suministrar el aire, que, al igual que el tanque de gas, se encuentra unido a una válvula solenoide. Ambas válvulas conectan con un sensor de flujo y presión, y este sensor, con el conducto que lleva al simulador de pulmones.

Toda la instalación está controlada por ordenador, el cual recibe los datos del sensor gracias a una tarjeta de adquisición de datos, y controla a su vez el ventilador, las válvulas solenoides y la válvula proporcional.

IV. Instalación de Zhang et al.

En 2017, [17] diseñaron y caracterizaron la instalación de la Figura 6 para estudiar la transmisión de enfermedades a través de la tos humana.

Esta instalación está formada por tres subsistemas: el simulador de estornudos con una unidad de control, un sistema de medición de la velocidad y por último, un sistema para generar los diferentes tamaños de gota.

Como se puede ver en el esquema de la Figura 6, la instalación consiste en un tanque de aire a presión, un nebulizador y un eyector, conectados en serie. El flujo de aire lo suministra el tanque, en el nebulizador se crean las gotas más pequeñas, y en el eyector, las gotas de mayor tamaño.

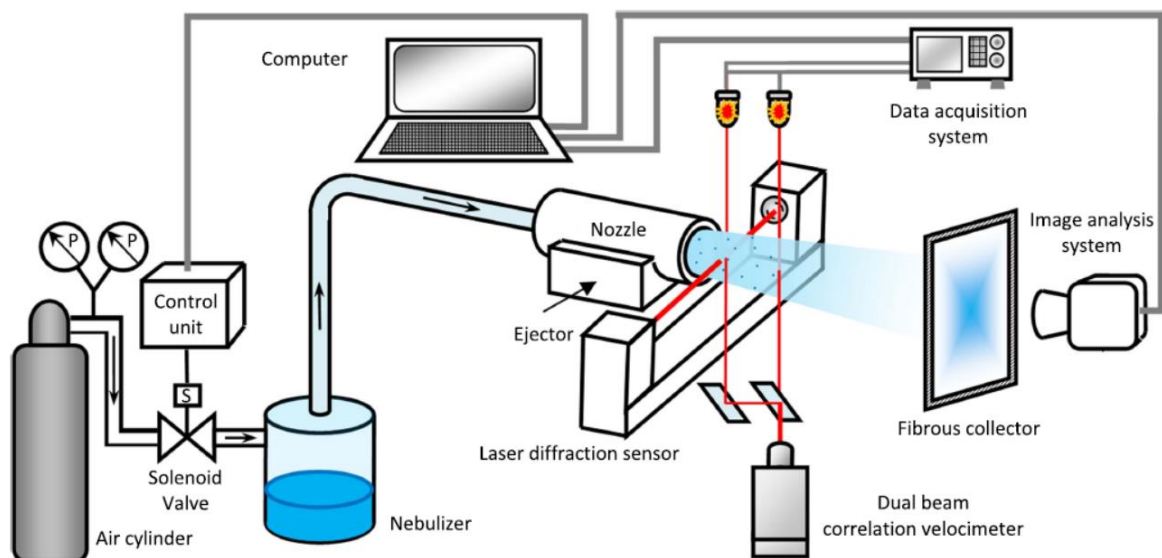


Figura 6. Esquema de la instalación de [17].

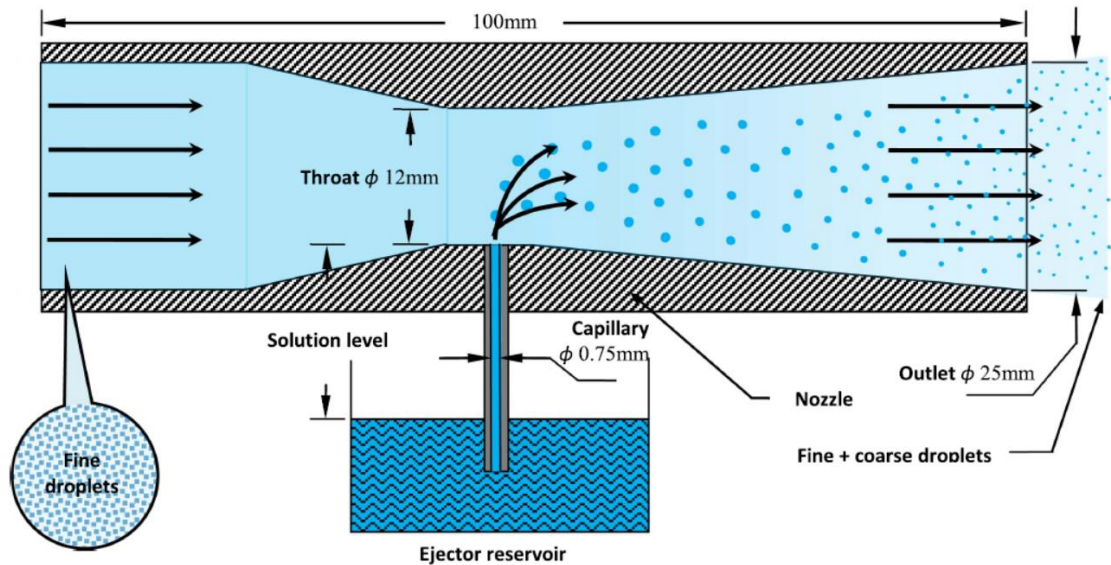


Figura 7. Ejector de la instalación de [17].

El eyector está compuesto por una boquilla que produce el efecto Venturi y un pequeño depósito de líquido, como se puede ver en la Figura 7. La solución de líquido es aspirada desde el depósito por la depresión generada en el estrechamiento del Venturi y, al contacto con el aire que atraviesa esa zona, se rompe en segmentos o gotas.

Dado que el eyector está construido con un material hidrófobo, se minimiza la fijación líquida de la solución aspirada desde el depósito del eyector.

Las condiciones de operación que utiliza son:

- Presión del gas que sale del nebulizador de 10kPa.
- Temperatura de salida del flujo similar a la humana: 37°C.
- Nivel de líquido en el depósito del eyector: 7-10 mm.
- Diámetro de salida del flujo similar a la boca humana: 25 mm.
- Además de las medidas mostradas en la Figura 7 como el diámetro de la garganta de Venturi de 12 mm, o el diámetro del conducto añadido de 0.75 mm.

La frecuencia de la tos y su duración se controla mediante válvulas solenoides programadas. Funciona de tal forma que la duración de la tos es de 1 segundo, y se produce un tosido cada 3 segundos. La repetición periódica de la tos se logra al encender/apagar automáticamente la válvula solenoide. Además, el sistema de control cuenta con un contador eléctrico, un temporizador de ciclo de repetición y un relé de retardo de tiempo.

La boquilla está hecha por una impresora 3D usando ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno). El nebulizador se encuentra contenido dentro de un cilindro hecho de acrílico. La estructura de soporte está hecha de acero.

Para la solución líquida, utilizan la misma mezcla de glicerina, cloruro de sodio y agua mencionados anteriormente.

En la Figura 8 se puede observar el diseño real de la instalación, la cual tiene disposición vertical y unas dimensiones de 800 x 300 x 300 mm.

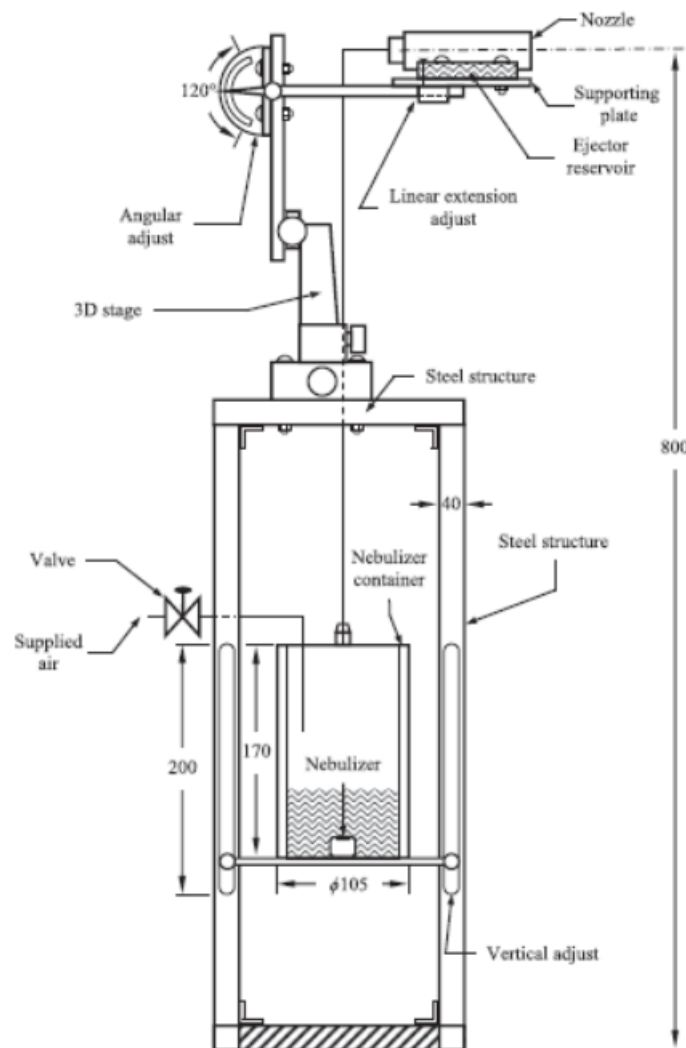


Figura 8. Forma real de la instalación de [17].

1.2.1 Ventajas e inconvenientes de cada una de las instalaciones.

En este apartado se revisan las ventajas e inconvenientes de cada una de las instalaciones descritas anteriormente. Además, en la Tabla 4 se indican resumidos los aspectos más importantes.

I. Instalación de Liu et al.

En la instalación de [15] resulta muy interesante el hecho de que sea una cámara abierta, y el sistema formado por la bomba de vacío y el generador, que proporcionan una cantidad estacionaria de gotas dentro de la cámara y al mismo tiempo evitan que salgan por el tubo de salida, logrando así tener que utilizar menos válvulas para controlar el funcionamiento de la instalación.

Por otro lado, sería más fácil su construcción, y habría menos pérdidas de carga si la cámara central tuviera forma cilíndrica en lugar de cuadrada. Además, se necesitan dos líneas de aire a presión, una para provocar la tos, y otra para atomizar las gotas. Por último, no posee una purga para el vaciar el líquido que se pueda depositar.

II. Instalación de Wan et al.

En la instalación de [11] destaca el uso de la purga, desde la que se podría recoger el líquido atomizado excedente y así reutilizarlo de nuevo, evitando su desperdicio. Además, en este segundo caso se aprovecha el aire a presión suministrado tanto para provocar el flujo como para atomizar la disolución de líquido.

El mayor inconveniente de esta instalación es la falta de control del flujo producido y de la cantidad y distribución de gotas en el mismo, a no ser que se mida la salida, por lo que se tendría que adquirir un sistema de medición y regularse a partir de prueba y error mediante varias válvulas.

III. Instalación de Ren et al.

En la instalación de [16] se observa que se ha sustituido el uso del aire a presión, por un ventilador, evitando así los riesgos que conlleva trabajar con aire comprimido.

Sin embargo, no se pueden obtener más aportaciones de la instalación ya que en ella no se trabaja con partículas líquidas transportadas por el flujo de aire.

IV. Instalación de Zhang et al.

En la instalación de [17] resulta muy interesante cómo han conseguido obtener gotas de diferentes tamaños de una forma muy sencilla gracias al tubo con efecto Venturi del eyector. El cual, además, ha sido fácil de fabricar gracias a la impresión en 3D. También resulta ventajoso que la instalación se encuentre en disposición vertical, ya que se reduce el espacio que ocupa.

Por otro lado, el mayor inconveniente es que no se puede controlar el flujo, y al estar todo conectado en serie, el flujo de salida depende principalmente de los parámetros del nebulizador utilizado, pudiendo ser estos insuficientes para los requisitos deseados.

Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de las instalaciones.

REFERENCIA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Liu et al. [15]	Cámara abierta, volumen estacionario de gotas, menor cantidad de válvulas.	Cámara cuadrada, falta purga, necesarias dos líneas de aire a presión.
Wan et al. [11]	Purga (reutilización de líquido), una única línea de aire a presión.	Falta de control del flujo, necesario equipo de medición para controlar mediante multitud de válvulas.
Ren et al. [16]	Uso del ventilador (menos riesgo que el aire a presión).	No trabaja con líquido en la corriente de aire.
Zhang et al. [17]	Método sencillo para obtener gotas de diferentes tamaños, impresión 3D, verticalidad.	Falta de control del flujo, pueden no cumplirse los requisitos.

Capítulo 2. Diseño de la instalación

Como requisitos de diseño respecto a las características que deberá cumplir el estornudo de la instalación, se considerarán aquellos presentados en la Tabla 3. Además, también se tendrán en cuenta todas las ventajas señaladas de las instalaciones analizadas anteriormente, Tabla 4.

2.1. Idea inicial

La instalación estará en disposición vertical, tal y como se indica en la Figura 9. El cuerpo principal será una cámara de sección circular, donde las partículas de líquido estarán en suspensión. Para ello, a esta cámara estará conectado un generador de gotas en la parte inferior del lateral, y en la parte superior opuesta, un conducto de salida que concluirá en un pequeño ciclón con un ventilador situado en la salida del aire del mismo. El propósito del ciclón es poder recuperar la mayor parte posible del líquido que no se emplee en el estornudo. Con este sistema, se pretende tener un volumen constante de gotas en la cámara, ya que el ventilador del ciclón provocará un vacío que inducirá que las gotas salgan por ahí y no por el conducto de salida de la instalación, ya que mantendrá una ligera depresión dentro de la cámara. Esta será la situación previa al estornudo.

En la base de la cámara, habrá dos pequeñas purgas, cerradas mediante válvulas, para evacuar las gotas de líquido que hayan podido depositarse o descender debido a la gravedad. Además, también en la base de la instalación se colocará la impulsión de un ventilador centrífugo, el cual estará en funcionamiento continuamente, separado de la cámara por una compuerta estanca de mariposa. En el momento en el que se quiera generar el estornudo, se activará un actuador neumático conectado a la compuerta abriéndola, dejando pasar el aire del ventilador, el cual arrastrará las gotas que haya en suspensión en ese momento en la cámara, hacia la parte superior de la instalación. Allí, se produce un estrechamiento del diámetro del conducto de salida. En él, habrá un pequeño conducto por el cual, gracias al efecto Venturi, se aportará un volumen de líquido a mayores desde un depósito añadido, de tal forma que, cuando se produzca el estornudo, el flujo de aire fraccionará este caudal en gotas de mayor tamaño a las producidas por el generador, e incluso pequeños filamentos, y así quedará cubierto el rango expuesto en los requisitos. Por último, en la parte superior del tubo de Venturi habrá dos codos, uno de 90° y uno de 45° a continuación, para así conseguir aproximadamente los ángulos de inclinación que se producen al estornudar.

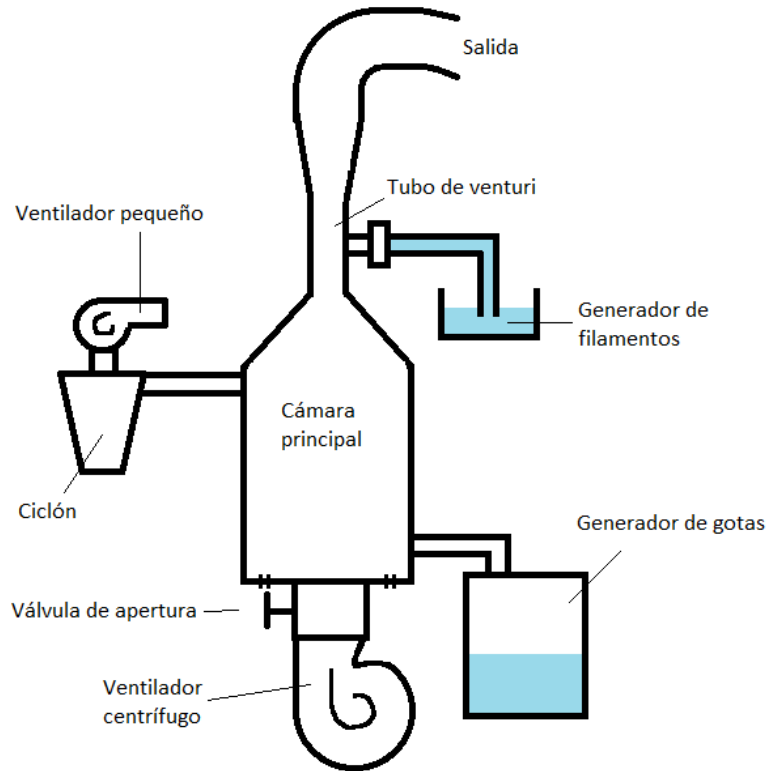


Figura 9. Esquema de la instalación.

2.2. Dimensionamiento de conductos.

Para dimensionar la instalación y calcular la presión necesaria que tiene que aportar cada ventilador, se tomarán como dimensiones de partida las siguientes medidas:

- Diámetro interior de los codos de salida: 24 mm (como una boca humana [3])
- Diámetro del estrechamiento en el Venturi: 12 mm
- Diámetro de la cámara principal: 130 mm
- Radio del eje de curvatura de los codos: 60 mm

Para conocer la longitud de la cámara principal, se calcula previamente el flujo volumétrico que tendremos en cada estornudo. Para ello se aplica la Ecuación 1, tomando la velocidad del conducto salida de 20 m/s, y su diámetro de 24 mm.

$$Q = v \cdot A \quad (1)$$

$$Q = \frac{20m}{s} \cdot \pi \cdot \left(\frac{24 \cdot 10^{-3}m}{2}\right)^2 = 9.05 \cdot 10^{-3} m^3/s$$

Como se dijo anteriormente, la duración de un estornudo es de aproximadamente 0.2 segundos [4], por lo que se obtiene un volumen de flujo en cada estornudo de:

$$V = 9.05 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} \cdot 0.2 s = 0.00181 m^3$$

Y con la fórmula del volumen de un cilindro (Ecuación 2) y sabiendo el diámetro de la cámara, se calcula la longitud necesaria.

$$V_{cilindro} = \pi \cdot r^2 \cdot L \quad (2)$$

$$L_{cámara} = \frac{0.00181 \text{ m}^3}{\pi \cdot \left(\frac{130 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2}\right)^2} = 0.136 \text{ m}$$

A continuación se va a calcular la presión que deberán dar los ventiladores de la instalación. Para ello se utilizará la Ecuación 3 [18], que nos permitirá conocer, a partir de la altura de pérdidas de carga y la presión a la salida, la presión en cada uno de los puntos de la instalación. Esta ecuación proviene de aplicar un balance de energía mecánica a máquinas hidráulicas, y a la hora de utilizarla se realizan las siguientes suposiciones:

- Estado estacionario (el gasto de entrada es igual al de salida).
- La ecuación sólo se aplica a la línea de corriente.
- Fluido incompresible.
- Las fuerzas másicas dependen de un potencial, $\vec{f}_m = -\nabla U = -\vec{g}$.

$$\left(\frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + z\right)_1 - \left(\frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + z\right)_2 = h_p \quad (3)$$

El término h_p hace referencia a las alturas de pérdidas, las cuales pueden ser por fricción (pérdida de presión por el roce con las paredes del conducto) o locales (codos, válvulas, ensanchamientos, estrechamientos, etc.).

2.2.1. Presión del ventilador centrífugo.

Este ventilador es el que va situado en la base de la instalación y produce el estornudo, por lo que para conocer la presión que debe aportar, habrá que calcular las pérdidas de altura que se producen desde la salida de la instalación, hasta él: en los codos de la salida, en el ensanchamiento, en la garganta del tubo de Venturi, en el estrechamiento y en la cámara principal.

En primer lugar se calculan las pérdidas de carga que habrá en la salida del flujo al exterior, al perder este la energía cinética que llevaba. Para ello se aplica la Ecuación 4 [18].

$$h_{p_{salida}} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

En este caso, la K tiene un valor igual a 1 [18]. Por lo tanto, se obtiene un valor de altura de:

$$h_{p_{salida}} = 1 \cdot \frac{20^2}{2 \cdot 9.8} = 20.41 \text{ m}$$

A continuación, se calculan las pérdidas de carga en los codos de la salida de la instalación, debido al rozamiento con las paredes del mismo. Para ello se aplica de nuevo la Ecuación 4, pero en este caso el valor de K será la suma de la constante K_{90} del codo de 90° y la constante K_{45} del codo de 45° .

Para calcular la constante del codo de 90° , gracias a que el radio de curvatura será mayor que el diámetro de la sección, esta será circular, y que son 90° , se puede emplear la Ecuación 5 [18].

$$K_{90} = 0.051 + 0.19 \cdot \frac{D}{Re} \quad (5)$$

Mientras que para la constante del codo de 45° , se emplea la Ecuación 6, donde f_1 vendrá dado por la gráfica de la Figura 10, f_2 vendrá dado por la gráfica de la Figura 11 y f_3 valdrá 1 debido a que la sección es circular [18].

$$K_{45} = 0.73 \cdot f_1 \cdot \frac{Re}{D} \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (6)$$

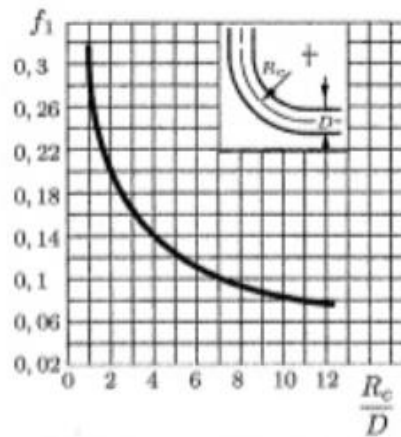


Figura 10. Valor de f_1 en función de la curvatura [18].

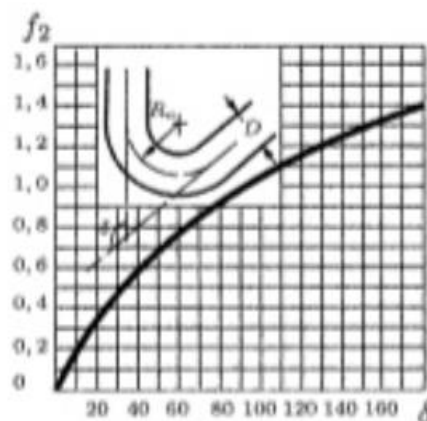


Figura 11. Valor de f_2 en función del ángulo [18].

Obteniendo así unos valores de:

$$K_{90} = 0.051 + 0.19 \cdot \frac{2.4 \cdot 10^{-2}}{60 \cdot 10^{-3}} = 0.127$$

$$K_{45} = 0.73 \cdot 0.18 \cdot \frac{60 \cdot 10^{-3}}{2.4 \cdot 10^{-2}} \cdot 0.65 \cdot 1 = 0.2135$$

Y por tanto, sustituyendo en la Ecuación 4, se obtiene una altura de pérdidas total de:

$$h_{p_{codos}} = (0.127 + 0.2135) \cdot \frac{20^2}{2 \cdot 9.8} = 6.95 \text{ m}$$

A continuación se calculan las pérdidas de carga en el ensanchamiento entre el Venturi y el conducto de salida. Para ello se aplica la Ecuación 7 [18].

$$h_{p_{ensanchamiento}} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\right)^2 \quad (7)$$

Con la Ecuación 1 se calcula la velocidad en la garganta del tubo, ya que el flujo volumétrico de la instalación y el diámetro de esta zona son conocidos.

$$v_g = \frac{9.05 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot \left(\frac{12 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2} = 80 \text{ m/s}$$

Esta es la máxima velocidad que alcanzará el fluido, por lo que se calcula el número de Mach en este punto:

$$Mach = \frac{v}{v_{sonido}} = \frac{80 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} = 0.24$$

Al ser menor que 0.3, el fluido se considera incompresible [18], por lo que queda comprobado que se puede emplear la Ecuación 3 para realizar estos cálculos.

Para el valor de K, se utiliza el gráfico de la Figura 12. El ensanchamiento de la instalación tendrá un ángulo de 12°, por lo que se obtiene un valor de K=0.2.

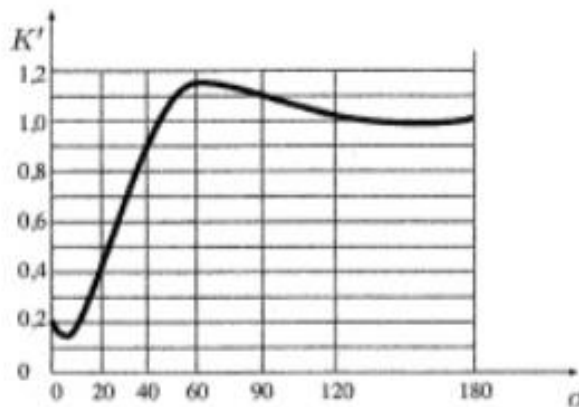


Figura 12. Valores de K en el ensanchamiento en función del ángulo [18].

Por lo tanto, la altura de pérdidas obtenida en el ensanchamiento será:

$$h_{p_{\text{ensanchamiento}}} = 0.2 \cdot \frac{80^2}{2 \cdot 9.8} \cdot \left(1 - \frac{12}{24}\right)^2 = 16.33 \text{ m}$$

A continuación se calculan las pérdidas en la garganta del tubo de Venturi debido a la fricción con las paredes. Para ello se aplica la Ecuación 8:

$$h_p = f \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D} \quad (8)$$

Siendo f el coeficiente de pérdidas por fricción, que se calcula a través del Diagrama de Moody. Para ello es necesario conocer el valor del número de Reynolds (Ecuación 9), y del cociente de la rugosidad del material del conducto dividido entre su diámetro. En esta instalación se utilizará un material plástico, por lo que el valor de la rugosidad es $\varepsilon=0.0015 \text{ mm}$ [18].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (9)$$

Por lo tanto, se entra en el diagrama de Moody con los siguientes valores:

$$Re = \frac{1.2 \cdot 80 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{1.8 \cdot 10^{-5}} = 64000$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0015}{12} = 1.25 \cdot 10^{-4}$$

Y se obtiene un valor de $f=0.021$, con el que, aplicado a la Ecuación 8, se calcula un valor de altura de pérdidas de:

$$h_{p_{\text{Venturi}}} = 0.021 \cdot \frac{80^2}{2 \cdot 9.8} \cdot \frac{0.05}{12 \cdot 10^{-3}} = 28.57 \text{ m}$$

En el estrechamiento previo al Venturi, el rango de valores de K que se obtienen es de $K=0.02 \sim 0.04$ [18], por lo que se consideran pérdidas despreciables.

Por último, se calculan las pérdidas en la cámara principal de la instalación, repitiendo el proceso que para el tubo de Venturi y usando de nuevo las Ecuaciones 8 y 9. Previamente habrá que calcular la velocidad del flujo en esta sección, utilizando la Ecuación 1.

$$v_c = \frac{9.05 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot \left(\frac{130 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2} = 0.682 \text{ m/s}$$

Se entra en el diagrama de Moody con los siguientes valores:

$$Re = \frac{1.2 \cdot 0.682 \cdot 130 \cdot 10^{-3}}{1.8 \cdot 10^{-5}} = 5908$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0015}{130} = 1.15 \cdot 10^{-5}$$

Y se obtiene un valor de $f=0.035$, con el que, aplicado a la Ecuación 8, se calcula un valor de altura de pérdidas de:

$$h_{p_{cámara}} = 0.035 \cdot \frac{0.682^2}{2 \cdot 9.8} \cdot \frac{0.136}{130 \cdot 10^{-3}} = 0.00087 \text{ m}$$

Por lo tanto, ya se puede calcular, mediante la Ecuación 3, la presión necesaria que debe aportar el ventilador de la base durante el estornudo, sumando todas las alturas halladas cuyo resumen se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Alturas de pérdidas para el ventilador centrífugo.

Sección	Altura de pérdidas calculada (m)
Codos	6.95
Conducto de salida	29.33
Ensanchamiento	16.33
Garganta del tubo de Venturi	28.57
Estrechamiento	Despreciable
Cámara principal	0.00087

Obteniendo $h_{p \text{ totales}} = 72.26 \text{ m}$

$$\left(\frac{P}{1.2 \cdot 9.8} + \frac{0.682^2}{2 \cdot 9.8} \right)_{cámara} - \left(0 + \frac{20^2}{2 \cdot 9.8} + 0.4 \right)_{salida} = 72.26 \text{ m}$$

Y se obtiene una presión manométrica de 1094.20 Pascales.

2.2.2. Presión del ventilador del ciclón.

Por último, se calcula la presión que deberá aportar el ventilador que se encuentra situado en el ciclón. Las pérdidas que habrá que calcular son las que van desde la cámara principal, que es donde estarán las gotas, hasta el ventilador del ciclón.

En primer lugar, se calculan las pérdidas de carga del conducto que une la cámara con el ciclón. Este conducto mide 2 centímetros de largo y tiene sección rectangular, por lo que habrá que calcular el diámetro hidráulico equivalente [18], mediante la Ecuación 10.

$$Diámetro_{Hidráulico} = \frac{4 \cdot Área}{Perímetro} \quad (10)$$

El área de la sección del conducto se diseñará de tal forma que sea la misma que la del conducto que une el generador con la cámara. El cálculo de los lados que

conforman el perímetro y el área, se muestra en el apartado “2.4. Dimensionamiento del ciclón”. Por lo tanto, sustituyendo, se obtiene un diámetro hidráulico de:

$$D_H = \frac{4 \cdot 0.0000705}{0.0372} = 7.6 \text{ mm}$$

Por otro lado, el flujo volumétrico que circulará por él será el mismo que el que produce el generador de gotas, que más adelante se verá que son 1.22 L/s debido a la presión de entrada elegida. Por tanto, con la Ecuación 1 se calcula la velocidad del fluido en esa sección:

$$v_{ci} = \frac{1.22 \cdot 10^{-3}}{0.0000705} = 17.3 \text{ m/s}$$

Y ahora con las Ecuaciones 8 y 9, se calculan las pérdidas de carga. Se entra en el diagrama de Moody con los siguientes valores:

$$Re = \frac{1.2 \cdot 17.3 \cdot 7.6 \cdot 10^{-3}}{1.8 \cdot 10^{-5}} = 8765.3.$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0015}{7.6} = 1.97 \cdot 10^{-4}.$$

Y se obtiene un valor de $f=0.031$, con el que, aplicado a la Ecuación 8, se calcula un valor de altura de pérdidas de:

$$h_{p_{conducto}} = 0.031 \cdot \frac{17.3^2}{2 \cdot 9.8} \cdot \frac{0.020}{7.6 \cdot 10^{-3}} = 1.25 \text{ m}$$

A continuación se calculan las pérdidas en el ciclón. Para ello se aplica la Ecuación 4, suponiendo una K total para todo el ciclón igual a 3.

$$h_{p_{ciclón}} = 3 \cdot \frac{17.3^2}{2 \cdot 9.8} = 45.81 \text{ m}$$

En la Tabla 6 se presentan las alturas de pérdidas obtenidas para el cálculo de la presión que debe aportar este ventilador. Realizando la suma y aplicando la Ecuación 3, se obtiene la presión buscada.

Tabla 6. Alturas de pérdidas para el ventilador del ciclón.

Sección	Altura de pérdidas calculada (m)
Conducto unión cámara - ciclón	1.25
Ciclón	45.81

Obteniendo $h_{p \text{ totales}} = 47.06 \text{ m}$

En el interior del ciclón habrá una depresión, originada gracias al ventilador, para así conseguir que el flujo salga por él y no por la salida cuando no se esté produciendo el estornudo. Es por ello que en este caso, la altura de pérdidas tendrá signo negativo al sustituirla en la ecuación:

$$\left(\frac{P}{1.2 \cdot 9.8}\right)_{caja} - (0)_{ciclón} = -47.06 \text{ m}$$

Y se obtiene una presión manométrica dentro del ciclón de - 553.43 Pascales.

2.3. Generador de gotas

Para esta instalación se utilizará un generador de gotas TSI modelo 9307, cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo 1.

Para determinar el número de gotas que se produce en este aerosol, y la concentración de las mismas que tendremos en la cámara, se realizará un ensayo de caracterización.

2.3.1. Funcionamiento del generador

El generador de gotas consiste en un recipiente cerrado herméticamente, el cual contiene un líquido, que es atomizado mediante la entrada de aire a presión. Este aire desciende a través un conducto y sale del mismo a través de 8 toberas, como se ve en la Figura 13. Además, el recipiente también posee una placa circular horizontal en su interior, con la finalidad de que en ella impacten las gotas más grandes y evitar así que lleguen al flujo de salida, Figura 14.

El generador cuenta con válvula y manómetro para controlar la presión del aire de entrada, y un nivel del líquido de dentro del depósito.

En esta caracterización, el líquido utilizado será agua, ya que además de tener una densidad similar, como se procederá a realizar varios ensayos y por tanto, se producirá mucho gasto, esta es más fácil de conseguir, es inocua y no genera residuos.

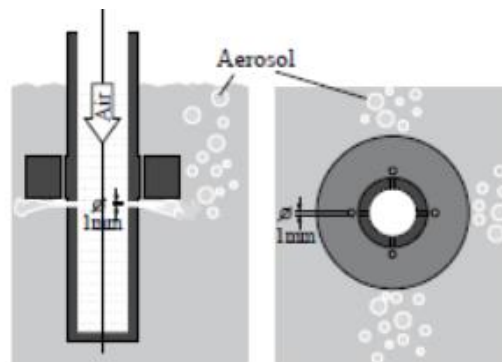


Figura 13. Tobera del generador.

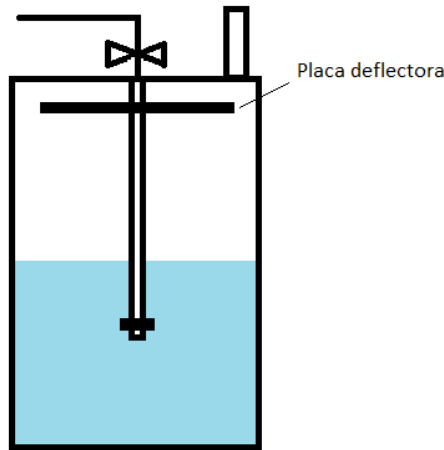


Figura 14. Esquema del generador de gotas.

2.3.2. Ensayo para determinar la concentración

La finalidad del ensayo desarrollado a continuación, será conocer el flujo de gotas que produce el generador, así como su variación en función de la presión de entrada y la temperatura, para obtener qué condiciones de funcionamiento serán las óptimas para lograr los requisitos mencionados anteriormente para el simulador de estornudos.

El material empleado en este ensayo será: el generador de gotas TSI modelo 9307, un sistema de medición KIMO (hilo caliente y hélice), agua, un recipiente tipo probeta, cronómetro y balanza de precisión.

1. En primer lugar se pretende caracterizar el gasto de aire, sin líquido, que produce el generador en función de la presión del aire de entrada.

El primer paso será vaciar y limpiar el generador. Se mide la velocidad de salida del aire (sin líquido) con el sistema de medida KIMO del hilo caliente, en función de la presión de entrada. Al multiplicar la velocidad por el área de salida, se obtendrá el caudal de salida (Ecuación 1) también en función de la presión de entrada, todo ello representado en la Tabla 7.

Tabla 7. Ensayo sólo con aire.

PRESIONES DE ENTRADA (kPa)	VELOCIDAD DE SALIDA (m/s)	CAUDAL SALIDA (m ³ /s)
170	17.2	$1.22 \cdot 10^{-3}$
240	22.5	$1.59 \cdot 10^{-3}$
300	25.4	$1.80 \cdot 10^{-3}$
380	29.0	$2.06 \cdot 10^{-3}$

Se observa que la velocidad a 170 kPa, es mucho mayor que la que se obtiene si se calcula a partir de las especificaciones de funcionamiento de la máquina, Anexo 1. Por lo que para comprobar si este aumento de la velocidad es debido a la ausencia de líquido, se realiza otra medición a las mismas presiones pero con una hélice. La ventaja de este sistema es que como la hélice sí se puede mojar, se podrá ver si existe variación de velocidad una vez introducido el líquido. La principal desventaja es que dependiendo de la posición de la hélice, se obtienen valores diferentes de velocidad; que a su vez es menor que la medida anteriormente, debido a la diferencia de tamaños de la hélice con el conducto de salida.

Tabla 8. Comparativa de velocidades.

PRESIONES DE ENTRADA (kPa)	VELOCIDAD HÉLICE SIN LÍQUIDO (m/s)	VELOCIDAD HÉLICE CON LÍQUIDO (m/s)
170	1.8 – 3.1	2.2 – 3.4
240	2.5 – 4.3	2.7 – 4.3
300	3.3 – 4.8	3.1 – 5.1
380	3.7 – 5.9	3.8 – 6.1

En la Tabla 8 se presentan los rangos de velocidad medidos con la hélice en ausencia de líquido, y con líquido. Se observa que se obtienen unos valores muy similares, por lo que se asume que el hecho de tener o no líquido no es influyente, y que la causa de que la velocidad en el ensayo sea mayor a la de las especificaciones es que el líquido que empleó el fabricante en sus ensayos era más viscoso.

Por último, se compara el gasto de aire teórico con el obtenido experimentalmente. Como se busca una ecuación que nos proporcione el gasto a partir de la presión de entrada y de la temperatura, se comienza analizando estas variables en las Ecuaciones 11 y 12 [18] ya que las toberas están bloqueadas, ($P/P_0 \leq 0.5283$ cuando $M=1$).

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (11)$$

$$\frac{T_0}{T} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M^2\right) \quad (12)$$

$$G = 0.579 \cdot \rho_0 \cdot a_0 \cdot A_s \quad (13)$$

Se observa que tanto P_0 como T_0 son función de M^2 , el cual es desconocido ya que no se puede saber la velocidad del aire dentro del generador. Sin embargo, partiendo de la ecuación del gasto para tobera bloqueada (Ecuación 13), se puede llegar a la conclusión de que el gasto será

directamente proporcional a la presión de entrada elevada a un coeficiente, dividida por la raíz cuadrada de la temperatura inicial:

$$G = cte \cdot \rho_0 \cdot a_0 \cdot A_s = cte \cdot \frac{P_0}{R \cdot T_0} \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_0} = cte \cdot \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} = \frac{P_0^\alpha}{\sqrt{T_0}}$$

Por lo tanto, aplicando la Ecuación 13 junto con la deducción anterior, se obtiene la siguiente expresión:

$$G = 0.579 \cdot \frac{P_0^\alpha}{R \cdot T_0} \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_0} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 - cte$$

Siendo:

- Temperatura ambiente, $T_0 = 296 \text{ K}$
- Constante universal de los gases ideales, $R = 287 \text{ (Pa}\cdot\text{m}^3/\text{Kg}\cdot\text{K)}$ ó $287 \text{ (m}^2/\text{s}^2\cdot\text{K)}$
- Relación de calores específicos, $\gamma = 1.4$
- Presión de entrada, P_0
- Área de salida: 8 agujeros de 1 milímetro de diámetro cada uno.
- Coeficiente alpha obtenido, $\alpha = 1.06$

Además, para un mejor ajuste de la ordenada en el origen, se restará al total de la ecuación una constante igual a 0.00273.

Así, se obtiene para cada uno de los valores de presión de entrada, la gráfica de la Figura 15, comparándolos con los experimentales pasados a las mismas unidades.

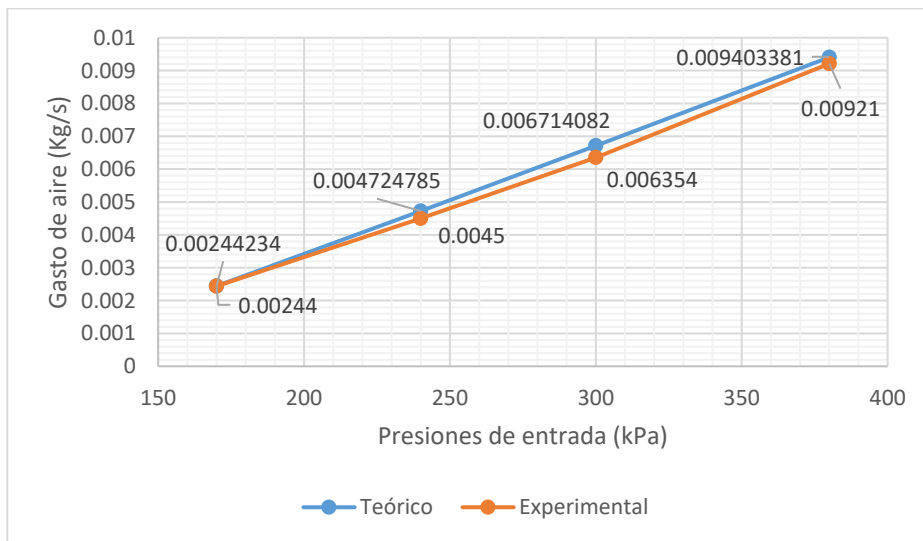


Figura 15. Gráfica comparativa de gasto de aire.

Se observa que ambas rectas se encuentran muy próximas, por lo que queda caracterizado el gasto de aire correspondiente a cada una de las diferentes presiones de entrada posibles dentro de las especificaciones del generador, según la siguiente expresión:

$$G_{aire} = 1.477 \cdot 10^{-8} \cdot P_0^{1.06} - 0.00273$$

2. Una vez caracterizado el gasto de aire que se genera, se procede a calcular el gasto de agua.

Tras haber introducido un volumen determinado de agua, a cada una de las presiones anteriores se recogen las gotas que genera la máquina en 10 minutos y se pesan. Se realizan varias medidas para obtener una media, todo esto representado en la Tabla 9. Se ha considerado despreciable la variación del nivel de líquido dentro del generador durante el tiempo empleado en las mediciones.

Tabla 9. Gasto de agua.

PRESIONES DE ENTRADA (kPa)	AGUA OBTENIDA en 10 min. (g)	MEDIA (g)	GASTO DE AGUA (g/s)
170	0.096/0.11	0.103	0.000172
240	0.501/0.397/0.312	0.4059	0.0006765
300	0.816/0.744/0.621	0.7271	0.0012118
380	1.023/0.963/0.902	0.9635	0.0016058

Al igual que con el gasto de aire, a continuación se busca la expresión que relaciona teóricamente, el gasto de agua obtenido con la presión de entrada. Para ello se emplea una ecuación de la misma forma que en el caso anterior, ya que el gasto de agua depende directamente del gasto de aire, puesto que son las burbujas de aire generadas las que al llegar a la superficie libre estallan y generan las gotas en suspensión del líquido:

$$G = K_1 \cdot P_0^\alpha - K_2$$

En esta ocasión, el valor de la constante alpha obtenido, α , es de 0.4, y los valores de las constantes, $K_1 = 5 \cdot 10^{-7}$ y $K_2 = 3.72 \cdot 10^{-6}$, obteniendo la gráfica de la Figura 16 al representar tanto esta ecuación teórica, como los valores experimentales obtenidos.

Se observa en la Figura 16 que ambas rectas se encuentran muy próximas, por lo que queda caracterizado el gasto de agua correspondiente a cada una

de las diferentes presiones de entrada del generador, según la siguiente expresión:

$$G_{agua} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot P_0^{0.4} - 3.72 \cdot 10^{-6}$$

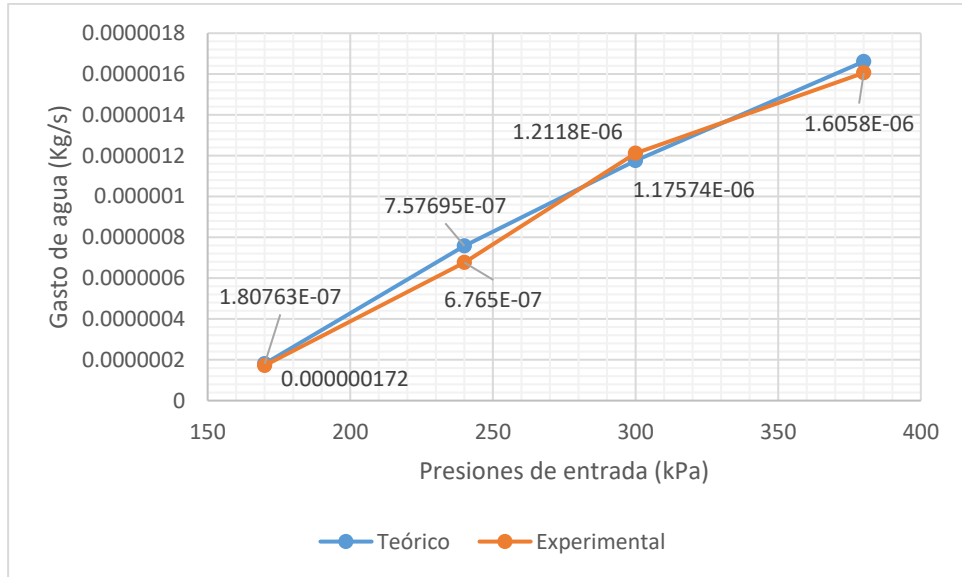


Figura 16. Gasto de agua en función de la presión de entrada.

A continuación, se calcula la concentración de líquido que habrá en la cámara principal de la instalación. Combinando los dos ensayos anteriores, se puede conocer la cantidad de agua que tiene el aire a la salida del generador. Por tanto, aplicando una regla de tres con el volumen de la cámara principal, calculado previamente en el apartado 2.2, se obtiene la cantidad de agua en la cámara, presentado en la Tabla 10. Además, este volumen de agua en la cámara será estacionario, debido al efecto del ventilador del ciclón.

Tabla 10. Concentraciones de líquido.

PRESIONES DE ENTRADA (kPa)	AGUA EN LA CÁMARA PRINCIPAL (m³)
170	$2.59 \cdot 10^{-10}$
240	$7.701 \cdot 10^{-10}$
300	$1.21 \cdot 10^{-9}$
380	$1.4 \cdot 10^{-9}$

Por otro lado, el tamaño de las gotas que se producen en el generador es de 1 μm (Anexo 1), por lo que sabiendo el volumen de líquido que consume un estornudo (agua en la cámara principal), se puede aproximar el número de gotas que

transportará, dividiendo este volumen total entre el volumen de una gota, calculado mediante la Ecuación 14.

$$V_{gota} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (14)$$

Se obtiene un volumen de $5.236 \cdot 10^{-19} \text{ m}^3$. Por lo tanto, al realizar la división del volumen de agua en la cámara entre este valor, se obtiene el número equivalente de gotas por estornudo, Tabla 11.

Tabla 11. Número de gotas en función de la presión de entrada.

PRESIONES DE ENTRADA (kPa)	NÚMERO EQUIVALENTE DE GOTAS POR ESTORNUDO
170	$4.95 \cdot 10^8$
240	$1.74 \cdot 10^9$
300	$2.31 \cdot 10^9$
380	$2.67 \cdot 10^9$

Se toma el valor más pequeño para calcular la concentración de gotas por unidad de volumen, obteniendo:

$$\frac{4.95 \cdot 10^8 \text{ gotas}}{0.00181 \text{ m}^3 \text{ cámara}} = 2.73 \cdot 10^{11} \text{ gotas/m}^3 = 2.73 \cdot 10^5 \text{ gotas/cc}$$

Se observa que el orden de magnitud del número de gotas es mayor que el que en un principio se requería. Sin embargo, está dentro del rango descrito en el primer capítulo, y ya que una parte de las gotas se perderán por efecto de la gravedad o por la fricción con las paredes de los conductos y codos, se toman estos valores como válidos. Por lo tanto, se utilizará como valor de la presión de entrada 170 kPa, ya que es el que menos gotas genera.

El valor del número de Reynolds del aire a la salida del generador, calculado con la Ecuación 9, será:

$$Re_s = \frac{1.2 \cdot 17.2 \cdot 0.0095}{10^{-5}} = 19608$$

Lo que nos deja un flujo turbulento a la salida del conducto, con la velocidad máxima en la zona central del mismo.

2.4. Dimensionamiento del ciclón

Para dimensionar un ciclón, hay que calcular las medidas señaladas en la Figura 17 [19].

Debido a que en esta instalación el tamaño de las partículas que se generan es muy pequeño (de $1 \mu\text{m}$), será muy difícil conseguir una eficiencia alta. Para intentar optimizarla, se diseñará un ciclón de alta eficiencia, siguiendo las relaciones entre las características del ciclón expuestas en la Figura 18 [19]. El tipo de ciclón elegido es el Stairmand

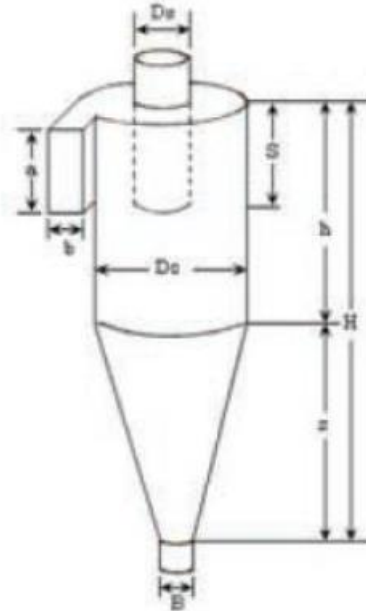


Figura 17. Dimensiones de un ciclón.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/D_c	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/D_c	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/D_c	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/D_c	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/D_c	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	B/D_c	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	608.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

Figura 18. Características de los ciclones de alta eficiencia [19].

El primer dato que se necesita conocer es el diámetro del ciclón, D_c . Se calcula a partir del conducto de entrada al ciclón, que como se había expuesto anteriormente, tendrá la misma sección que el conducto de salida del generador de gotas, un diámetro interior de 9.5 mm (Anexo 1). El área de este conducto tiene que ser igual al área de entrada del ciclón, por lo que se puede afirmar esta igualdad:

$$A = \pi \cdot \frac{0.0095^2}{4} = 7.088 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = a \cdot b$$

Y al conocer las relaciones de la altura y anchura de la entrada del ciclón con el diámetro del mismo, se obtiene directamente D_c :

$$7.088 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = a \cdot b = 0.5 \cdot D_c \cdot 0.2 \cdot D_c = 0.1 \cdot D_c^2$$

$$D_c = 2.66 \text{ cm}$$

Y a partir de este valor, se hallan el resto de cotas del ciclón con las relaciones de la Figura 18:

Altura de entrada:	$a = 0.5 \cdot D_c = 1.33 \text{ cm}$
Ancho de entrada:	$b = 0.2 \cdot D_c = 0.53 \text{ cm}$
Altura de salida:	$S = 0.5 \cdot D_c = 1.33 \text{ cm}$
Diámetro de salida:	$D_s = 0.5 \cdot D_c = 1.33 \text{ cm}$
Altura parte cilíndrica:	$h = 1.5 \cdot D_c = 3.99 \text{ cm}$
Altura parte cónica:	$z = 2.5 \cdot D_c = 6.66 \text{ cm}$
Altura total del ciclón:	$H = 4 \cdot D_c = 10.65 \text{ cm}$
Diámetro salida de partículas:	$B = 0.375 \cdot D_c = 1 \text{ cm}$

Una vez dimensionado el ciclón, se calcula el número de giros N que presenta la corriente en su interior, para así calcular su eficiencia. Para el número de giros, se emplea la Ecuación 15.

$$N = \frac{1}{a} \cdot \left(h + \frac{z}{2} \right) \quad (15)$$

Obteniendo una N :

$$N = \frac{1}{0.0133} \cdot \left(0.04 + \frac{0.0666}{2} \right) = 5.5 \text{ vueltas}$$

Y para calcular la eficiencia, se tiene la Ecuación 16.

$$ni = 1 - e^{\left[\frac{-\pi \cdot N \cdot \rho_p \cdot D_p^2 \cdot V_i}{9 \cdot \mu \cdot b} \right]} \quad (16)$$

$$ni = 1 - e^{\left[\frac{-\pi \cdot 5.5 \cdot 1000 \cdot (10^{-6})^2 \cdot 17.2}{9 \cdot 1.8 \cdot 10^{-5} \cdot 0.0053} \right]}$$

Obteniendo un rendimiento del 29.26%. Es así de bajo debido a que el tamaño de las partículas es demasiado pequeño, como se dijo anteriormente.

2.5. Válvula de apertura

Para su elección, se han valorado diferentes opciones como colocar una electroválvula o válvula de mariposa, pero finalmente, debido al alto caudal de aire y para asegurar la estanqueidad, se ha optado por la compuerta estanca de la Figura 19. Esta válvula de mariposa será la que permita el paso del flujo de aire que proporciona el ventilador hacia el resto de la instalación, produciendo el estornudo.



Figura 19. Compuerta estanca [Catálogo TROX, serie AK].

Esta compuerta pertenece a la serie AK de la marca TROX, es de acero inoxidable y de 100 mm de diámetro.

Para su accionamiento, se barajaron las opciones de colocar un motor, o un sistema de pistón y correa, pero debido a que el tiempo de respuesta que se requiere es muy pequeño, debido a la corta duración del estornudo (0.2 segundos), se priorizó la rapidez del sistema, optando finalmente por un actuador neumático de giro.

El actuador elegido, Figura 20, es de la marca SMC, modelo básico con eje simple redondo, con ángulo de giro de 90°.



Figura 20. Actuador de giro [Catálogo SMC, serie CRB 2].

Este actuador tiene un rango de ajuste de la duración del giro (90°) de 0.03 a 0.3 segundos, por lo que resulta válido para los requisitos expuestos.

2.6. Ventilador centrífugo

El ventilador elegido para producir el estornudo, que será la base de la instalación, es un ventilador centrífugo de simple aspiración de la marca S&P, modelo CMT/2-200/60-0.37 kW (Figura 21). Este ventilador contará con un motor trifásico de 2 polos, y además, dispondrá de un regulador de velocidad electrónico para así poder configurar la presión deseada.



Figura 21. Ventilador centrífugo [S&P].

La curva característica del ventilador dada por el fabricante viene representada en la Figura 22. Como se calculó previamente, el ventilador deberá proporcionar a la instalación una presión en torno a 1100 Pa. Para un caudal igual a cero, el motor estará trabajando en la zona de funcionamiento inestable, por lo que posiblemente se tendrá que buscar el punto de funcionamiento en el que la presión proporcionada sea máxima, y el caudal mínimo.

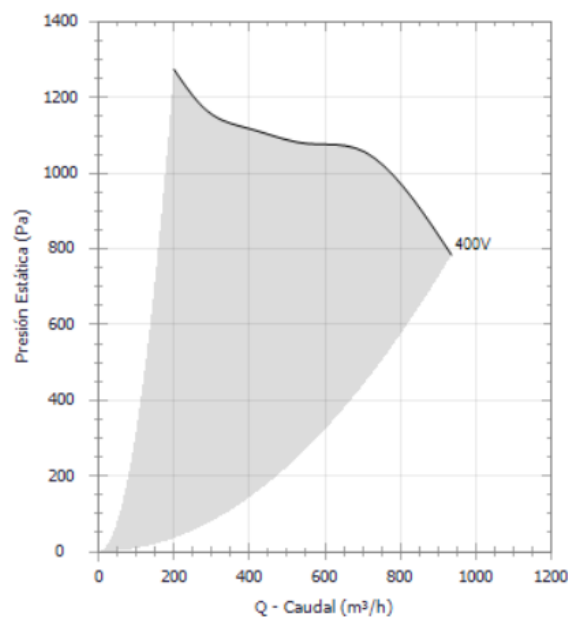


Figura 22. Curva característica del ventilador. [Catálogo S&P]

2.7. Generador de filamentos

En este apartado se procederá a caracterizar el caudal que aportará el generador de filamentos, según a qué altura esté situada la superficie libre en el mismo respecto del punto de inyección en el estrechamiento de la cámara.

Para calcular la altura a la que deberá estar situado la superficie del depósito de líquido añadido (Figura 23), hay que conocer previamente la presión que habrá en el estrechamiento de la instalación. Para ello, se aplica la Ecuación 3, sabiendo que la altura de pérdidas hasta ese punto es prácticamente la misma que se calculó anteriormente para la cámara principal.

$$\left(\frac{P}{1.2 \cdot 9.8} + \frac{80^2}{2 \cdot 9.8} \right)_{\text{estrechamiento}} - \left(0 + \frac{20^2}{2 \cdot 9.8} + 0.1 \right)_{\text{salida}} = 72.26 \text{ m}$$

Obteniendo en el estrechamiento una presión manométrica de -2749.05 Pa.

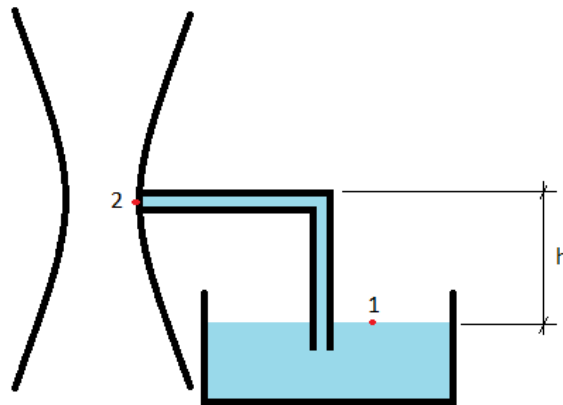


Figura 23. Generador de filamentos.

A continuación, se aplica la Ecuación de Bernoulli [18] (Ecuación 17) en los puntos 1 y 2 de la Figura 23.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z = cte \quad (17)$$

Ya que en el depósito (punto 1) se tendrá presión ambiental y la velocidad del fluido en la superficie del mismo será nula, aplicando la Ecuación 17 se obtiene la siguiente relación entre la altura del nivel del depósito y la velocidad del líquido en el conducto que lo une con la cámara principal (punto 2):

$$\left(\frac{-2749.05}{1000} + \frac{v^2}{2} + 9.8 \cdot h \right)_2 = \left(\frac{0}{1000} + 0 + g \cdot 0 \right)_1$$

El área de la sección del conducto será de 0.75 mm, por lo que, mediante la Ecuación 1, se relaciona la velocidad del líquido en el conducto con el caudal que aportará el generador de filamentos. Así, se obtiene la Figura 24, donde queda caracterizada la altura del nivel del depósito en función del caudal que aportaría este generador.

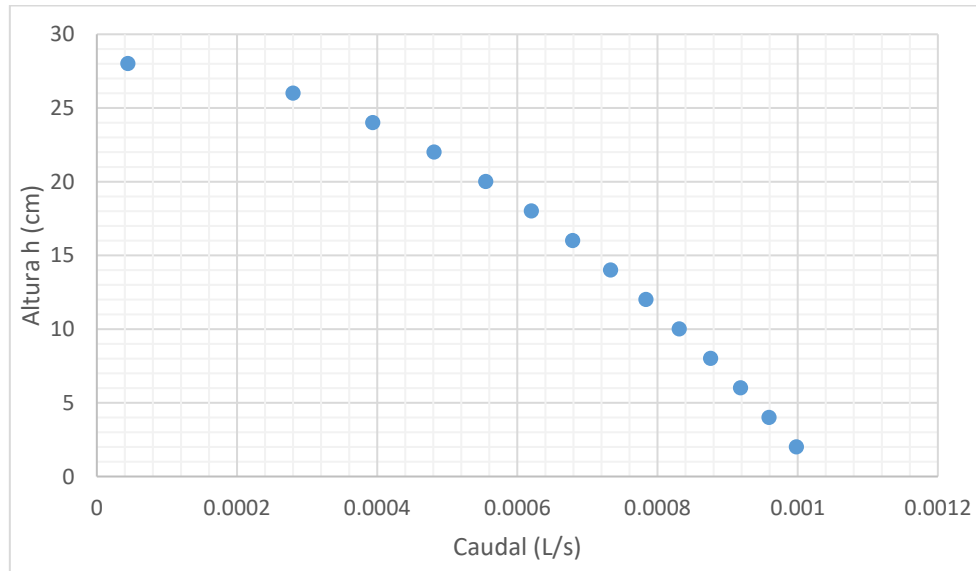


Figura 24. Altura del depósito en función del caudal

Aplicando la ecuación del volumen de una esfera (Ecuación 14), suponiendo que el conducto del generador de filamentos tiene un diámetro de 0.75 mm y por tanto, las gotas tendrán también este diámetro, se obtiene el volumen equivalente de líquido que contendrá una gota/filamento.

Por tanto, dividiendo el caudal aportado por el generador en el intervalo de tiempo que dura el estornudo (0.2 segundos) entre el volumen equivalente de líquido que contiene una gota, se obtiene una aproximación del número de gotas/filamentos que se generarían, a mayores de los que ya se producían en el generador de gotas, representados en la Tabla 12.

Tabla 12. Número de gotas en función de la altura.

Altura (cm)	Núm. equivalente de gotas/estornudo
2	903
4	868
6	831
8	793
10	752
12	709

14	663
16	614
18	561
20	502
22	435
24	356
26	254
28	40

Simplemente al comparar los órdenes de magnitud del número de gotas obtenido en el generador de gotas (de 10^8), y en el de filamentos, se observa que este último es mucho menor. Por lo tanto, se obtendrá una mayoría de gotas de tamaño próximo a $1\ \mu\text{m}$, y una minoría de un tamaño próximo a $750\ \mu\text{m}$ (de las cuales muchas se fragmentarán en otras más pequeñas), cumpliendo así tanto el rango de tamaños de gotas requerido, como que la mayor parte de estas gotas tengan un tamaño próximo a $1\ \mu\text{m}$.

Finalmente, se colocará el nivel del depósito a una altura de entre 10 y 15 cm. Además, este depósito contará en su base con una zona de descarga para poder vaciarlo sin tener que darlo la vuelta.

Capítulo 3. Desarrollo de los elementos de la instalación.

A continuación se mostrarán las distintas piezas que se han modelado en el programa Catia v5, con una breve descripción de las mismas acompañada de una imagen en 3D. Los planos completos de estas piezas se encuentran en el Anexo II. Al final, se presenta también una imagen de cómo sería la instalación completa.

3.1. Diseño del acoplamiento ventilador – válvula

En primer lugar se muestra en la Figura 25 la pieza que servirá de acoplamiento entre el ventilador y la compuerta estanca. Esta pieza es necesaria debido a que la salida del ventilador tiene sección rectangular, y la compuerta es circular, por lo que se ha creado una multisección para solventarlo.

Además de esta multisección, en la parte inferior tiene una brida para facilitar la unión con el ventilador, y en la parte superior una zona cilíndrica, que servirá para alojar a la compuerta estanca, y que esta quede perfectamente sujeta.

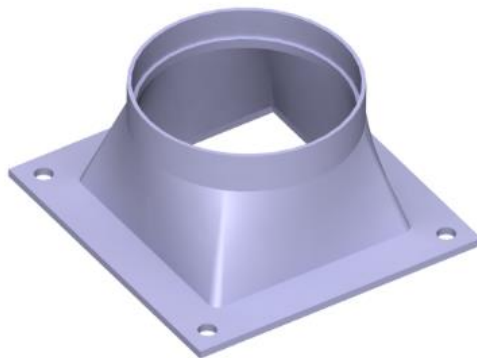


Figura 25. Acoplamiento entre ventilador y compuerta.

3.2. Diseño de la cámara principal

Se ha modelado en una misma pieza la cámara principal de la instalación, junto al estrechamiento y el depósito añadido que servirán para generar las gotas o filamentos de mayor tamaño.

En la Figura 26 se puede observar la parte inferior de esta pieza, en la que se sitúa la misma zona cilíndrica que en el componente anterior, que servirá como sujeción de la compuerta estanca. Así mismo, en el lateral mostrado, puede observarse en la parte inferior una de las dos pequeñas purgas que tendrá la cámara, y en la parte superior, el hueco rectangular en el que se dispondrá el conducto que llegará hasta el ciclón con un pequeño saliente para mejorar su sujeción.

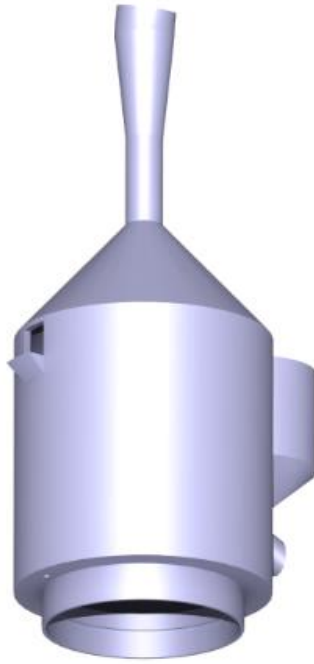


Figura 26. Cámara principal de la instalación.

Por otro lado, en la Figura 27 se puede observar con más claridad el lateral opuesto, en cuya parte inferior se encuentra el hueco en el que encajará el conducto por el que llegarán las gotas desde el generador. Este hueco tendrá una ligera inclinación para facilitar que la corriente generada vaya en dirección ascendente. Justo encima, se encuentra el depósito de líquido añadido. En la zona de la garganta del Venturi se puede ver el taladro al que llegará el conducto desde el depósito. Además, en la salida superior tiene una ligera curvatura para enlazar con el primero de los codos.



Figura 27. Cámara principal de la instalación.

Por último, en la Figura 28 se presenta la cámara principal con un corte total para una mejor apreciación de espesores y taladros.

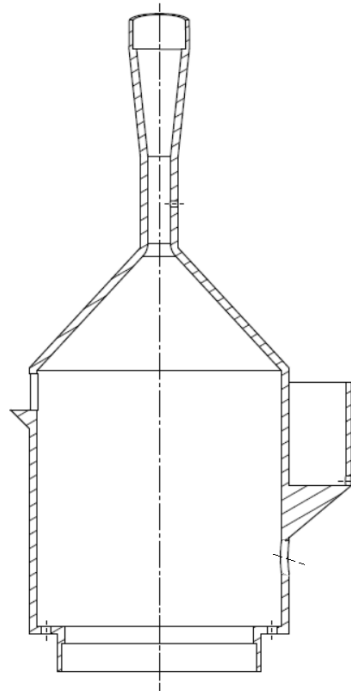


Figura 28. Sección de la cámara principal.

3.3. Diseño del ciclón

En la Figura 29 se presenta el ciclón modelado a partir de las dimensiones obtenidas en el apartado 2.4. Además, la sección de la zona de entrada al ciclón se ha aprovechado para modelar también el pequeño conducto entre la cámara principal y el ciclón, simplificando así el diseño global. Al final de este conducto se produce un aumento de la sección para mejorar el acoplamiento con la cámara.

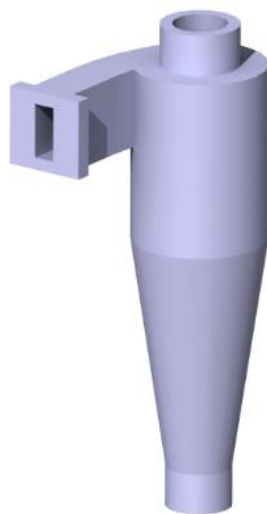


Figura 29. Ciclón y conducto de unión.

3.4. Diseño de la estructura soporte

El perfil utilizado para la estructura de soporte será un perfil cuadrado de aluminio ranurado, el cual puede observarse en la Figura 30.



Figura 30. Perfil utilizado en la estructura.

Debido al pequeño tamaño de la instalación y que estará fabricada en un material plástico, el peso de la misma será ligero, sumado a esto la verticalidad de la misma, la estructura de soporte solo tendrá un propósito: sostener el ventilador centrífugo, que a su vez será la base de toda la instalación. Así, se ha diseñado la estructura de la Figura 31.

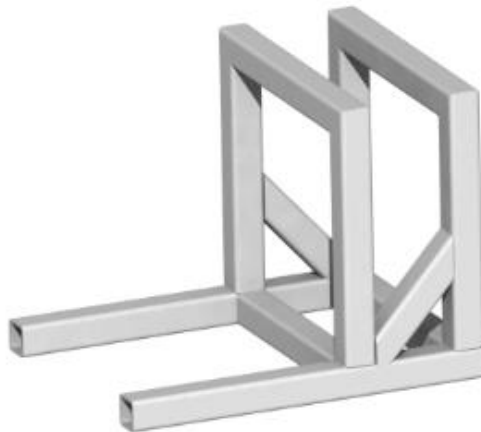


Figura 31. Estructura de soporte

El ventilador irá situado entre las dos estructuras verticales, apoyado en la parte superior de las mismas. La base tiene más superficie de apoyo en uno de los laterales ya que en ese lado se situará el motor y así se contrarresta el peso, aportando mayor estabilidad.

El perfil de las barras mostrado en la Figura 31 no corresponde al real (Figura 30) debido a problemas con la versión del programa de modelado.

3.5. Diseño de los codos

Como se explicó anteriormente, la inclinación de la salida de la instalación se consigue mediante el uso de dos codos consecutivos, uno de 90° y otro de 45° a continuación, visibles en las Figuras 32 y 33.



Figura 32. Codo de 90°.



Figura 33. Codo de 45°.

El codo de 90° mantendrá el espesor a lo largo del mismo, mientras que en el de 45°, como se observa en la Figura 33, posee una zona para proporcionar su acoplamiento.

3.6. Conductos.

La instalación cuenta con dos conductos: el que une el generador con la cámara principal, y el que proporciona los filamentos de líquido desde el depósito añadido mediante el efecto Venturi. El primero, será un tubo de silicona con un diámetro interior de 0.95 cm. Sin embargo, del segundo conducto se ha realizado un modelado (Figura 34) para ajustar mejor sus medidas en función de los cálculos anteriormente

realizados en el generador de filamentos, y para procurar que la parte vertical del conducto quede pegado a la superficie de la cámara, mejorando así su estabilidad dentro del diseño.



Figura 34. Conducto del generador de filamentos.

3.7. Imagen de la instalación completa

Una vez diseñadas las piezas anteriores, se modela una simplificación del generador de gotas, del ventilador y de la compuerta estanca con el actuador, para así poder recrear la instalación completa y comprobar posibles errores en medidas o distribución. En las Figuras 35 y 36 se pueden observar diferentes aspectos del dispositivo completo.

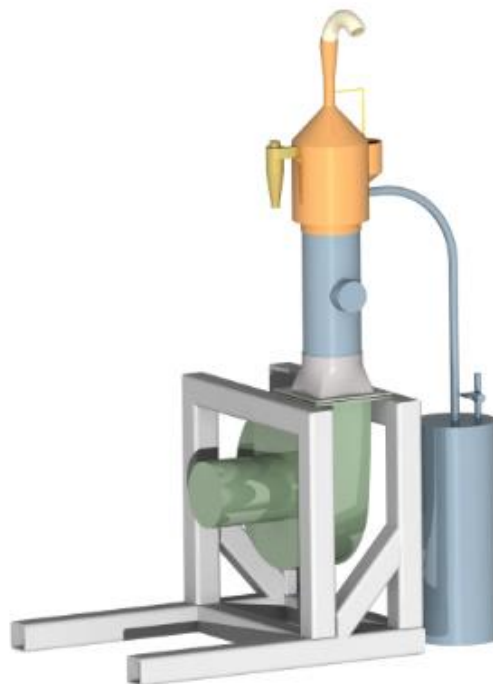


Figura 35. Simulación de la instalación completa.

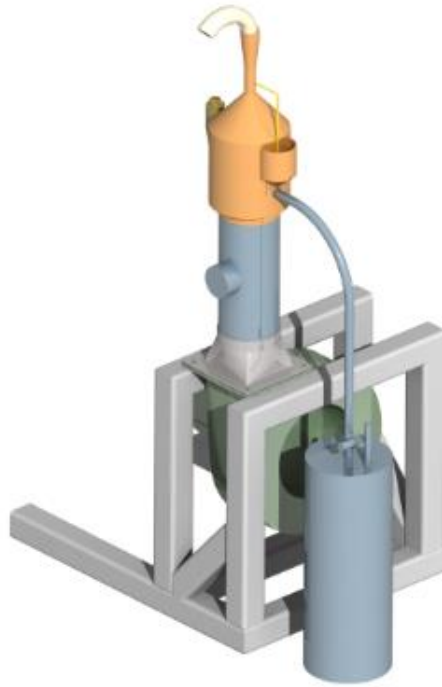


Figura 36. Simulación de la instalación completa.

Capítulo 4. Plan de construcción de la instalación.

En este capítulo se aborda la futura construcción de la instalación. En primer lugar se describirá el modo de fabricación y material utilizado para los elementos de la instalación, y a continuación, se planteará la forma más adecuada de imprimir algunas de las piezas, junto a su montaje posterior.

4.1. Material y método

Los ventiladores y el generador de gotas, así como la compuerta estanca y el actuador, serán adquiridos mediante compra. La estructura de soporte se construirá a partir de la compra de barras de aluminio ranurado de 40 x 40 mm. Para el resto de piezas de la instalación se empleará una impresora 3D tipo Prusa.

El material empleado para imprimir todas estas piezas será el PLA (ácido poliláctico), debido a sus excelentes propiedades físicas y mecánicas.

El PLA se genera por polimerización del ácido láctico procedente de la fermentación de azúcares derivados de vegetales, y por tanto es biodegradable, fomentando así la sostenibilidad del medio ambiente.

Para este proyecto se ha elegido la bobina de PLA de la marca bq.

4.2. Proceso para la fabricación

A la hora de imprimir las piezas, hay que tener especial cuidado en las partes que van en voladizo, ya que de querer imprimir toda la pieza de una vez, habría que diseñar soportes adecuados para sostener el material que deposita la impresora.

De las piezas descritas anteriormente, el acoplamiento entre el ventilador y la válvula no presenta ningún problema a la hora de ser impreso, sin embargo la cámara y el ciclón sí presentan voladizos, cuyas soluciones se plantean a continuación.

4.2.1. Cámara principal

Los voladizos generados por el depósito de líquido añadido y la sujeción extra del ciclón, se han solucionado colocando chaflanes en su parte inferior. Sin embargo, en el voladizo generado en la parte de la cámara donde se encajará la compuerta es imposible colocar un chaflán ya que perdería su función, por lo que hay que dividir la impresión de la cámara en dos piezas diferentes, mostradas en la Figura 37.

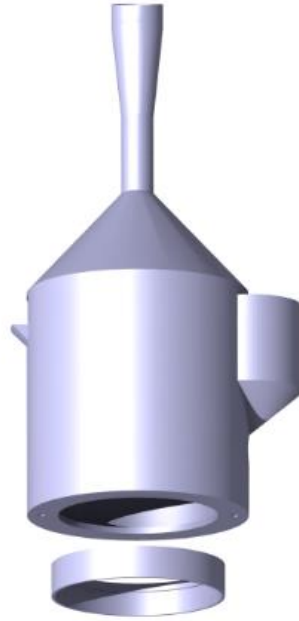


Figura 37. Despiece de la cámara principal.

De esta forma, e imprimiendo una de las piezas girada 180° como se muestra en la Figura 38, se solucionará el problema del voladizo.

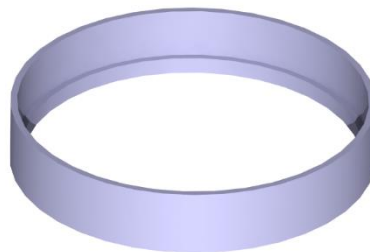


Figura 38. Pieza 2 de la cámara.

Si alguno de los pequeños taladros que tiene la pieza (conducto del generador de filamentos, la válvula de escape del depósito o las purgas) no quedara bien definido tras la impresión, podría realizarse a posteriori.

4.2.2. Ciclón

Para poder imprimir el ciclón, la mejor solución es dividir este en dos piezas, separando el conducto de salida del aire, como se muestra en el despiece de la Figura 39.



Figura 39. Despiece del ciclón.

De esta forma, y colocando las piezas giradas 180° como se muestra en las Figuras 40 y 41, se podrá imprimir el ciclón evitando tener zonas en voladizo. El único voladizo que continúa será el del conducto, pero al ser una distancia muy pequeña con apoyo a ambos lados, los hilos de material que deposita la impresora se sostendrán sin problema.

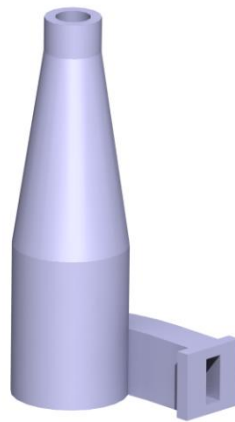


Figura 40. Pieza 1 del ciclón.

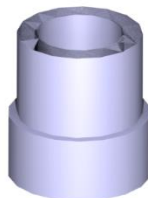


Figura 41. Pieza 2 del ciclón.

4.3. Presupuesto

En este apartado se realiza una estimación del coste de la instalación, teniendo en cuenta tanto costes directos como costes indirectos.

4.3.1. Costes directos

Los costes directos son aquellos que se asocian directamente al producto fabricado, por lo que este apartado engloba los costes de mano de obra directa, y las materias primas utilizadas o las piezas compradas.

- Costes de personal

Se presentan en la Tabla 13 los costes de personal asociados a la etapa de diseño y a la etapa de fabricación.

Tabla 13. Costes de personal.

	HORAS EMPLEADAS	€/HORA	COSTE TOTAL
Ingeniero	96	34.80	3,340.80 €
Técnico	14	29.90	418.60 €

- Costes de material

Se presentan en la Tabla 14 los costes totales de las diferentes partes de la instalación, incluyendo tanto materias primas, como horas de máquina o elementos de unión.

Tabla 14. Costes de material.

COMPONENTE	COSTE TOTAL
Generador TSI 9307	3,480.00 €
Ventilador principal	430.00 €
Ventilador ciclón	30.00 €
Compuerta estanca	77.25 €
Actuador de giro	215.40 €
Impresión 3D cámara principal	29.40 €
Impresión 3D ciclón	16.60 €
Impresión 3D acoplamiento	19.85 €
Estructura de soporte	150.00 €
Material diverso (conductos)	60.00 €

Sumando todo, se obtienen unos costes directos totales de 8,267.90 €.

4.3.2. Costes indirectos

Los costes indirectos son aquellos que no pueden relacionarse directamente con la fabricación del producto, como pueden ser la energía que emplea el centro, los costes indirectos generales de personal...

Debido a la dificultad de su cálculo, se realizará una estimación a partir de los costes directos, la cual será de un 12% de los mismos, basado en una comparativa del valor que se le ha dado en diferentes presupuestos de otros proyectos. Por lo tanto, se obtienen unos costes indirectos totales de 992.15 €.

4.3.3. Coste total

Por lo tanto, sumando costes directos e indirectos, se concluye que el coste total de la instalación es de 9,260.05 €.

Conclusiones

A partir de estudios existentes en la bibliografía, se caracterizaron fluidodinámicamente los parámetros necesarios para definir un estornudo, tales como la velocidad del aire, la no estacionariedad, el flujo volumétrico de líquido que transporta, o el tamaño de las partículas de saliva; gracias a los cuales se pudieron establecer los requisitos que debería cumplir la instalación.

También se analizaron otras instalaciones con fines similares, para comprender su funcionamiento y así poder aplicar en el diseño los aspectos más interesantes de cada una de ellas.

Se planteó una configuración inicial, y se procedió a realizar los cálculos y ensayos necesarios para definir y caracterizar cada uno de sus componentes: la concentración de gotas que proporciona el generador, la presión que debían dar los ventiladores según las alturas de pérdidas, la altura a la que debía estar la superficie libre del depósito de líquido para determinar el caudal del generador de filamentos, y las dimensiones y la eficiencia del ciclón; viendo así qué condiciones de funcionamiento eran las que mejor cumplían los requisitos.

Para algunos elementos de la instalación, se contemplaron diferentes fabricantes y modelos de las piezas que serán adquiridas, eligiendo las que mejor se adaptaban a los requerimientos. Para el resto de elementos, se elaboraron modelos en 3D con el programa Catia v5, así como los planos correspondientes de cada uno de ellos. También con este programa se realizó un montaje de todos los elementos de la instalación para observar cómo sería el conjunto de la misma.

Se optó por un método de fabricación aditiva, con impresora 3D utilizando PLA, por lo que algunas de las piezas tuvieron que ser ligeramente rediseñadas para evitar las zonas en voladizo durante la impresión.

Por lo tanto, en este trabajo se ha diseñado una instalación que pretende simular estornudos. El diseño de la instalación es modular, robusto, permite variar los parámetros del estornudo y además, es sencillo de controlar. Se ha conseguido un diseño fácil de fabricar y con pocos componentes, con una dimensión total de 1.15 metros de alto y 450 x 850 mm² de superficie.

Como futura línea de trabajo, se podría estudiar la posibilidad de incluir en el diseño de la instalación resistencias, para así controlar la temperatura del flujo de salida y asemejarla a la real de una persona.

Bibliografia

1. Songu, M., & Cingi, C. (2009). Sneeze reflex: facts and fiction. *Therapeutic Advances In Respiratory Disease*, 3(3), 131-141.
2. Barry, T., Manning, S., Lee, M., Eggleton, R., Hampton, S., & Kaur, J. et al. (2011). Respiratory hygiene practices by the public during the 2009 influenza pandemic: an observational study. *Influenza And Other Respiratory Viruses*, 5(5), 317-320.
3. Gupta, J., Lin, C., & Chen, Q. (2009). Flow dynamics and characterization of a cough. *Indoor Air*, 19(6), 517-525.
4. Scharfman, B., Techet, A., Bush, J., & Bourouiba, L. (2016). Visualization of sneeze ejecta: steps of fluid fragmentation leading to respiratory droplets. *Experiments In Fluids*, 57(2).
5. Zhao, B., Zhang, Z., & Li, X. (2005). Numerical study of the transport of droplets or particles generated by respiratory system indoors. *Building and Environment*, 40(8), 1032-1039
6. Nishimura, H., Sakata, S., & Kaga, A. (2013). A New Methodology for Studying Dynamics of Aerosol Particles in Sneeze and Cough Using a Digital High-Vision, High-Speed Video System and Vector Analyses. *Plos ONE*, 8(11), e80244.
7. Gao, N., & Niu, J. (2008). Personalized Ventilation for Commercial Aircraft Cabins. *Journal Of Aircraft*, 45(2), 508-512.
8. Duguid, J. (1946). The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *Epidemiology And Infection*, 44(6), 471-479.
9. Han, Z., Weng, W., & Huang, Q. (2013). Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. *Journal Of The Royal Society Interface*, 10(88).
10. Johnson, G., Morawska, L., Ristovski, Z., Hargreaves, M., Mengersen, K., & Chao, C. et al. (2011). Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, 42(12), 839-851.
11. Wan, M., Chao, C., Ng, Y., Sze To, G., & Yu, W. (2007). Dispersion of Expiratory Droplets in a General Hospital Ward with Ceiling Mixing Type Mechanical Ventilation System. *Aerosol Science And Technology*, 41(3), 244-258.
12. Yang, S., Lee, G., Chen, C., Wu, C., & Yu, K. (2007). The Size and Concentration of Droplets Generated by Coughing in Human Subjects. *Journal Of Aerosol Medicine*, 20(4), 484-494.
13. Conceição, S., Pereira, M., & Tribess, A. (2011). A Review of Methods Applied to Study Airborne Biocontaminants inside Aircraft Cabins. *International Journal Of Aerospace Engineering*, 2011, 1-15.
14. Chao, C., Wan, M., Morawska, L., Johnson, G., Ristovski, Z., & Hargreaves, M. et al. (2009). Characterization of expiration air jets and droplet size

- distributions immediately at the mouth opening. *Journal Of Aerosol Science*, 40(2), 122-133.
15. Liu, S., & Novoselac, A. (2014). Transport of Airborne Particles from an Unobstructed Cough Jet. *Aerosol Science And Technology*, 48(11), 1183-1194.
 16. Ren, S., Shi, Y., Cai, M., Zhao, H., Zhang, Z., & Zhang, X. (2018). ANSYS-MATLAB co-simulation of mucus flow distribution and clearance effectiveness of a new simulated cough device. *International Journal For Numerical Methods In Biomedical Engineering*, 34(6), e2978.
 17. Zhang, B., Zhu, C., Ji, Z., & Lin, C. (2017). Design and characterization of a cough simulator. *Journal Of Breath Research*, 11(1).
 18. Crespo Martínez, A. (2006). Mecánica de fluidos.
 19. Echeverri Londoño, C. (2006). Diseño óptimo de ciclones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 123-139.

Catálogos:

- VENTILADORES CENTRÍFUGOS DE SIMPLE ASPIRACIÓN, Serie CMB/CMT. S&P
- Compuertas estancas, Serie AK. TROX
- Actuador de giro Modelo de paleta, Serie CRB2-C. SMC

Webs consultadas:

- <https://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=estornudar>
- <https://www.bq.com/es/pla>

Anexo I. Generador TSI 9307



Figura A1. Imagen del generador 9307.

Especificaciones de funcionamiento:

- Presiones del suministro de aire
 - Mínimo 170 kPa
 - Máximo 2720 kPa
- Temperaturas del suministro de aire
 - Condiciones normales de operación 20°C
 - Máximo 65°C
- Presiones del aire de operación
 - Condiciones normales de operación 170 kPa
 - Máximo 550 kPa
- Flujo del aerosol en condiciones normales de operación: 30 L/min -> (0.5 L/s).
- Producción de gotas de 1 μ m.
- El conducto de salida tiene un diámetro interior de 0.95 cm y exterior de 1.59 cm.
- Dimensiones: 39.5 cm x 15 cm
- Peso: 3.9 Kg

Anexo II. Planos de la instalación

INDICE DE PLANOS

1. Plano del acoplamiento ventilador – válvula
2. Plano de la cámara principal de la instalación
3. Plano del ciclón
4. Plano de la estructura de soporte
5. Plano de los codos
6. Plano de conducto del generador de filamentos