

**Ramon Llambrich Castellví**

**Modelatge i optimització de paràmetres hidrodinàmics  
per a la inferència del cabal massiu a la tràquea en un  
equip de simulació de l'esternut humà.**

**Treball Fi de Grau  
dirigit pel Dr. Salvatore Cito  
dirigit pel Dr. Jordi Pallarès**

**Grau en Enginyeria Biomèdica**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona  
2023**



# Índex

Resum / Resumen / Abstract.....	1
1 Introducció.....	2
2 Objectiu .....	3
3 Marc Teòric .....	4
3.1 Partícules d'aerosols .....	4
3.1.1 Mesura i visualització d'aerosols .....	4
3.2 Simulació de l'esternut.....	5
3.3 Flux .....	5
3.3.1 Flux turbulent, flux laminar, nombre de Reynolds i Darcy-Weisbach. ....	5
3.4 Paràmetres controlats.....	6
3.4.1 Pressió.....	6
3.4.2 Angle.....	7
3.4.3 Temperatura .....	8
3.5 Paràmetres d'estudi.....	8
3.5.1 Cabal .....	8
3.5.2 Temps .....	9
4 Marc experimental .....	11
4.1 Material utilitzat .....	11
4.1.1 Model 3D .....	11
4.1.2 "Generador d'esternuts" .....	12
4.1.3 Sensor .....	14
4.1.4 Làser .....	15
4.1.5 Càmera ràpida.....	16
4.1.6 Excel i Matlab .....	16
4.2 Procediment i resultats .....	23
4.2.1 Preparació del material.....	23
4.2.2 Inici de les proves experimentals .....	28
4.2.3 Models de predicció .....	38
4.2.4 Resultats dels models de predicció .....	40
4.2.5 Personalització i millora del model de predicció basat en la regressió lineal	
42	
5 Futures millores i conclusions.....	50
6 Agraïments.....	52
7 Referències .....	53
Annexes .....	55



## **Resum / Resumen / Abstract**

### Català

Amb l'aparició de la COVID-19 i altres malalties que afecten l'aparell respiratori i es contagien a través dels patògens que es troben en les partícules expulsades en esternuts de les persones infectades, és important analitzar i comprendre la distribució d'aquestes partícules en esternudar.

Amb aquest propòsit, es planteja una configuració de dispositius basada en l'ús d'una màquina que replica esternuts i una tràquea impresa en 3D per tal de simular un esternut i analitzar les imatges obtingudes de la dispersió de les partícules emeses, incorporant les anàlisis prèvies per abordar l'estudi de la deposició de gotes i aerosols en superfícies. Ha sigut necessari testar diversos models de predicció per conèixer els paràmetres adequats per replicar de forma precisa la corba del flux d'aire expulsat durant un esternut.

En l'estudi, es presenten els resultats obtinguts amb els diferents models i s'identifica el més adequat, així com s'estableixen possibles relacions entre els paràmetres característics de la màquina d'esternuts. Finalment, es planteja una possible metodologia per tal d'analitzar les imatges de les partícules aconseguides.

### Castellano

Con la aparición de la COVID-19 y otras enfermedades que afectan al aparato respiratorio y se contagian a través de los patógenos que se encuentran en las partículas expulsadas en estornudos de las personas infectadas, es importante analizar y comprender la distribución de estas partículas al estornudar.

Con este propósito, se plantea una configuración de dispositivos basada en el uso de una máquina que replica estornudos y una tráquea impresa en 3D para simular un estornudo y analizar las imágenes obtenidas de la dispersión de las partículas emitidas, incorporando los análisis previos para abordar el estudio de la deposición de gotas y aerosoles en superficies. Ha sido necesario testar varios modelos de predicción para conocer los parámetros adecuados para replicar de forma precisa la curva del flujo de aire expulsado durante un estornudo.

En el estudio, se presentan los resultados obtenidos con los distintos modelos y se identifica el más adecuado, así como se establecen posibles relaciones entre los parámetros característicos de la máquina de estornudos. Por último, se plantea una posible metodología para analizar las imágenes de las partículas conseguidas.

### English

With the emergence of COVID-19 and other diseases that affect the respiratory tract and are spread by pathogens found in the particles expelled in sneezes of infected people, it is important to analyse and understand the distribution of these particles when sneezing.

To this end, a device configuration is proposed based on the use of a machine that replicates sneezing and a 3D printed trachea to simulate a sneeze and analyse the images obtained from the dispersion of the emitted particles, incorporating previous analyses to address the study of droplet and aerosol deposition on surfaces. It has been necessary to test several prediction models in order to know the appropriate parameters to accurately replicate the airflow curve expelled during a sneeze.

The study presents the results obtained with the different models and identifies the most suitable one, as well as establishing possible relationships between the characteristic parameters of the sneezing machine. Finally, a possible methodology for analysing the particle images obtained is proposed.

## 1 Introducció

El març de l'any 2020, el món va quedar paralitzat i marcat per sempre degut a un esdeveniment que les nostres generacions mai havien patit, la pandèmia de la COVID-19. Amb origen a Wuhan, Xina, aquest virus ha afectat fins ara a més de 600 milions de persones, de les quals han mort pràcticament 7 milions. A Espanya, també hi ha hagut un gran nombre de casos, tot i haver estat confinats durant més de noranta dies. Segons els estudis realitzats per la Johns Hopkins University [1], pràcticament 14 milions d'espanyols han patit la COVID-19 dels quals més de 100.000 han mort. Aquests números remarquen l'excepcionalitat de la situació viscuda, durant la qual s'han dut a terme nombroses accions per tal de poder extingir-la o, si més no, aturar-ne la propagació.

Cal tenir en compte, que al parlar, respirar o tossir les persones exhaleu saliva, tal com s'ha demostrat en l'estudi dut a terme per Duguid J. P., So [2], en el qual queda vigent el fet que aquestes partícules poden romandre en l'aire i, en cas de tenir present algun virus, com la COVID-19, tenir una capacitat de contagi més elevada.

És important remarcar que les partícules expulsades es diferencien en dos conceptes, gotes i aerosols. Tot i que tots dos són exhalats a l'hora de tossir o parlar, s'ha observat que uns romanen en l'aire, els aerosols, i les altres no, les gotes. Això, es deu principalment a la diferència de mida entre unes i altres, les gotes al pesar més tendeixen a caure per l'efecte de la gravetat mentre que les partícules dels aerosols en ser molt més petites poden romandre en l'aire durant un cert temps.

S'ha demostrat, que una de les principals causes de propagació del virus és la inhalació d'aquestes partícules d'aerosols, que queden en suspensió en l'aire quan una persona infectada parla o esternuda [3]. El nostre estudi, doncs, es basarà en aquesta idea, ja que es tractarà de buscar un possible patró i determinar com es dispersen les diferents partícules que exhala una persona en esternudar.

## 2 Objectiu

L'objectiu general del projecte en què es desenvolupa aquest TFG és desenvolupar un equip experimental capaç de modelar un esternut real. L'objectiu específic d'aquest TFG és definir un model i optimitzar-ne els paràmetres hidrodinàmics per a la inferència del cabal a la tràquea en un equip que simula l'esternut humà.

Cal tenir en compte, que hem de ser capaços de poder replicar el cabal d'un esternut, per això ens basarem a replicar la corba experimental cabal d'aire exhalat-temps de l'esternut d'una persona [4]. Al final del treball, haurem de poder aconseguir el següent gràfic, Figura 1, que simula l'esternut de diverses persones, per assegurar que treballarem en unes condicions tan similars com sigui possible a les de l'esternut d'una persona real.

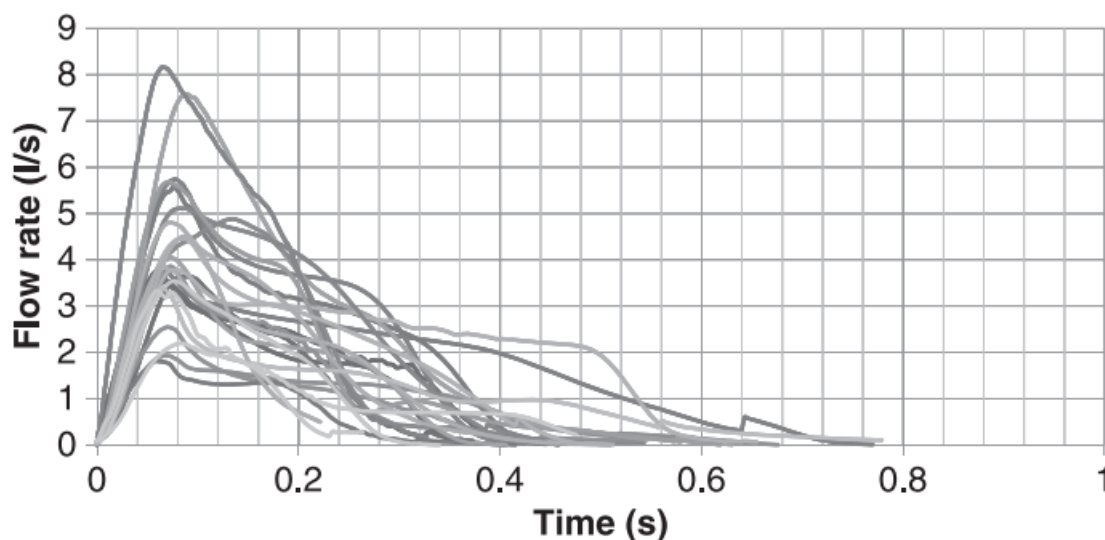


Figura 1. Gràfica obtinguda a partir de l'esternut de 25 persones extreta de Gupta et al. [4].

El següent pas de l'estudi, serà obtenir un rang de paràmetres i un model predictiu que permeti a l'usuari la possibilitat d'obtenir la gràfica desitjada indicant al programa unes característiques concretes que vol obtenir en el gràfic de la replicació de l'esternut. Així, qualsevol interessat tindrà la possibilitat de tenir un rang de paràmetres en què simular diferents tipus d'esternut, ja que no tothom esternuda igual, alguns són més llargs, més curts, més forts, etc.

Finalment, es realitzarà un últim experiment per tal d'observar les partícules exhalades de forma clara i nítida en simular un esternut i així tractar d'analitzar possibles patrons.

Cal destacar, que per poder realitzar totes aquestes proves disposem dels materials i recursos facilitats pel laboratori de la universitat, què seran explicats més endavant, punt 4.1 del document.

## 3 Marc Teòric

### 3.1 Partícules d'aerosols

Les persones exhalen tota mena de partícules provinents de la saliva al parlar o tossir. Aquestes, poden portar associades diferents tipus de bacteris o virus, facilitant-ne la propagació vers altres persones. S'ha demostrat que en tossir o esternudar el nombre de partícules que s'expulsen és major i que aquestes, arriben a distàncies més llunyanes, fins a 7 o 8 metres, ja que són expulsades a velocitats més elevades, de 20 a 30 m/s, [5]. En conseqüència, la possibilitat de contagi és més elevada.

Les partícules d'aerosols són molt més petites que les gotes que s'exhalen en esternudar [6], degut en aquest fet en comptes de caure ràpidament cap a terra, tal com faria una gota, s'ha observat que poden romandre un temps en l'ambient atès el poc efecte que pateixen de la gravetat, tenint així una major possibilitat d'arribar al sistema respiratori d'una altra persona.

#### 3.1.1 Mesura i visualització d'aerosols

Hi ha diverses formes de poder visualitzar les partícules, les principals, però, són les següents.

##### 3.1.1.1 Microscòpia electrònica

S'han fet diversos estudis, on s'estudia la mida i morfologia de les partícules utilitzant la microscòpia electrònica de rastreig [7]. Tot i això, aquesta tècnica, no és la més adient per al nostre estudi, ja que les partícules que nosaltres volem observar tenen un moviment molt ràpid en ser expulsades a l'hora d'esternudar.

##### 3.1.1.2 Sedimentació

Aquest tipus d'estudis es basen a deixar caure les partícules a terra en una zona controlada, per després mesurar el diàmetre de la taca formada. L'ús d'aquesta tècnica la podem descartar ràpidament, ja que les partícules que nosaltres volem monitorar són aquelles que queden suspeses en l'aire i no aquelles gotes que cauen ràpidament.

##### 3.1.1.3 Difusió d'un feix làser

Aquest tipus de tècnica serà la que s'usarà en aquest estudi.

Per a poder realitzar aquest experiment ens basarem en l'estudi realitzat per Anfinrud et al. [8], en el qual es fa ús d'un feix de llum, provinent d'un làser d'alta potència, per tal d'il·luminar les partícules i poder-ne gravar un vídeo per analitzar més tard cada un dels *frames*.

En ser el nostre treball un experiment en el qual les partícules es dispersen ràpidament, aquest és el tipus de tecnologia més adient per tal de poder obtenir els millors resultats.

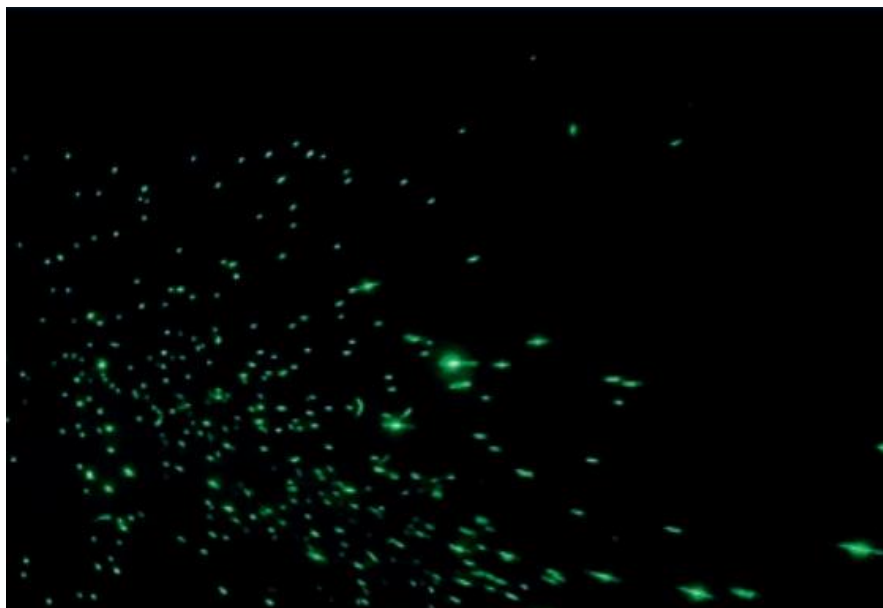


Figura 2. Visualització de la distribució de partícules per difusió d'un feix de llum làser. Imatge extreta d'Anfinrud et al. [8].

## 3.2 Simulació de l'esternut

Els esternuts són reflexos naturals del nostre cos que s'originen quan les vies respiratòries s'irriten. Aquesta irritació pot ser deguda a molts factors tals com al·lèrgies, infeccions respiratòries o simplement estímuls físics. Per eliminar l'estímul que provoca aquesta irritació, s'envia un senyal al cervell que fa que la persona esternudi, expulsant així l'irritant. Aquest fet genera que les partícules, les quals poden ser contagioses si estan associades a fenòmens vírics, es dispersin per l'aire.

Per tal de simular aquest acte reflex del cos farem ús d'una màquina, que s'explica en detall més endavant en el document, punt 4.1.2, capaç de replicar un esternut. Gràcies en això podrem simular les condicions que es produeixen en l'esternut i rebre les dades que més tard s'analitzaran.

## 3.3 Flux

S'ha de tenir en compte, que en generar l'esternut s'originarà un flux. Existeixen dos models de flux principals, flux turbulents i flux laminars.

### 3.3.1 Flux turbulent, flux laminar, nombre de Reynolds i Darcy-Weisbach.

En un flux turbulent les partícules d'aerosols, es mouen de forma desordenada i amb trajectòries caòtiques. En canvi, en un flux laminar les partícules es mouen de forma ordenada, organitzant-se en diverses làmines que es mouen de manera paral·lela entre elles, de manera que mai es creuen les seves direccions.

La distinció entre flux turbulent i laminar es pot fer gràcies en el nombre de Reynolds,  $Re$ . El nombre de Reynolds és adimensional i permet saber quin tipus de flux tenim en cada cas, el flux laminar en l'interior de tubs s'associa a valors del nombre de Reynolds petits,  $Re \leq 2300$ , mentre que es treballa amb flux turbulent en el cas que el valor d'aquest nombre sigui molt més elevat,  $Re > 4000$ . El rang de valors entremig es considera la zona de transició en què flux laminar pot passar a ser turbulent. [9]

El nombre de Reynolds és definit amb la següent equació (1). En el numerador hi trobem la densitat i velocitat del fluid i el diàmetre del tub pel qual circula, que defineixen la força d'inèrcia, mentre que en el denominador s'hi troba la viscositat del fluid.

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\nu} \quad (1)$$

En canonades i tubs, cas que s'utilitza en aquest estudi, també trobem altres factors que s'han de tenir en compte com és el coeficient de fricció de la canonada, també anomenat Darcy-Weisbach,  $f$  [10]. En casos com el d'aquest estudi on treballem inicialment amb un flux turbulent llis, el factor de fricció depèn únicament del nombre de Reynolds (2).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

És important tenir en compte que en aquest estudi el flux a l'inici de l'esternut és turbulent. Contràriament, perquè les mesures que prenguem amb el sensor siguin correctes necessitem un flux desenvolupat. Per això, cal tenir un tub o canonada, pel qual circuli aquest flux generat, el prou llarg perquè es pugui desenvolupar el perfil de velocitats i s'estabilitzi el flux.

### 3.4 Paràmetres controlats

Els paràmetres que podem controlar i modificar en la màquina per tal d'obtenir una gràfica el més similar possible a la de la Figura 1 i, per tant, assegurar que estem treballant amb unes condicions reals [4], són els següents.

#### 3.4.1 Pressió

La pressió en l'esternut pot afectar a la forma en què es propaguen els aerosols. S'ha demostrat, que quan una persona parla més fort les partícules disminueixen en mida i augmenten en nombre [11], tal com es pot observar en la Figura 3. Aquest fet el podem extrapolar al nostre estudi si tenim en compte que per parlar més fort cal exercir una major pressió, tal com s'ha analitzat en l'estudi sobre els canvis en els mecanismes respiratoris durant la parla per tal d'augmentar el to de veu, experiment realitzat per Huber et al. [12]. Per tant, com més fort esternudem major pressió estem exercint i, major possibilitat de contagi pot haver-hi.

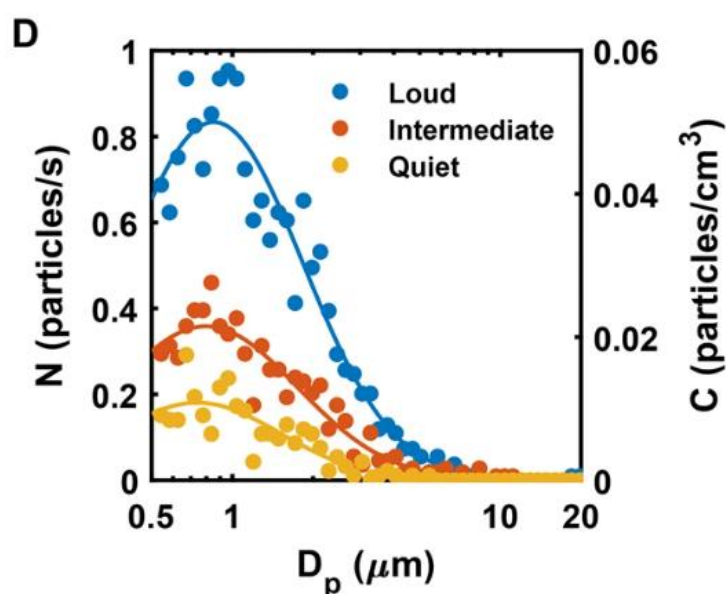


Figura 3. Gràfic extret de Huber et al. [12], en el que es demostra que com més alt es parla, major quantitat de partícules s'expulsen.

### 3.4.2 Angle

Quan ens referim a l'angle, cal entendre que és la quantitat de flux originat a la nostra màquina que deixarem passar i que, per tant, afectarà directament a la quantitat de partícules que estarem expulsant, ja que obrint i tancant l'angle farem que el nombre d'aquests aerosols exhalats variï. També estudiarem com afecta l'obertura de l'angle en el gràfic que esperem, Figura 1, i si augmenta o disminueix la durada de l'esternut.



Figura 4. Simulació de l'estructura que compona la vàlvula i permetrà regular el pas del flux amb la maneta.

Es pot relacionar l'angle amb l'obertura de la boca, ja que quan s'esternuda un dels factors més restrictius al pas del flux és com d'oberta està la boca. Tenint en compte els resultats obtinguts en l'estudi de Gupta et al. [4], Figura 5, s'observa que durant l'esternut l'obertura de la boca des del moment en què comença a sortir flux fins al punt on el cabal arriba a 0 és constant.

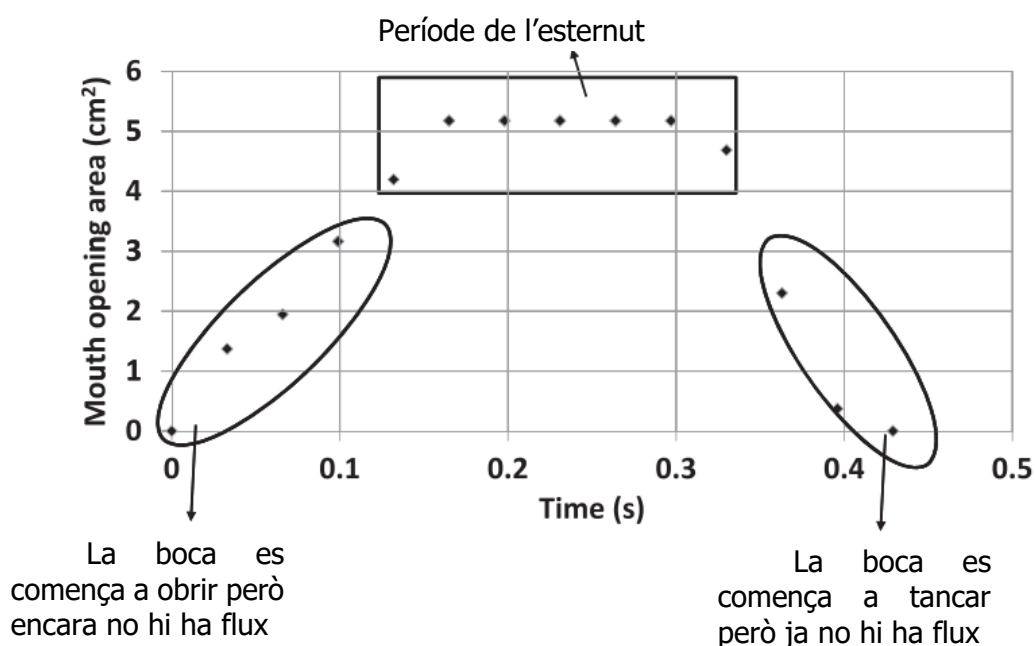


Figura 5. Representació gràfica de l'obertura de la boca durant l'esternut obtinguda durant l'estudi sobre els fluxos dinàmics i la caracterització de l'esternut. Gràfic extret de Gupta et al. [4]

Així doncs, en el nostre estudi es replicarà aquesta idea i es farà que l'obertura de l'angle de la màquina tingui sempre un valor fix. És a dir, en cada prova s'usarà un valor i no es modificarà la posició de la vàlvula de sortida mentre s'exhali.

### 3.4.3 Temperatura

La temperatura és l'últim dels paràmetres que es podran controlar i monitorar. S'ha demostrat en un estudi usant la tecnologia Computational Fluids Dynamics (CFD) [13] que la temperatura pot afectar a l'evaporació de les partícules exhales i, per tant, modificar la distància a la qual arriben aquests aerosols. Aquest fet influeix també en la concentració final de partícules en l'aire segons el diàmetre de les partícules i la temperatura a què es troba la sala, Figura 6.

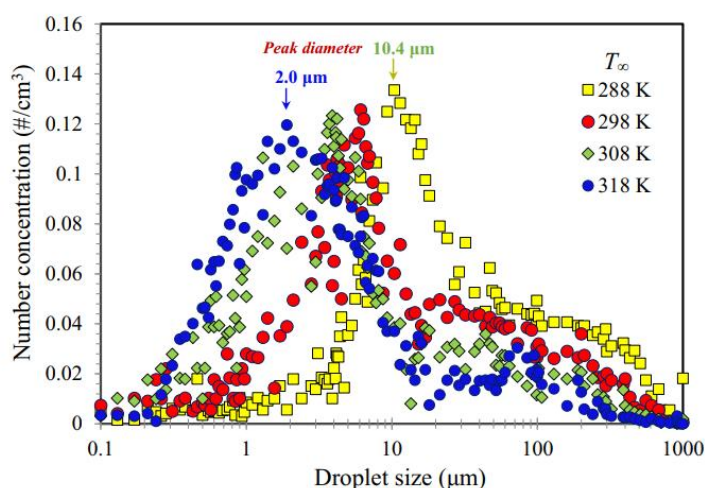


Figura 6. Simulació CFD de la concentració de partícules segons la seva mida i temperatura de la sala en l'estudi de Bahramian et al. [13].

Tot i això, no s'ha pogut demostrar encara un patró que relacioni directament la temperatura i la mida de les partícules des del temps zero, moment inicial de l'esternut, i que no depengui del temps que passa mentre les partícules es troben suspeses en l'aire.

## 3.5 Paràmetres d'estudi

A continuació es veuen les dades que s'obtenen en les gràfiques i que formaran part dels resultats.

### 3.5.1 Cabal

El cabal és la quantitat de líquid o gas que circula per un sistema en un temps determinat. En l'aparell respiratori el cabal es refereix a la quantitat d'aire que flueix per aquest aparell i que és expulsat al parlar, tossir o esternudar.

Existeixen dos tipus de cabal, volumètric i màssic.

#### 3.5.1.1 Cabal volumètric

El cabal volumètric mesura la quantitat de volum que flueix en un cert període de temps, es mesura en volum per unitat de temps (3), com podrien ser m<sup>3</sup>/s o L/s.

$$Q = A \cdot v \quad (3)$$

Aquest tipus de cabal és usat en una gran quantitat de disciplines, com control de processos, control ambiental, investigació mèdica, el qual és el que més aplica en aquest estudi, i altres.

En la investigació mèdica s'utilitza aquest tipus de cabal per a avaluar el rendiment pulmonar, monitorar la ventilació mecànica o bé mesurar la taxa de flux de gasos respiratoris.

### 3.5.1.2 Cabal màssic

El cabal màssic mesura la quantitat de massa que flueix en un període de temps determinat. Es mesura en massa per unitat de temps (kg/s), (4).

$$\dot{m} = A \cdot v \cdot \rho \quad (4)$$

Observant les dues equacions podem trobar una relació, el cabal màssic és la multiplicació del cabal volumètric per la densitat del gas o líquid amb què estem treballant (5).

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (5)$$

En aquest estudi i, basant-nos en la caracterització de l'esternut d'una persona que hem observat en la Figura 1, es farà servir el cabal volumètric, en L/s. En aquest cas, el més important serà analitzar el pic màxim al qual arriba el flux volumètric, és a dir, el valor màxim en la gràfica. Usarem aquest punt com a referència en el nostre estudi per saber si estem usant una combinació de paràmetres correcta o no, ja que en l'experiment de Gupta et al. [4] s'observa que en la majoria dels casos el cabal màxim arriba a pics d'entre 3 i 6 L/s, tot i que hi ha algunes excepcions on aquest pic assoleix valors una mica més elevats o més petits.

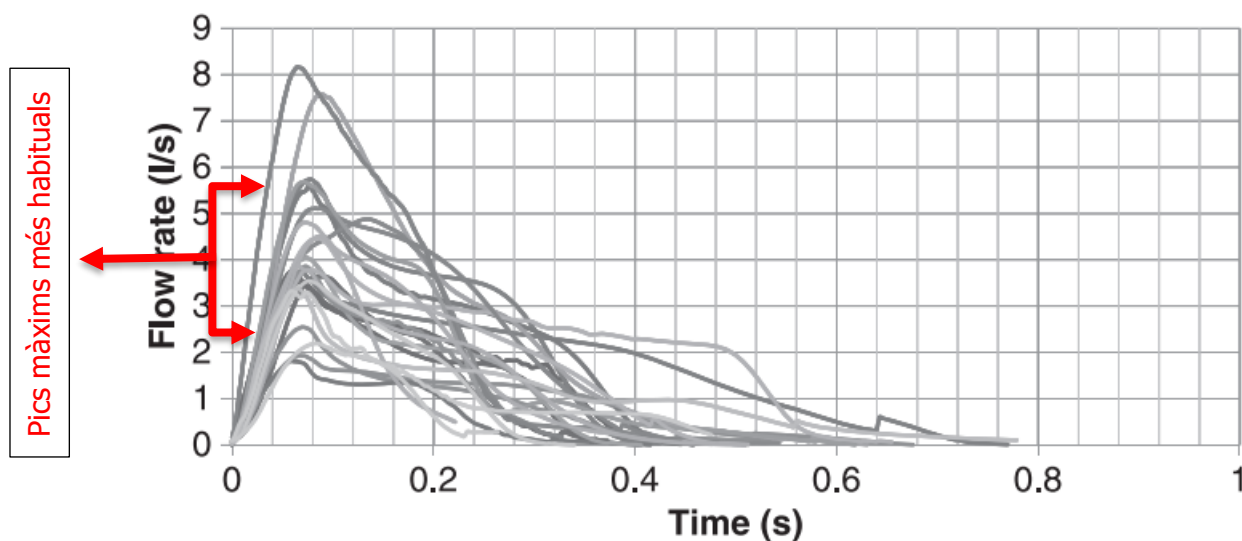


Figura 7. Pics màxims del cabal volumètric en la gràfica obtinguda a partir de l'esternut de 25 persones en l'estudi de Gupta et al. [4].

### 3.5.2 Temps

Els esternuts són actes reflexes i molt ràpids. Tal com es veu en la Figura 8 no acostumen a ser més llargs de 0,6 segons, tot i que en alguns casos puntuals es poden allargar fins a durar 1 segon. Així doncs, un esternut habitual mig de la població dura entre 0,3 i 0,6 segons, temps que es buscarà en els nostres resultats.

Estudis han demostrat que com més temps dura l'esternut, més partícules s'emeten i, per tant, més possibilitat de contagi en cas de patir una malaltia infecciosa com la COVID-19 [11].

- Durada mitja
- Temps de pujada
- Temps de baixada

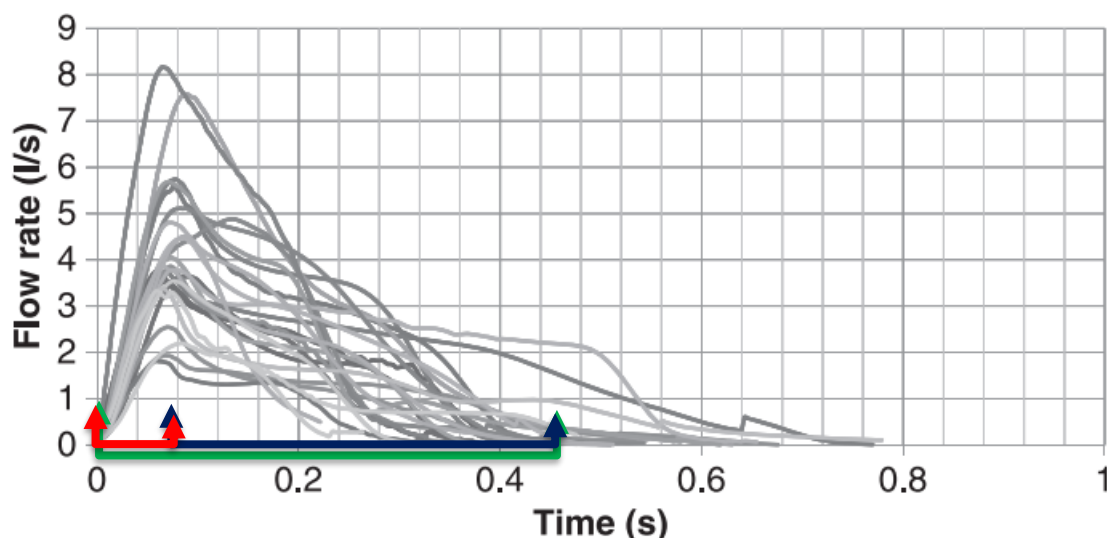


Figura 8. Temps mitjà dels esternuts en la gràfica obtinguda a partir de l'esternut de 25 persones en l'estudi de de Gupta et al. [4].

En el gràfic de la figura anterior també es poden diferenciar dos grans grups. El primer, remarcat en vermell, correspon al temps de pujada de la gràfica, és a dir el temps que tarda el cabal a assolir el seu pic màxim, mentre que el de color blau inicia en el punt on el valor del cabal passa de ser màxim a disminuir finalitzant quan el cabal arriba a 0.

### 3.5.2.1 Temps de pujada

El temps que anomenarem de pujada en els esternuts i, que és el temps que tarda l'esternut a arribar al flux màxim, també es coneix com a "Peak Velocity Time" (PVT), [14]. És interessant comprovar si amb un major PVT el temps de baixada és directament proporcional i, per tant, també és més elevat. En aquest estudi, podrem veure també si el valor del pic màxim té alguna relació amb el temps que tarda el flux a arribar a aquest valor.

### 3.5.2.2 Temps de baixada

El temps de baixada és el temps que tarda el flux de l'esternut a arribar a 0 des que comença a disminuir. Segons sembla, tot i que encara no s'ha pogut demostrar, com més curt sigui aquest temps menys quantitat d'aerosols s'expulsarien, però aquest fet està molt condicionat per altres factors com la pressió o el cabal.

Tenint en compte els resultats de la Figura 1 com a referència, monitorarem els temps tant de pujada com totals per poder saber si les nostres condicions de treball s'assimilen als casos reals o no.

## 4 Marc experimental

Per a poder dur a terme aquest estudi, s'ha utilitzat el material del qual disposem en el laboratori de la universitat.

### 4.1 Material utilitzat

#### 4.1.1 Model 3D

És un dels elements més important en aquest experiment, ja que permet replicar amb gran exactitud l'expulsió dels aerosols en un esternut real.

El model de les vies respiratòries superiors està imprès en 3D per part d'una empresa externa i, simula la tràquea, faringe, laringe i cavitats bucal i nasal d'un pacient. El model està buit per dins per tal de permetre el flux d'aire per l'interior i així poder simular l'esternut.



Figura 9. Model de les vies respiratòries superiors imprès en 3D en què es basa l'experiment.

Tal com es veu en la Figura 9, s'ha muntat una estructura per tal de poder fixar el model en una posició adequada que permeti realitzar les proves correctament. Per aconseguir-ho es va crear un suport amb diferents bigues metàl·liques que subjectessin la peça juntament amb brides.

#### 4.1.2 "Generador d'esternuts"

Aquesta màquina està composta per diferents components, tal com es veu en la Figura 10, que permeten replicar l'esternut.

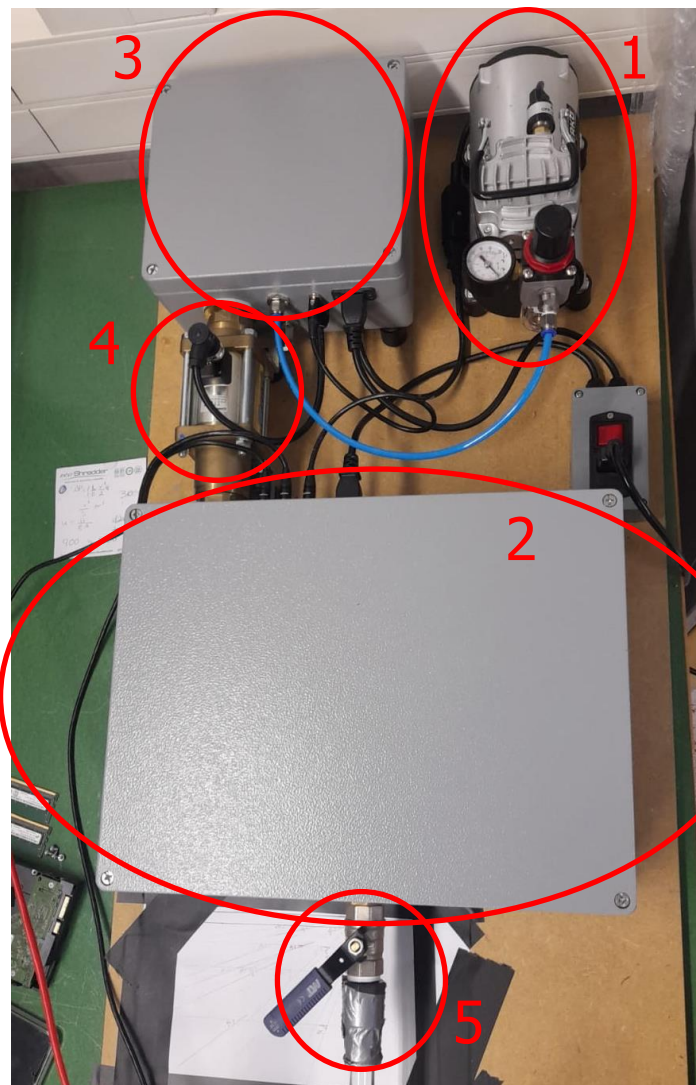


Figura 10. Elements de la nostra màquina per a replicar esternuts.

1. Compressor
2. Caixa amb ventiladors i resistències
3. Caixa amb ventiladors i resistències
4. Servovàlvula
5. Vàlvula de bola

El generador funciona a través de les ordres que se li envia des d'un programa d'ordinador i que rep en la placa base. Com es pot veure en la imatge de la Figura 11 la màquina s'ha de connectar a un PC mitjançant un port USB. Un cop seleccionat el port USB en el que s'ha connectat, s'indiquen els valors que se li volen enviar al generador d'esternuts, els quals són la pressió i temperatures.

Un cop la màquina rep els paràmetres, s'activa el compressor (1) per tal d'assolir la pressió d'aire desitjada i s'escalfen les resistències (2-3) segons la temperatura que s'ha indicat. En el moment en què els valors arriben als sol·licitats des del programa, el botó de

Vàlvula *ON/OFF* permet expulsar aquesta pressió de tal manera que es genera un flux a través de la servovàlvula (4) que simula l'esternut en ser expulsat (5) i passar per la tràquea.

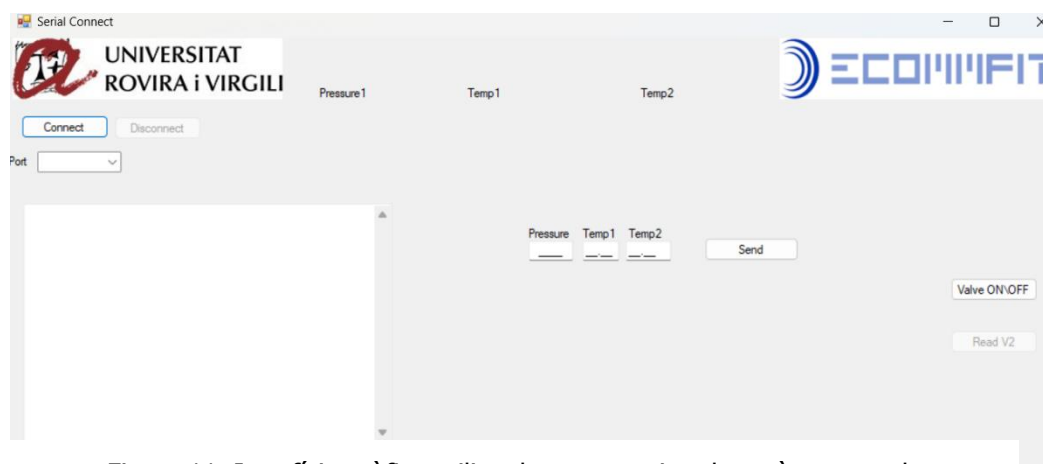


Figura 11. Interfície gràfica utilitzada per a enviar els paràmetres a la màquina.

Aquest dispositiu també permet modificar el flux mitjançant una vàlvula de bola, Figura 4, la qual es controla en funció de l'angle d'obertura de la maneta, tal com es pot observar en el punt 5 de la Figura 10. Com més obert, major flux d'aire permet passar mentre que en disminuir aquest angle es restringeix el pas al flux.

Amb això, s'aconsegueix una personalització total dels 3 paràmetres d'entrada (pressió, angle i temperatura de l'aire expulsat), per tal de poder obtenir diverses combinacions amb què treballar i escollir-ne la més adequada segons les nostres necessitats.

Per a poder connectar la tràquea i el generador d'esternuts i, així permetre el pas del flux sense tenir pèrdues es va utilitzar un tub de metacrilat prou llarg, 60 cm, per tal de treballar amb un flux desenvolupat que no falsifiqués les dades captades, Figura 12. Cal destacar que el perquè s'ha escollit aquesta mesura concreta es detalla més endavant en el document, punt 4.2.1.

En la imatge, Figura 12, es pot veure també part de l'estructura metàl·lica de suport i com el tub i la tràquea es connecten mitjançant un tub de plàstic que permet dirigir el flux a l'entrada de la tràquea.

Aquest dispositiu, el nebulitzador, es connecta via Bluetooth amb el telèfon mòbil i ofereix la possibilitat d'expulsar partícules que simulin els aerosols d'un esternut en l'experiment. Els aerosols són expulsats de manera ininterrompuda sempre que el dispositiu estigui encès.

Per a poder controlar en la mesura del possible la sortida d'aquests aerosols per la tràquea i, que no interfereixin de manera indeguda existeix el cub negre de la Figura 12. Aquest cub està connectat tant al tub que porta el flux del generador d'esternuts a la tràquea com a un segon dispositiu, el nebulitzador, Figura 13.

El cub emmagatzema els aerosols que expulsa el nebulitzador i no permet el seu pas cap a l'exterior, i per tant cap a la tràquea, fins que s'activa el generador d'esternuts i arriba el flux generat per aquest. Un cop s'ha activat la màquina i arriba el flux, aquest se n'endú els aerosols del cub i segueixen el recorregut essent expulsats finalment per la tràquea replicant el que succeeix en els esternuts. Això permet que amb l'ajut d'un làser per il·luminar aquests aerosols i una càmera, es puguin captar imatges de la distribució del flux amb les partícules expulsades en l'aire per al seu estudi posterior.

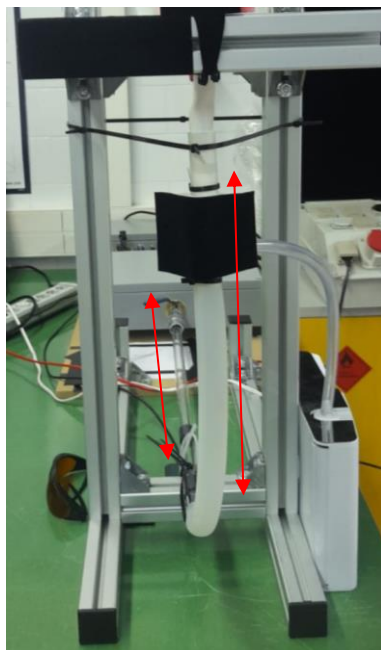


Figura 12. Estructura de suport i connexió del generador d'esternuts amb la tràquea.

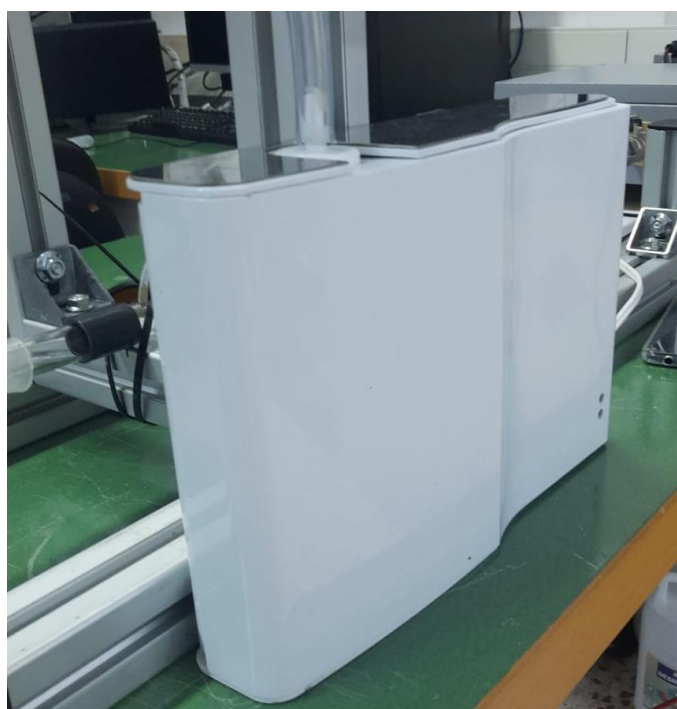


Figura 13. Nebulitzador utilitzat per a emetre partícules d'aerosols.

Per a finalitzar amb la màquina d'esternuts, cal destacar que aquesta compta amb diversos sensors, els quals són essencials per a poder rebre els valors a través del programa en l'ordinador i així poder fer l'estudi de les dades més endavant.

#### **4.1.3 Sensor**

Aquest sensor permet obtenir la diferència de pressió entre dos punts d'un tub o canonada. Gràcies en aquesta mesura es calculen més endavant els diferents paràmetres de sortida de l'esternut: el cabal volumètric, el temps de pujada i el temps final.



Figura 14. Sensor usat en l'experiment.

S'ha de tenir en compte també que per a obtenir les mesures correctes el sensor s'haurà de calibrar abans d'iniciar l'experiment, aquest pas es detalla en el punt 4.1.6.1.1 del document.

#### 4.1.4 Làser

Com s'ha mencionat anteriorment, en l'estudi s'usarà un làser per poder crear un feix de llum que il·lumini els aerosols expulsats en l'esternut i així sigui possible visualitzar-los.

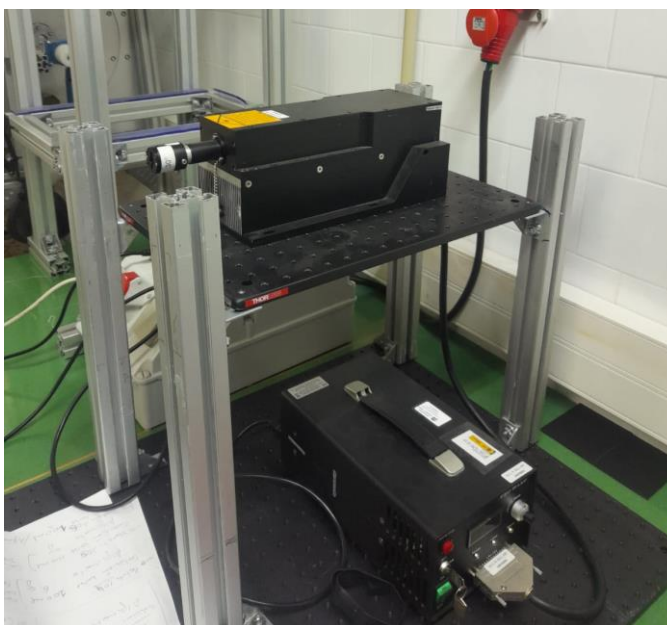


Figura 15. Làser utilitzat en l'experiment.

El làser proporcionat pel laboratori de la universitat té una potència de fins a 10 Watts, tot i que en l'experiment no s'ha usat un nivell superior a 5 W per seguretat. Aquest làser emet un potent feix de llum de color verd que permet visualitzar els diferents aerosols expulsats i la seva distribució.

#### 4.1.5 Càmera ràpida

Aquesta càmera, Figura 16, permet capturar el moviment dels aerosols expulsats per l'esternut en càmera lenta per així tenir la possibilitat d'analitzar amb detall la seva distribució.

Aquest model ofereix diverses possibilitats tant de resolució com de fotogrames per segon. Per a aquest experiment s'ha usat una resolució de 1024 x 1000 píxels, que hauria de permetre observar les partícules expulsades i la seva distribució a pesar de la seva mida, recordem que parlem de micres. Quant a fotogrames per segons s'ha treballat amb un valor de 50 Frames Per Second (FPS), valor que hauria de possibilitar poder veure les diferents partícules d'aersols expulsades amb nitidesa.

En utilitzar aquest tipus de càmera amb aquests paràmetres no tot són avantatges, ja que els arxius capturats en vídeo són molt pesats i ocupen molta memòria en els dispositius. En algunes proves realitzades s'ha vist que vídeos de no més de 30 segons arriben a pesar 0,5 GB. Així doncs, en el futur es podria tractar de millorar aquest fet.



Figura 16. Càmera de gravació usada en l'experiment.

#### 4.1.6 Excel i Matlab

Aquests dos han sigut els programes informàtics usats per fer el tractament de les dades obtingudes.

L'aplicació del generador d'esternuts envia les dades captades pel sensor a l'ordinador, connectat mitjançant un USB, en un fitxer Excel amb format.csv. En aquest document s'hi troben les dades de cabal màxim, temps de pujada i temps final.

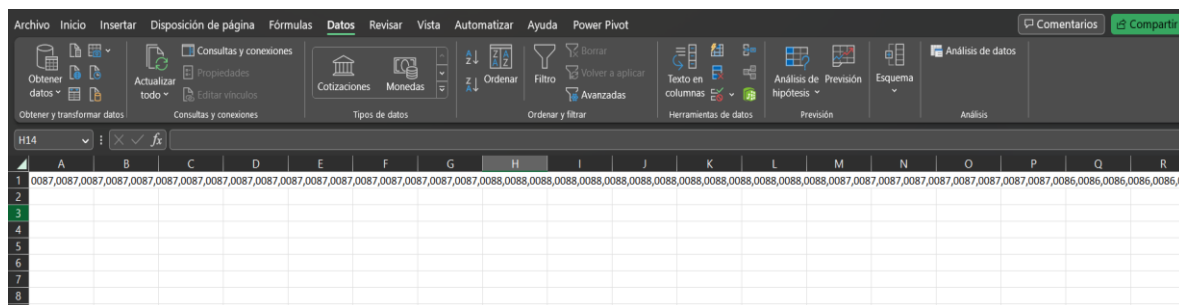


Figura 17. Exemple del document Excel que es rep al realitzar la simulació de l'esternut.

#### 4.1.6.1 Codi de Matlab per tractar els paràmetres de l'esternut

Per a poder tractar les dades obtingudes en aquest Excel es va crear un programa en Matlab. En aquest programa s'indiquen les dades d'entrada que enviem al generador d'esternuts, és a dir, pressió, temperatura i angle.

```
y = table2array(readtable("prova.csv"))*10^-2; %FICHERO NOMBRE AQUÍ!!!  
Pressure = 100;  
Temperature1 = 25;  
Temperature2 = 25;  
Angle = 45;
```

Figura 18. Codi de Matlab usat per al tractament de les dades obtingudes.

El programa genera un gràfic tal com els que hem vist en l'estudi en què es va caracteritzar l'esternut de les persones [4], Figura 1. Gràcies en això es pot realitzar una ràpida comparació per saber si els paràmetres utilitzats en la prova són adients per replicar un esternut humà.

El programa representa el temps que dura l'esternut en l'eix X i el cabal en l'eix Y. Per això, primer cal dimensionar el tub en què es pren la mesura del gradient de pressió.

```
D = 0.016; %m  
L = 0.1; %m  
A = pi*D^2/4; %m^2
```

Figura 19. Declarem mesures en el codi de Matlab.

Com es pot veure, la longitud L és 0,1 metres. Aquest valor representa la distància entre els dos punts de mesura del gradient de pressió en el sensor. Per altra banda, el diàmetre (D) del tub és 0,016 metres i, amb aquests paràmetres és possible calcular l'àrea per la qual passa el flux, Figura 19.

Després de declarar les dimensions del tub, es calculen les diferents equacions per obtenir el nombre de Reynolds i el coeficient de fricció del tub, Darcy-Weisbach, mencionats en el punt 3.3.1 d'aquest document.

Teòricament, a partir de l'equació de Darcy-Weisbach (6) es pot suposar un coeficient de fricció (f) per tal de calcular la velocitat (u). Un cop aconseguit aquest valor, es realitza el càlcul de l'equació d'un flux en règim turbulent llis (2) usant el valor de velocitat calculat en el nombre de Reynolds de l'equació, és a dir que es calcula el nombre de Reynolds de l'equació 2 usant el valor de velocitat calculat en l'equació 6.

Amb això s'obté el coeficient de fricció de Darcy-Weisbach de la segona equació. Es busca iterar de forma que es trobi una velocitat (u) amb què els coeficients de fricció (f) d'ambdues equacions (2 i 6) siguin iguals.

$$\frac{\Delta P}{L} = f * \frac{\rho}{2} * \frac{u^2}{D} \quad (6)$$

Un cop es troben la velocitat i el coeficient de fricció és possible calcular el cabal volumètric aplicant-ne l'equació (7) per tal d'obtenir la gràfica de la prova realitzada, Figura 20.

$$Q = \frac{\pi * D^2}{4} * u - sensor \quad (7)$$

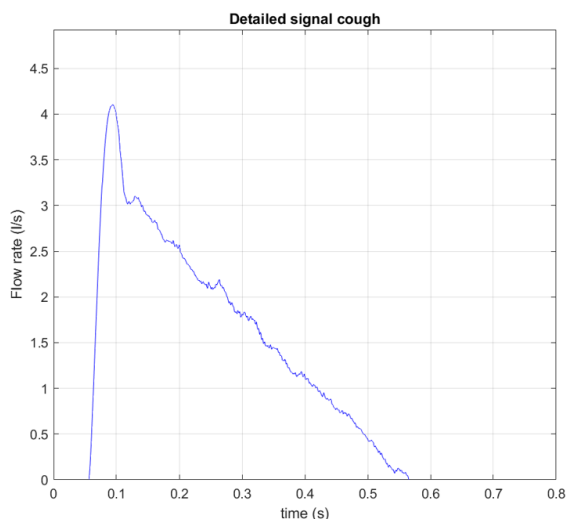


Figura 20. Exemple de gràfic de la replicació d'un esternut obtingut amb el 1er codi usat en Matlab.

En el càlcul del cabal podem veure les diferents variables que hi ha en l'equació, però cal ressaltar-ne la variable sensor.

#### 4.1.6.1.1 Calibratge dels sensors

Per a poder captar les dades de l'esternut i enviar-les a l'ordinador, el programa necessita un sensor correctament calibrat per tal de prendre les mesures correctes.

Per poder calibrar el sensor s'ha fet ús del generador de flux de la universitat. Aquest, permet generar un flux amb un valor conegut, en mesurar aquest valor amb el sensor que s'utilitza es té la possibilitat de calcular la diferència de mesura i calibrar correctament el dispositiu de mesura.

Tal com es pot observar en la Figura 21, s'ha col·locat el mateix tub que connectarà la tràquea amb la màquina d'esternuts i, pel que passarà el flux generat per l'esternut. Col·locant el sensor en l'extrem de sortida serem capaços de calcular la diferència de pressió generada i, tenint en compte el balanç d'energia mecànica [15], que relaciona l'augment de la diferència de pressió amb l'augment del flux, podrem obtenir el flux que mesura el sensor.



Figura 21. Muntatge del tub per a calibrar el sensor que s'utilitzarà en les proves.

Després de calibrar el sensor, el procediment per aconseguir-ho s'explica més endavant en el punt 4.2.1 del document, s'ha pogut obtenir el valor d'offset del sensor, que equival a 0,61974 L/s, que s'ha de tenir en compte en el càlcul i, per això es veu l'equació 7 un valor anomenant sensor que resta en l'equació.

Tot i això, durant el desenvolupament de les proves es va observar que el temps mesurat pel codi també presentava un offset de +0,05 segons. Per solucionar aquest petit error, es va optar perquè els valors de temps obtinguts en els gràfics se'ls restés aquest offset. Així doncs, els valors reals tant de temps de pujada com temps final són 0,05 segons menys que els proporcionats pel codi Matlab i, així s'ha tingut en compte a l'hora de fer l'estudi de les dades aconseguides.

#### 4.1.6.2 Codi de Matlab per a estudiar la normalitat de les dades

Un cop recopilades totes les dades en acabar els experiments amb les diferents combinacions de paràmetres d'entrada en el generador d'esternuts es comprova si aquestes segueixen una distribució normal o no, ja que nombroses eines i tècniques estadístiques es basen en aquesta idea. És el cas de regressions lineals o models ANOVA, amb els quals s'obtenen resultats més precisos i fiables quan es treballa amb una distribució normal.

En cas de treballar amb una distribució normal els resultats de l'estudi són més generalitzables pel fet que ofereixen una aproximació més decent. De la mateixa manera, un conjunt de dades amb distribució normal ofereix una anàlisi estadística més simple gràcies a les seves característiques, per exemple en tenir una mitja, mitjana i moda iguals és més senzill simplificar i tractar les dades per a després realitzar-ne els pertinents càlculs i estudis.

Finalment, i tenint en compte el que diu el Teorema del Límit Central (TLC), [16], independentment de la distribució inicial de les variables el total o la mitja d'un gran nombre de variables aleatòries independents amb distribucions idèntiques tindran una distribució aproximadament normal, fet que podem comprovar quan estudiem la distribució de les nostres dades.

La distribució normal, també coneguda com a distribució Gaussiana està determinada per dos paràmetres, la mitja de les dades ( $\mu$ ) i la seva desviació estàndard ( $\sigma$ ), [17]. Es pot representar de diverses maneres, una d'aquestes és realitzar un histograma en què les bases dels rectangles que constitueixen l'histograma siguin cada vegada més petits, de manera que s'assimili a una corba suau de forma "asimptòtica", Figura 22. Aquesta distribució tan característica es defineix per l'anomenada funció densitat de probabilitat (f.d.p).

La f.d.p. d'una variable  $x$  que descriu com es distribueixen els valors de les dades de la variable en una distribució normal que s'expressa de la següent manera (8).

$$f. d. p (x) = \frac{1}{(\sigma \cdot \sqrt{2\pi})} \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right) \quad (8)$$

Aquesta equació permet obtenir la f.d.p., que idealment representa la probabilitat de trobar un valor en un cert rang  $i$ , es representa de la següent manera, Figura 22.

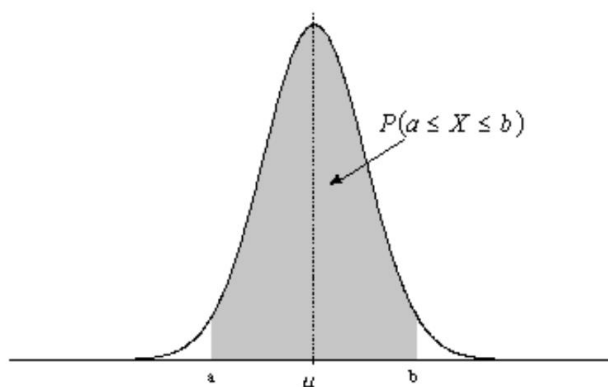


Figura 22. Gràfic d'una distribució normal presentada en l'estudi de Pértegas Díaz S., Pita Fernández S. [17].

Per a verificar que estem treballant amb una distribució normal de les dades s'ha creat un codi de Matlab en què es realitzen diverses comprovacions en les 3 variables que tenim, cabal volumètric, temps de pujada i temps final.

El codi de Matlab reclama a l'usuari un fitxer .xlsx per a poder guardar-ne les dades a estudiar. Un cop rep les dades de les 3 variables mencionades anteriorment han sigut guardades correctament el programa comença a tractar-les per veure'n la distribució.

```
% CABAL VOLUMETRIC
figure;
subplot(2, 3, 1);
histogram(cabalvolumetric); %Histograma: distribucio de frequencia de les
% dades, quants cops apareix cada valor
title('Histograma de Cabal Volumetric');
subplot(2, 3, 2);
qqplot(cabalvolumetric); %QQ-Plot: gràfic de quantils per comparar les
% dades amb el que es una distribucio normal
title('QQ-Plot de Cabal Volumetric');
subplot(2, 3, 3);
normplot(cabalvolumetric); %Grafic de Normalitat: grafic per comparar dades
% i veure si segueixen la distribucio normal
title('Grafic de Normalitat del Cabal Volumetric');
subplot(2, 3, 4);
boxplot(cabalvolumetric); %Boxplot: enseyнем distribucio de les dades de la
% variable en un grafic de caixes
title('Boxplot de Cabal Volumetric');
```

Figura 23. Exemple de l'estudi de les dades de cabal volumètric

En la figura superior podem observar les diferents comprovacions que es realitzen a les dades.

En primer lloc, es presenta un histograma amb els diferents valors per tal d'analitzar la distribució en freqüència de les dades obtingudes en diferents intervals. En el cas de seguir una distribució normal les dades en l'histograma s'assimilaran a la forma d'una campana.

Seguidament, es presenta un gràfic QQ, que compara els quantils de les dades amb els quantils d'una distribució normal. Així doncs, en el cas d'assolir una figura on els punts representatius dels quantils de les nostres dades segueixen de forma aproximada la línia que representa els quantils d'una distribució normal estarà indicant que es treballa amb unes dades que segueixen una distribució normal.

La següent comprovació és verificar que les dades segueixen una distribució normal tenint en compte la probabilitat d'aconseguir cada un dels diferents valors. Per assolir-ho, s'usa la funció *normplot* de Matlab, la qual crea una línia sòlida que connecta el primer i tercer quartil de les dades. Aquesta línia s'estén fins als extrems de les dades per tal de representar-la sobre tots els valors. Finalment, si els punts que representen els valors estudiats es troben sobre aquesta línia es pot afirmar que la distribució és normal.

Per acabar, es realitza un *boxplot*, gràfic de caixes, on es pot observar com s'agrupen els diferents valors de les dades i si existeix algun *outlier* que indiqui que s'ha de repetir alguna de les mesures.

#### 4.1.6.3 Models de predicció

Cal destacar que aquí s'explica el que es busca i el funcionament característic dels models de predicció testats en l'estudi. L'explicació sobre els models usats i els resultats obtinguts es presenten més endavant en el document, punt 4.2.3.

Amb aquest codi de Matlab s'aconsegueix que l'usuari pugui obtenir uns valors d'entrada, pressió i angle, predits pel programa a partir d'uns valors de sortida desitjats. Primer cal indicar

al programa quins paràmetres de sortida, cabal volumètric, temps de pujada i temps final es volen assolir perquè el programa usant una base de dades i tenint en consideració la relació entre les diferents variables indiqui a l'usuari els valors d'entrada per configurar el generador d'esternuts.

Això facilitarà molt l'ús d'aquest dispositiu en el futur, ja que no s'haurà d'anar provant diferents valors d'entrada aleatòriament fins a aconseguir els valors de sortida desitjats, sinó que indicant la sortida esperada es podrà saber ràpidament com configurar l'aparell d'esternuts.

El primer que fa el programa és demanar un fitxer .xlsx del qual poder obtenir una base de dades per realitzar l'entrenament dels models predictius. S'ha donat l'opció a l'usuari de poder navegar per l'ordinador per tal d'escollir el fitxer en comptes d'haver d'introduir el nom del document en el codi de Matlab. D'aquesta manera, s'estalvia a l'usuari el fet d'haver de canviar el nom del fitxer cada cop que es desitgi escollir una base de dades diferent.

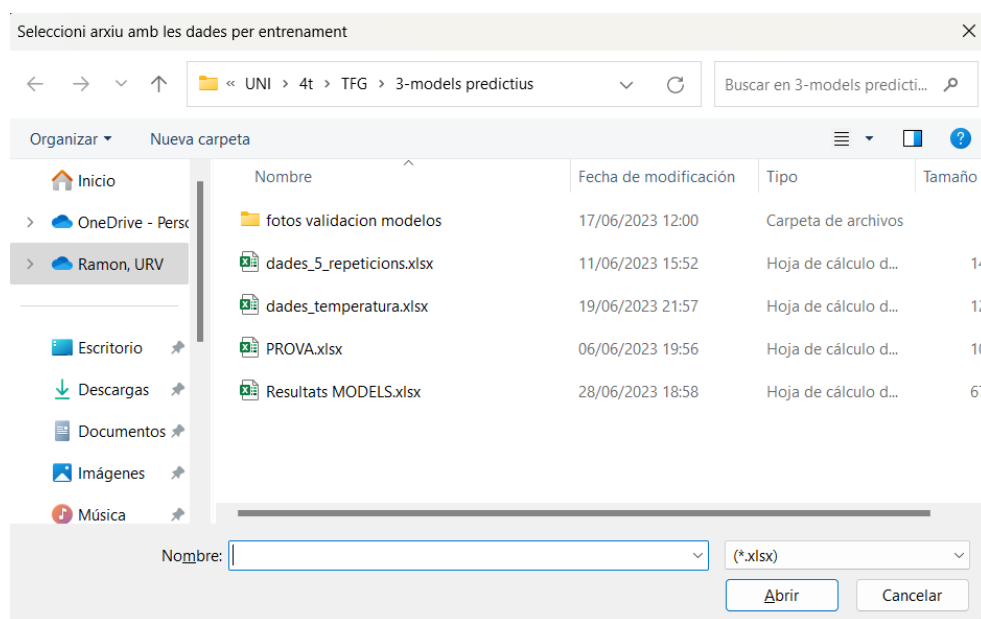


Figura 24. El programa demana el fitxer amb les dades d'entrenament a l'usuari.

Per aconseguir saber els valors de sortida desitjats s'ha creat una Interfície Gràfica d'Usuari (GUI) en la qual l'usuari ha d'indicar els paràmetres de sortida, cabal volumètric (L/s), temps de pujada (s) i temps final (s) que vol obtenir l'usar la màquina, Figura 25.

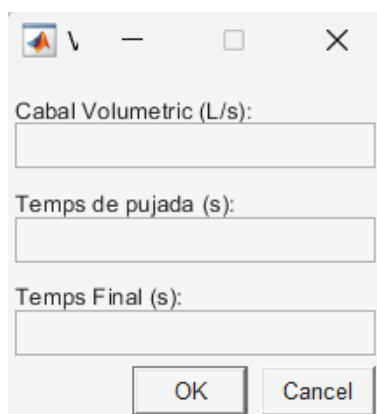
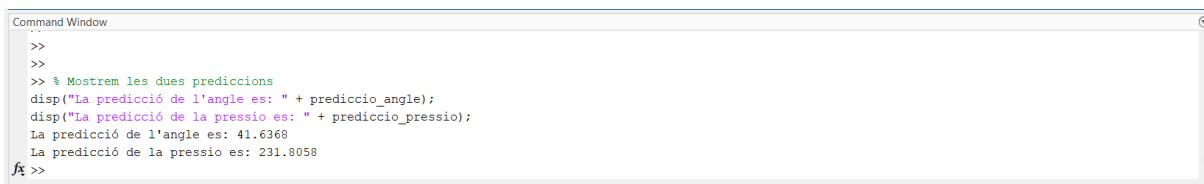


Figura 25. Interfície gràfica en la qual l'usuari indica Cabal volumètric esperat en L/s, temps de pujada en segons i temps final en segons de l'esternut que es vol simular.

Un cop afegits els valors desitjats, es fa clic en el botó "OK", Figura 25. En aquest moment, el programa guardarà els valors esperats i es crearà una taula d'entrenament per als valors a predir.

Així doncs, basant-se en aquest coneixement el programa predirà els valors d'angle, en graus i, pressió d'entrada, en hPa, per a configurar l'aparell i obtenir els valors de sortida desitjats, els quals s'indiquen a l'usuari per la comanda, Figura 26.



```
Command Window
>>
>>
>> % Mostrem les dues prediccions
disp("La predicció de l'angle es: " + prediccio_angle);
disp("La predicció de la pressio es: " + prediccio_pressio);
La predicció de l'angle es: 41.6368
La predicció de la pressio es: 231.8058
fx >>
```

Figura 26. Paràmetres d'angle i pressió predits pel programa que s'indiquen a l'usuari.

Per poder saber els models més adequats per usar en aquest estudi s'han hagut de fer grans quantitats de proves, les quals seran explicades a continuació en el següent punt del document, així com els resultats obtinguts i l'estudi d'aquests.

## 4.2 Procediment i resultats

### 4.2.1 Preparació del material

Els primers passos a seguir en l'estudi van ser muntar l'estructura per poder dur a terme l'experiment, així com calibrar el sensor a utilitzar i fer les primeres proves per comprovar que el conjunt funcionava correctament.

Tal com s'ha esmentat anteriorment en el document, l'objectiu del projecte en què es desenvolupa aquest TFG és desenvolupar una plataforma capaç de visualitzar la distribució de les diferents partícules d'aerosols en un esternut. Per això, ha sigut necessari establir una estructura de suport per tal que la tràquea restés immòbil i a una alçada suficient per poder captar la simulació de l'esternut amb una càmera.

A més, s'han hagut de tenir en compte altres factors per tal que no afectessin la simulació de l'esternut. Aquests són treballar amb un flux desenvolupat per tal d'obtenir resultats vàlids i fiables, la possibilitat de treballar amb un Venturi o com permetre la simulació i pas de partícules cap a la tràquea per a acabar simulant l'esternut.

Per aconseguir aquestes característiques en l'experiment s'ha hagut de fer una distribució dels diferents equips. La idea en què ens vam basar va ser en situar el làser amb el feix de llum incidint de forma directa en l'esternut i ubicar la càmera en el pla perpendicular i horitzontalment al feix de llum i a la direcció de les partícules d'aerosols expulsades per tal de poder observar nítidament la distribució d'aquestes en l'espai.

Per conèixer la longitud del tub amb la qual s'obté un flux completament desenvolupat, se sap que per a diferents nombres de Reynolds existeixen diverses relacions entre la longitud (L) i diàmetre (D) del tub, Taula 1, amb què s'obté el resultat esperat [18].

Taula 1. Relació entre longitud (L) i diàmetre (D) del tub segons nombre de Reynolds.

Nombre de Reynolds	L/D
4000	18
$10^4$	20
$10^5$	30
$10^6$	44
$10^7$	65
$10^8$	95

Per calcular el nombre de Reynolds segons les condicions de l'estudi, es treballa amb la densitat de l'aire, la viscositat de l'aire, el diàmetre del tub i amb una velocitat exagerada d'un esternut, per tal d'incloure possibles pitjors casos.

En la fórmula (1) la  $\rho$  és la densitat de l'aire, que en les condicions d'aquest treball equival a  $1,204 \text{ kg/m}^3$ . La  $v$  que trobem en el numerador representa la velocitat a la qual s'expulsa l'aire en un esternut. En aquest cas, per considerar casos extrems i estar segurs més endavant que la relació entre longitud i diàmetre és vàlida per a tots els possibles casos de l'estudi, s'ha usat una velocitat de  $30 \text{ m/s}$ . Per acabar amb el numerador, hi trobem el diàmetre del tub representat amb la lletra D. El tub emprat en aquest estudi presenta un diàmetre de  $2 \text{ centímetres}$  o  $0,02 \text{ metres}$ . Per altra banda, la viscositat de l'aire es representa com  $\nu$ , i en aquest estudi té un valor d'aproximadament  $1,5 \times 10^{-5} \text{ kg/(m*s)}$ .

Al fer el càlcul amb la fórmula (1), el nombre de Reynolds equival a  $48000$ . Tenint en compte el descrit en la Taula 1, es busca la relació per a nombres de Reynolds de fins a  $10^5$ .

Finalment, es veu per al cas en què es treballa en aquest estudi el factor  $L/D$  ha de ser equivalent a 30, (9).

$$30 = \frac{L}{D} \quad (9)$$

Tenint en compte que el diàmetre del tub és de 0,02 metres es dedueix que la longitud del tub usat en l'experiment ha de ser de 0,6 metres. Establerta la longitud requerida del tub i tenint en compte que el flux serà desenvolupat al final d'aquest, es col·loca el sensor en aquesta posició.

Per poder col·locar la tràquea es va considerar que l'opció més correcta era situar-la en una posició més elevada respecte al tub. Per aconseguir-ho, es necessitava poder connectar el tub per on passa el flux d'aire des del generador d'esternuts fins a la tràquea.

La primera opció que es va considerar va ser usar un colze per a obtenir un canvi de direcció en el flux i usar un tub vertical per a connectar-hi la tràquea. Després de realitzar diverses proves simulant esternuts, es va descartar aquesta configuració, ja que s'hi produïen pèrdues de flux. Així doncs, es va optar per una segona opció, en la qual es van connectar el tub i la tràquea utilitzant un tub de plàstic flexible, tal com s'observa en la Figura 27. Aquesta configuració permet la connexió entre tub i tràquea sense haver de fer un canvi bruscat de direcció com passava en el cas del colze i sense cap mena de pèrdua del flux de l'esternut.



Figura 27. Connexió entre la tràquea i el generador d'esternuts.

Aprofitant la imatge anterior, es pot observar com entre el tub i la tràquea s'hi ubica el cub negre, punt 4.1.2 del document. Aquest cub té 3 obertures, una inferior per la qual arriba el flux dels esternuts, una obertura superior que permet el pas del flux cap a la tràquea i un tercer forat en un dels laterals. Aquesta obertura lateral està connectada gràcies en un tub de plàstic flexible amb el nebulitzador.

Finalment, per poder mantenir la tràquea sostinguda en la posició adequada, tal com es pot veure en la imatge anterior, s'ha optat per crear una estructura amb diferents bigues que serveixen de suport a la tràquea a la vegada que la mantenen immòbil, Figures 28 i 29.



Figura 28. Estructura de suport de la tràquea.

En aquesta imatge, es pot observar amb més detall com és la connexió entre el nebulitzador i el cub de control, explicat en el punt 4.1.2 del document, que funciona com a regulador de partícules.

Finalment, després d'activar diverses vegades el generador d'esternuts i comprovar que amb aquesta configuració del muntatge no existeixen fugues, es posicionen tant la càmera com el làser segons les necessitats ja explicades del treball.

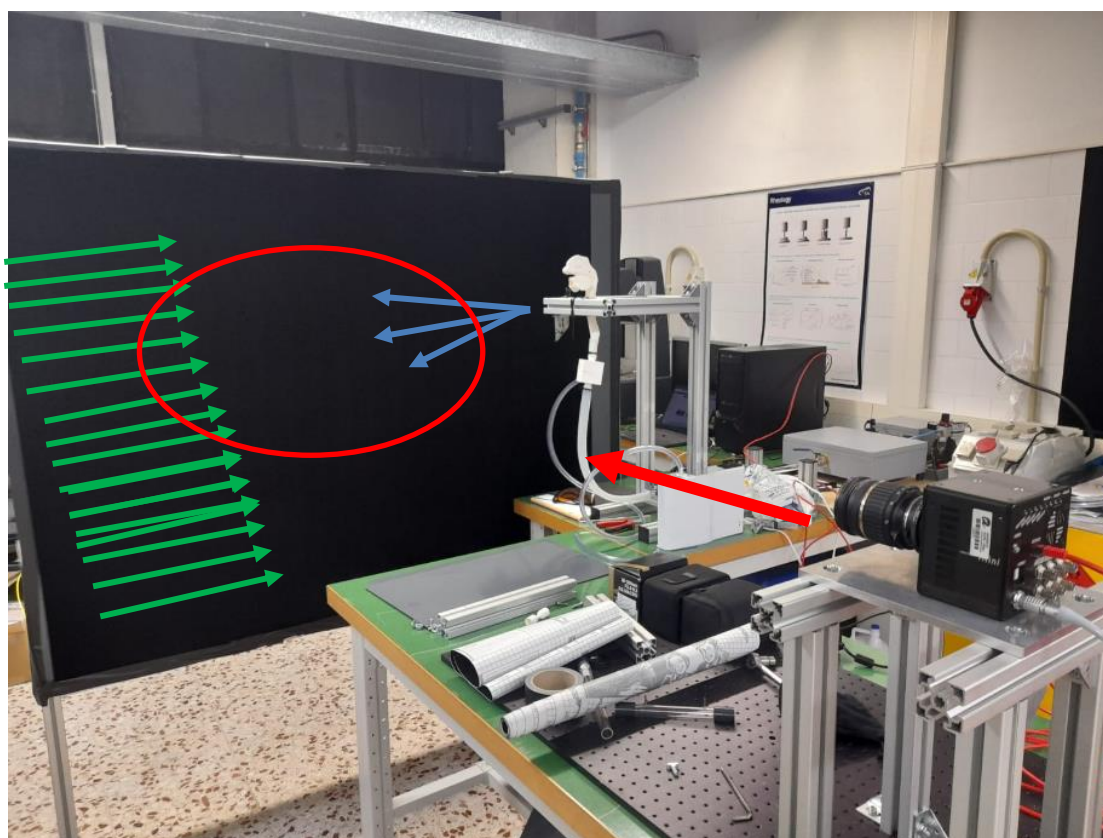


Figura 29. Distribució dels diferents equips en el laboratori per a l'execució de l'experiment.

En la imatge anterior, es veu com queden disposats els diferents dispositius en el laboratori. Tot i que no es veu en aquesta imatge, el làser incideix frontalment sobre la tràquea, en la Figura 29 es veu representat per color verd el làser i en color blau com seria la sortida de partícules en l'esternut. D'aquesta manera i, ubicant la càmera de la forma en què s'observa en la imatge anterior, s'aconsegueix abastar el major camp visual possible per observar la distribució de les partícules que seran il·luminades pel feix de llum. Aquest camp visual és on enfoca la càmera, i està representat en el cercle vermell.

Per tal que la càmera capti tan sols les partícules il·luminades i no tinguem cap mena de contaminació lumínica s'han tapat amb cartó negre totes les finestres, s'ha ubicat una pantalla de color negre que fa de fons en les imatges de la càmera i, s'ha de tenir en compte que el llum del laboratori ha d'estar apagat en el moment en què es volen captar imatges.

Com a última consideració, els conductes de ventilació han sigut tapats per evitar així que la distribució de les partícules es pogués veure afectada per corrents externs.

Un cop l'estructura està muntada i abans de realitzar les proves per obtenir s'ha calibrat el sensor amb què es mesura el gradient de pressió. Per aconseguir-ho, s'ha usat el generador de flux del qual es disposa en la universitat, Figura 30.



Figura 30. Generador de flux de la universitat usat.

Amb aquest, ha sigut possible generar un flux regulat i mesurar amb precisió un valor conegut. Gràcies en això, es pot determinar amb precisió la diferència entre la sortida real del sensor i el valor anticipat, essent capaços de desenvolupar els paràmetres i coeficients de calibratge necessaris per fer coincidir les mesures del sensor amb els valors reals i així obtenir resultats precisos i fiables.

S'han utilitzat diferents cabals generats per la màquina per tal d'aconseguir una gran varietat de valors i poder usar-los per un correcte calibratge del sensor. Els valors de gradient de pressió, es varen guardar i tractar amb un Excel, Annex I, per després poder calcular en Matlab la seva línia de regressió i comparar-la amb la regressió teòrica esperada per tal de saber si el sensor estava ben calibrat o no.

Per tal de tractar tot el conjunt de dades en Matlab, primer es calcula la mitja dels valors presos en les diferents combinacions. Aconseguits els resultats, es fa la mitja de les repeticions per tal d'assolir el valor final de gradient de pressió, Figura 31, que s'usarà en Matlab per presentar un gràfic comparant la regressió de les mesures preses pel sensor i la regressió teòrica.

5839,73682	5853,72266	5833,92725	5794,74219	5882,63379		69,1049805	69,5878906	70,6938477	70,3881836	70,25		1811,24854	1817,02197	1831,23584	1812,67969	1810,19238
		5840,95254						70,0049805							1816,47568	

Figura 31. Exemple del càlcul de la velocitat mitjana per a cada cas.

El programa de Matlab, calcula la caiguda de pressió  $\Delta P$  en el tub, de forma teòrica, i representa la línia de tendència vers la línia que representa els valors experimentals.

El primer que es realitza en el codi és dimensionar el tub. Cal destacar, que en aquest cas es considera la longitud del tub,  $L$ , de 0,1 metres, ja que és la distància entre els dos punts on es col·loquen el sensor. Es defineixen també les característiques del flux que mesura el sensor, en aquest cas la viscositat i densitat de l'aire.

```
mu = 1.516*10^-5; %m^2/s
density = 1.204; %kg/m^3

%Dimensions

D = 0.016; %m
L = 0.1; %m
A = pi*D^2/4; %m^2
```

Figura 32. Característiques del flux i dimensionem el tub en el codi.

En els següents passos, es calculen la velocitat mitjana del flux, el nombre de Reynolds,  $Re$ , i el coeficient de fricció,  $f$ . Amb aquestes dades, es pot calcular el gradient de pressió teòric que hauríem d'observar en el tub, tal com es veu en l'última línia de codi de la Figura 33.

```
cm = [0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006]; % kg/s
uavg = cm/(density*A);

Re = uavg*D/mu;

%Friction factor

f = ([0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2]);
l = zeros([6 5]);
for i=1:10
    l(i+1,1:6) = -2*log10(2.51./(Re*sqrt(f(i))));
    f(i+1,1:6) = (1./l(i+1,1:6)).^2;
end
f = ([f(11,1:6)]);

%DeltaP

DeltaP = f.*L/D.*uavg.^2/2*density;
```

Figura 33. Càlcul teòric del gradient de pressió del flux en el tub.

Un cop s'han calculat els gradients de pressió teòrics del flux es pot representar la regressió juntament amb els resultats reals obtinguts en l'Excel. Veiem en la figura 34 ,com les dues línies segueixen un patró pràcticament idèntic amb molt poca variació, el que significa que el sensor està correctament calibrat.

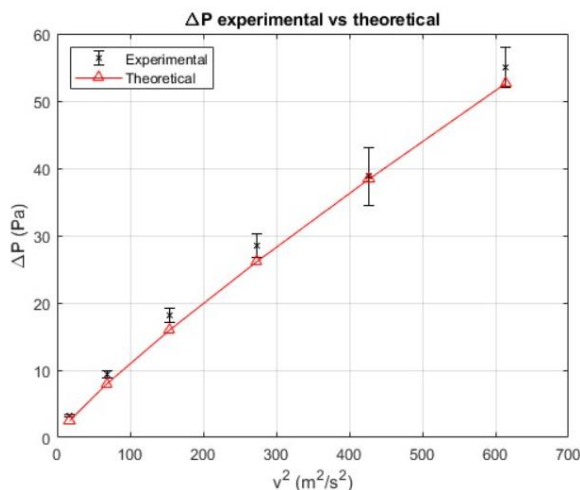


Figura 34. Comparació de les mesures experimentals i les dades teòriques per calibrar el sensor.

#### 4.2.2 Inici de les proves experimentals

Finalitzats els passos previs es pot iniciar amb les primeres proves. El primer pas en començar els experiments és poder definir un rang de paràmetres òptims on els resultats obtinguts s'assimilïn a la gràfica que es vol obtenir, la Figura 1 d'aquest document.

Tal com s'ha explicat anteriorment en el punt 4.1.6.1 del document, els resultats s'aconsegueixen usant un codi de Matlab que calcula el cabal volumètric, temps de pujada i temps final de l'esternut. Aquestes variables es veuen determinades pels tres paràmetres d'entrada al generador d'esternuts: angle, pressió i temperatura.

Per poder determinar el rang de paràmetres es van realitzar nombrosos tests. Inicialment, es va tractar de comprovar com afectaven les diferents combinacions d'angle i pressió, així que es varen introduir a la màquina valors d'angles petits, mitjans i grans que es van provar amb valors elevats, mitjans i més reduïts de pressió, tractant d'analitzar totes les possibilitats.

Els primers tests es van dur a terme fent ús de paràmetres situats en ambdós extrems, és a dir, combinacions d'angle i pressió molt elevades i molt petites. Així s'aconseguia ràpidament poder veure possibles factors limitants.

##### 4.2.2.1 Tests amb angles petits

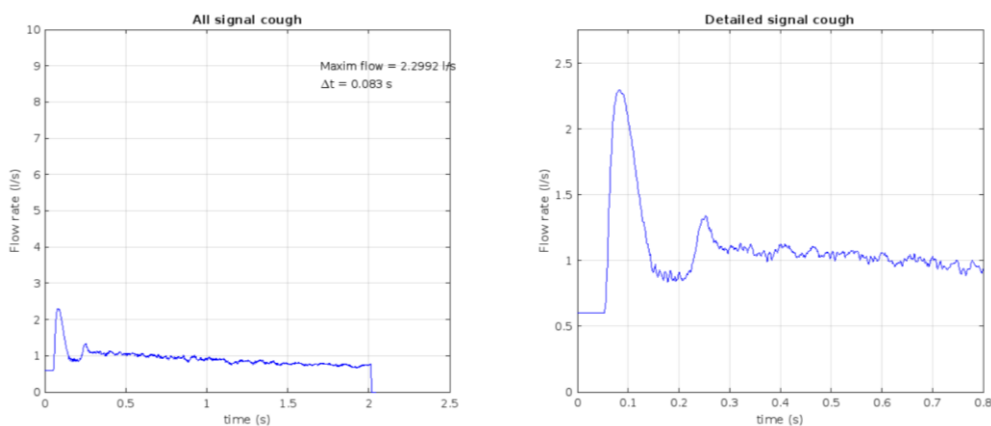


Figura 35. Pressió 300hPa i angle 19 graus.

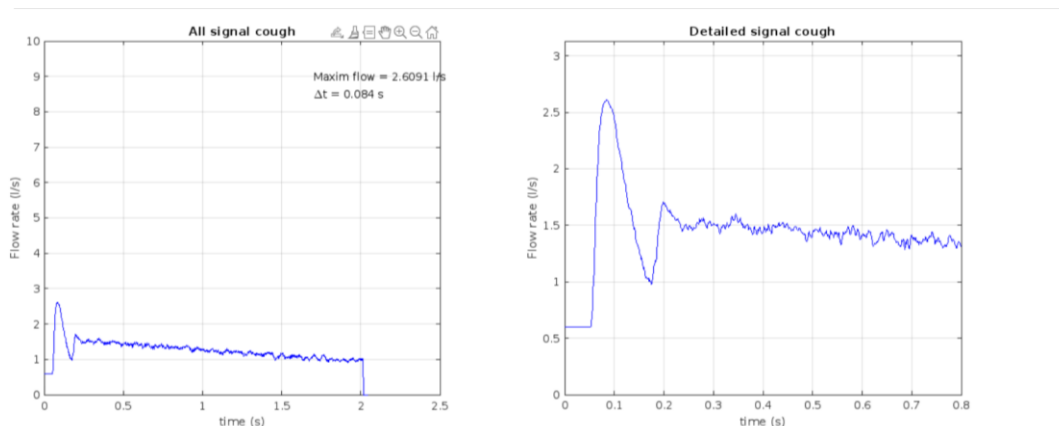


Figura 36. Pressió 600 hPa i angle 19 graus.

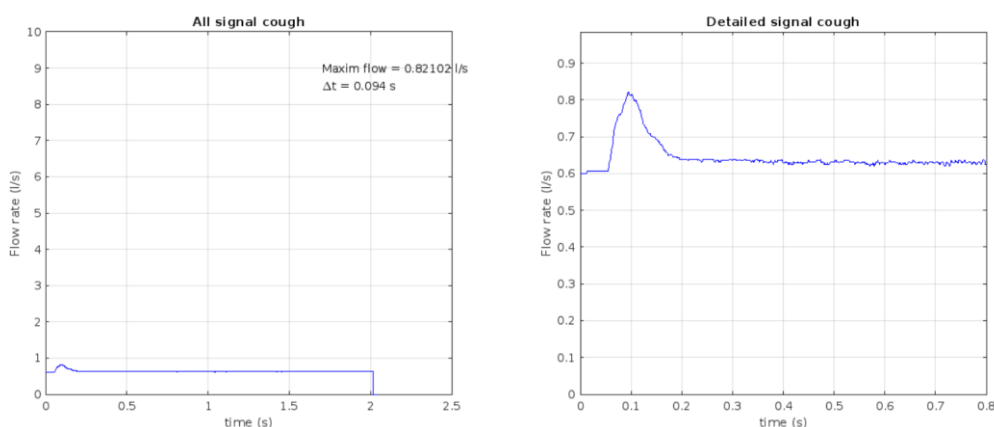


Figura 37. Pressió 1000 hPa i angle 11 graus.

Com es pot observar en les gràfiques anteriors, els valors obtinguts amb angles exageradament petits, usant tota mena de pressions d'entrada, disten molt de la gràfica esperada. Per tant, es va optar per descartar l'ús d'angles molt petits.

En el següent pas es varen realitzar el mateix tipus de proves però amb angles més elevats per tal de poder conèixer el comportament de la màquina.

#### 4.2.2.2 Tests amb angles grans

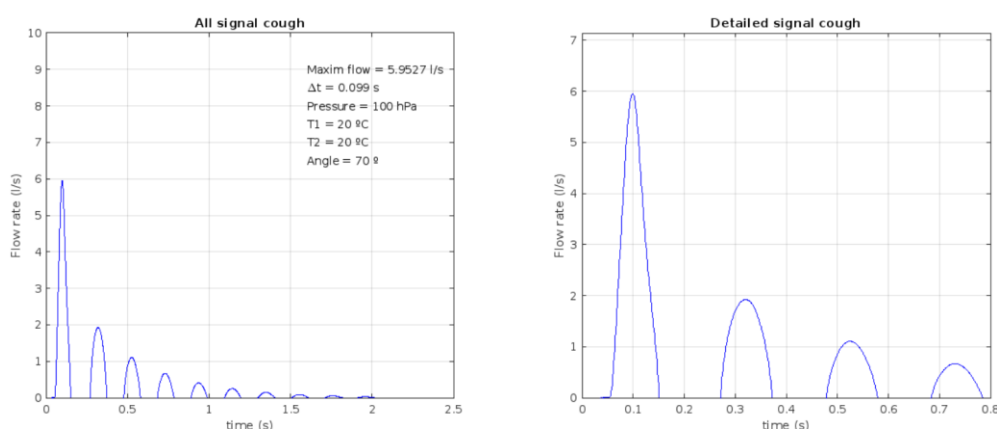


Figura 38. Pressió 100 hPa i angle 70 graus.

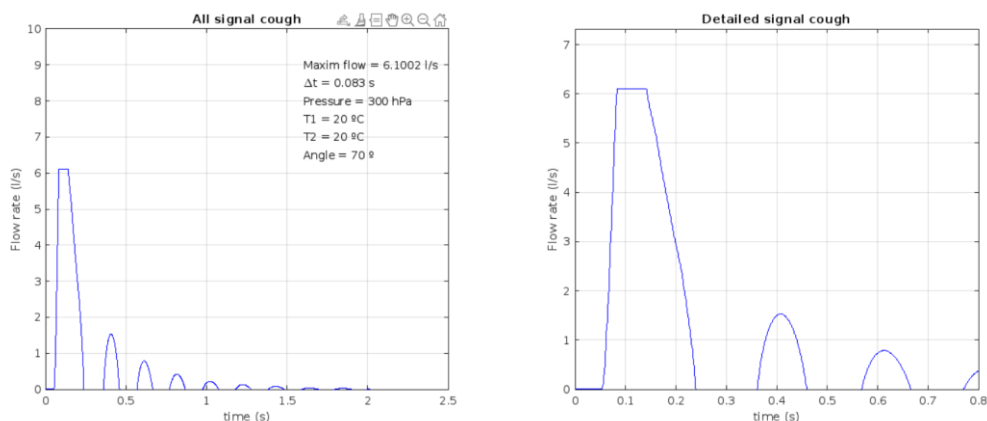


Figura 39. Pressió 300 hPa i angle 70 graus.

Tan sols amb provar les pressions més petites es van poder descartar ràpidament els valors més elevats d'angle, obertura més gran, ja que tal com es veu en les imatges superiors les gràfiques obtingudes presenten un comportament molt llunyà a l'esperat. Cal afegir, que tal com es pot observar, Figura 39, el primer pic no s'ha pogut enregistrar correctament i durant un petit temps el màxim correspon a un mateix valor.

Això, es deu a la impossibilitat del sensor de captar gradients de pressió que comportin valors de cabal volumètric massa elevats. Cal tenir en compte aquest fet, ja que en futures proves això pot ser un factor limitant en l'experiment, pel fet que no es podran mesurar cabals superiors a valors propers a 6 L/s.

#### 4.2.2.3 Tests amb valors d'angle entremitjos

Un cop se sap que els valors extrems d'angle no són òptims per al nostre experiment, cal saber quins valors de pressió podem usar tenint en compte que s'utilitzaran valors d'angle entremig del rang inicial.

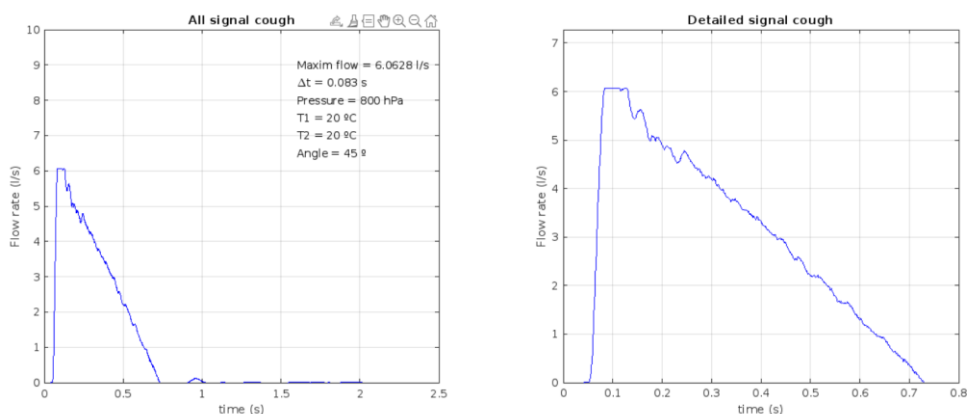


Figura 40. Pressió 800 hPa i angle 45 graus.

En la imatge anterior, s'observa que els valors de pressió molt alts influeixen negativament en els resultats. D'aquesta manera, es va descartar l'opció d'usar-los.

Tot i això, en la gràfica, Figura 40, es pot començar a intuir una forma de la corba més similar a la gràfica desitjada que no pas els resultats obtinguts fins aquell moment, fet que indica que no estem lluny d'entrar en el rang de paràmetres òptims.

Per tal de verificar aquesta hipòtesi, es va provar aquest mateix angle amb una pressió inferior que en el nivells anterior.

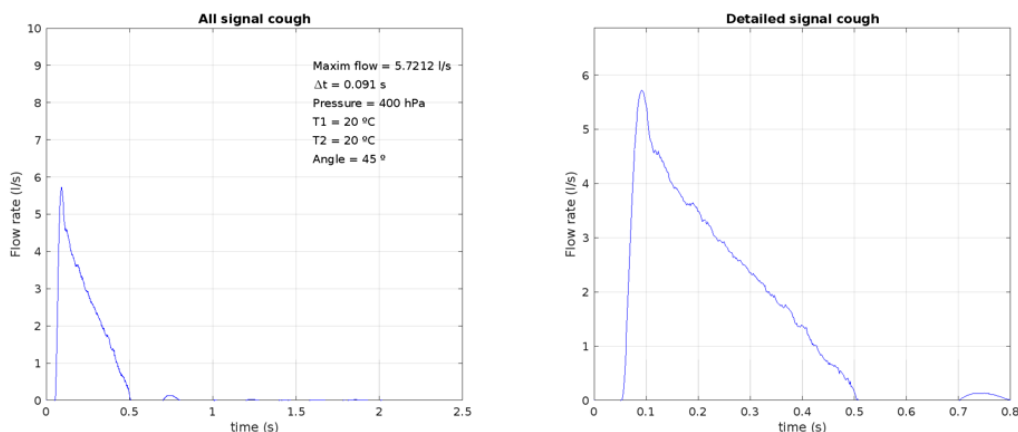


Figura 41. Pressió 400 hPa i angle 45 graus.

En aquest últim test, s'observa com el gràfic obtingut és similar als que es presenten en l'estudi de Gupta et al. [4], que es fa servir de referència. Tenint en compte aquests resultats, es pot deduir que la combinació de paràmetres òptima es troba en els valors entremig. Així doncs, el següent pas és acotar el rang de paràmetres de la forma més precisa en què sigui possible.

Per aconseguir-ho, es van realitzar més tests amb combinacions de paràmetres que comprenien valors d'angle d'entre 30 a 60 graus i pressions d'entre 100 i 600 hPa.



Figura 42. Pressió 300 hPa i angle 30 graus.

Tal com es presenta en la Figura 42, un angle de 30 graus no és òptim, ja que després del pic màxim a l'inici la gràfica pateix un petit rebot on el valor del cabal baixa dràsticament per posteriorment tornar a pujar en comptes de mantenir una baixada més controlada i homogènia, tal com es veu en les dues figures a continuació que es van obtenir usant combinacions de paràmetres que si són òptimes.

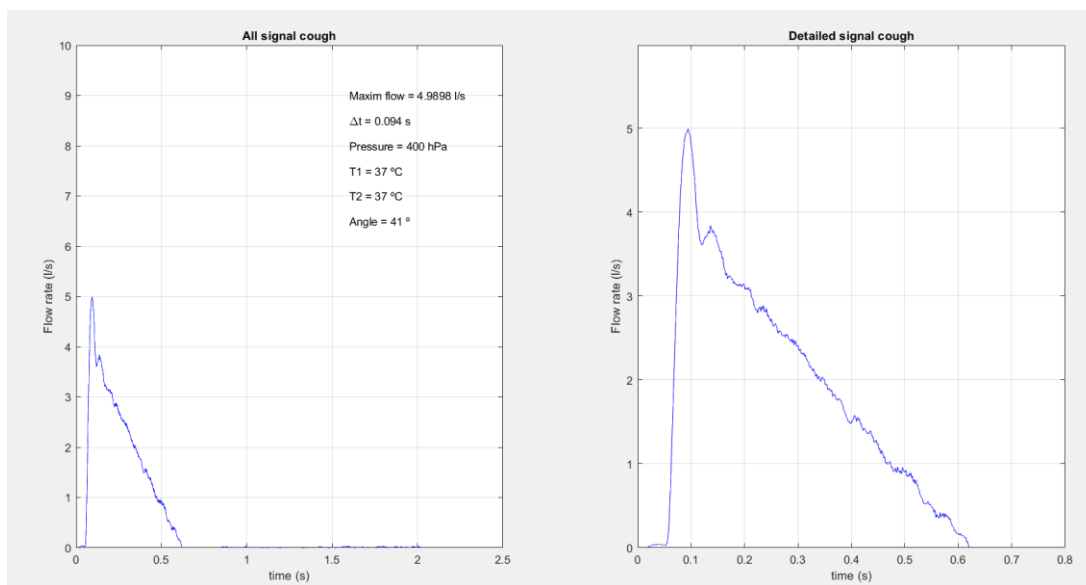


Figura 43. Pressió 400 hPa i angle 41 graus.

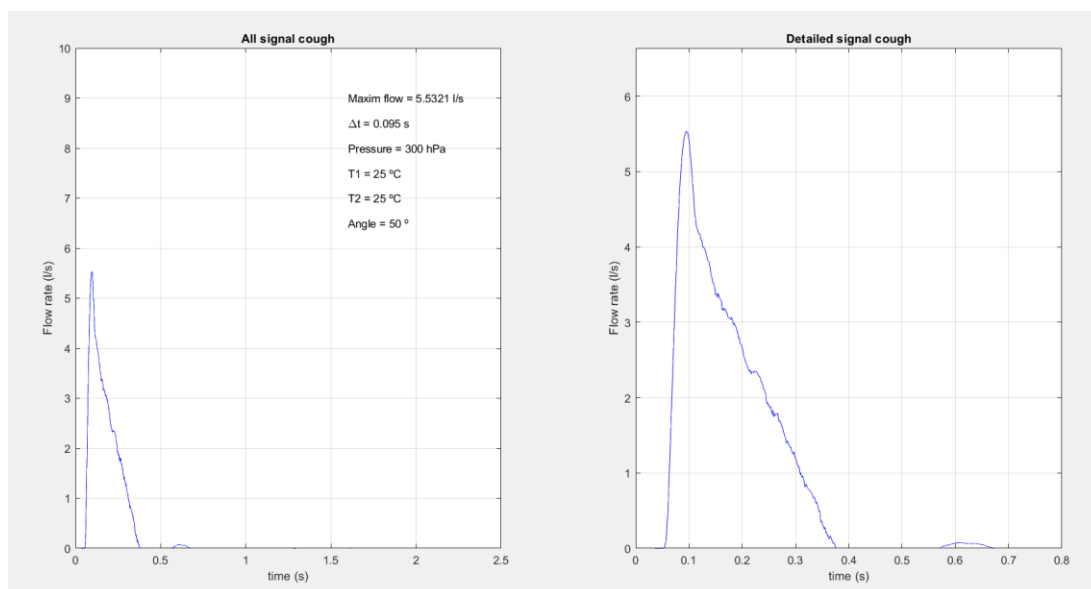


Figura 44. Pressió 300 hPa i angle 50 graus.

Un cop realitzats els tests, es va concloure que el rang òptim de paràmetres per l'angle era entre els 36 i 55 graus, mentre que per la pressió els valors òptims eren entre 100 i 500 hPa. A pesar d'això, cal destacar que la combinació d'alguns d'aquests valors no és òptima, ja que amb els valors més petits d'angle i pressió (36 graus d'angle combinats amb entre 100 i 200 hPa de pressió) o amb la combinació de valors elevats d'angle i pressió (entre 50 i 55 graus d'angle combinats amb valors d'entre 300 i 500 hPa de pressió) els gràfics obtinguts no són correctes.

Definit el rang de paràmetres òptim per l'estudi cal conèixer l'afectació de la temperatura que introduïm en el generador d'esternuts per acabar de definir les combinacions de paràmetres que s'usaran en l'estudi. Per les proves fetes fins aquest punt, se sap que qualsevol modificació d'angle o pressió fa variar els resultats aconseguits, però fins en aquest moment no s'ha tingut en compte la temperatura.

Per tal de conèixer com afecta la temperatura en l'estudi, es va decidir fer diversos tests amb combinacions d'angle i pressió iguals per diferents temperatures, Taula 2. Un cop

finalitzades i, analitzant els resultats, es pot saber si la temperatura que s'introdueix a la màquina té gran significança en els resultats o en cas contrari, la podem negligir en l'experiment.

Taula 2. Resultats obtinguts en l'estudi per comprovar com afecta la temperatura als resultats.

Temperatura (°C)	Angle (graus)	Pressió (hPa)	Cabal Volumètric (L/s)	Temps de pujada (s)	Temps final (s)
22	36	300	3,528	0,040	0,62
22	36	400	3,709	0,042	0,73
22	36	500	3,765	0,042	0,95
22	41	300	4,321	0,043	0,43
22	41	400	4,513	0,043	0,5
22	41	500	4,717	0,042	0,57
22	45	300	4,606	0,045	0,37
22	45	400	4,831	0,043	0,46
22	45	500	5,039	0,045	0,51
30	36	300	3,235	0,042	0,65
30	36	400	3,349	0,040	0,85
30	36	500	3,556	0,042	0,95
30	41	300	3,860	0,044	0,48
30	41	400	4,062	0,043	0,56
30	41	500	4,237	0,044	0,65
30	45	300	4,454	0,044	0,36
30	45	400	4,693	0,046	0,43
30	45	500	4,928	0,045	0,52
37	36	300	3,267	0,043	0,65
37	36	400	3,472	0,043	0,81
37	36	500	3,575	0,045	0,92
37	41	300	3,909	0,043	0,47
37	41	400	4,144	0,044	0,57
37	41	500	4,360	0,043	0,65
37	45	300	4,591	0,045	0,38
37	45	400	4,763	0,046	0,45
37	45	500	5,010	0,045	0,53

Tal com es veu en la taula superior, es van usar combinacions de 36, 41 i 45 graus d'angle juntament amb 300, 400 i 500 hPa de pressió. Es va repetir cada un dels tests amb un valor de temperatura diferent. Aquests valors eren 22°C, la temperatura ambient en aquell moment, 30°C i 37°C, la temperatura aproximada a què es troba el cos humà.

Els resultats obtinguts es van tractar amb Matlab per a poder conèixer si la temperatura variava els resultats obtinguts. Es va estudiar la desviació estàndard d'aquests resultats, Figures 45, 46, 47 i Taula 3, per confirmar que la temperatura no tenia pràcticament influència en la sortida i, per tant, no s'havia de considerar en l'estudi.

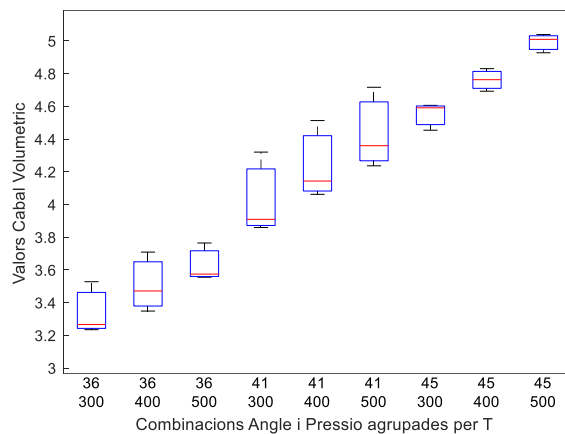


Figura 45. Boxplot per observar la desviació del cabal volumètric.

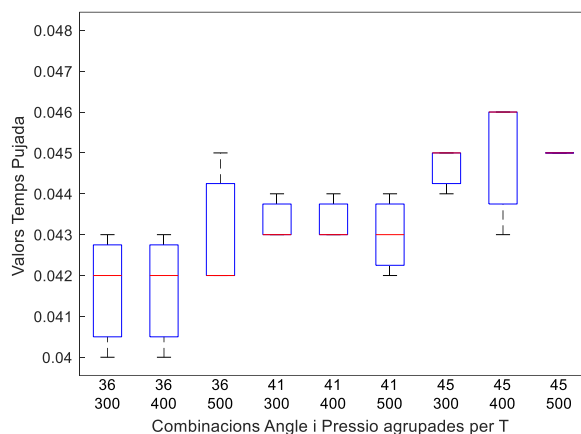


Figura 46. Boxplot per observar la desviació del temps de pujada.

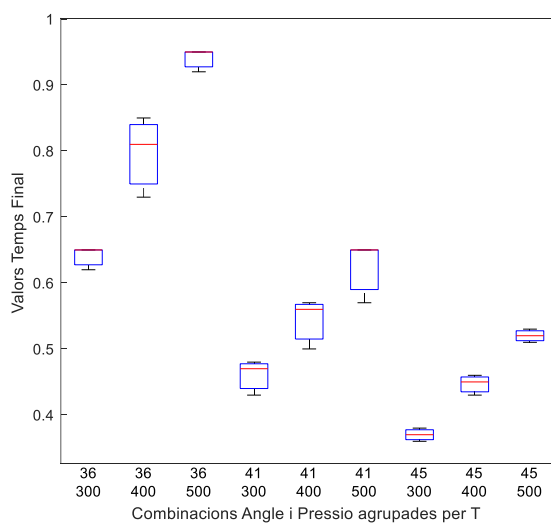


Figura 47. Boxplot per observar la desviació del temps final.

Taula 3. Desviació estàndard segons la temperatura de cada una de les combinacions.

Angle (graus)	Pressió (hPa)	Desviació estàndard del Cabal Volumètric	Desviació estàndard del Temps de pujada	Desviació estàndard del Temps final
36	300	0,161	0,002	0,017
36	400	0,183	0,002	0,061
36	500	0,116	0,002	0,017
41	300	0,253	0,001	0,026
41	400	0,240	0,001	0,038
41	500	0,249	0,001	0,046
45	300	0,084	0,001	0,010
45	400	0,069	0,002	0,015
45	500	0,058	0,000	0,010

Tenint en compte aquests resultats, en què es va descartar l'ús de la temperatura com paràmetre d'entrada en l'estudi, es van definir les combinacions de paràmetres òptimes per dur a terme les proves en aquest treball, Taula 4.

Taula 4. Combinacions de paràmetres d'entrada que s'estudiaran en l'experiment.

Angle (graus)	Pressió (hPa)
36	300
36	400
36	500
41	100
41	200
41	300
41	400
41	500
45	100
45	200
45	300
45	400
45	500
50	100
50	200
50	300
50	400
50	500
55	100
55	200

Per cada una d'aquestes combinacions de paràmetres d'entrada es varen realitzar 5 repeticions del test. D'aquesta manera s'aconseguen suficients dades per assegurar la distribució que segueixen les diferents variables de sortida i, poder observar possibles desviacions en una mateixa combinació.

Fets tots els tests i obtingudes les dades de l'estudi, el primer que es fa és tractar els resultats per veure la desviació estàndard de les 5 repeticions de cada combinació d'entrada, Taula 4.

Taula 5. Desviació estàndard de les 5 repeticions fetes per cada combinació.

Angle (graus)	Pressió (hPa)	Desviació estàndard del Cabal Volumètric (L/s)	Desviació estàndard del Temps de pujada (s)	Desviació estàndard del Temps final (s)
36	300	0,117	0,001	0,031
36	400	0,132	0,001	0,066
36	500	0,094	0,002	0,054
41	100	0,043	0,001	0,069
41	200	0,033	0,001	0,009
41	300	0,183	0,000	0,026
41	400	0,171	0,001	0,029
41	500	0,179	0,001	0,034
45	100	0,019	0,000	0,007
45	200	0,046	0,001	0,009
45	300	0,072	0,001	0,008
45	400	0,082	0,001	0,025
45	500	0,056	0,001	0,021
50	100	0,036	0,001	0,008
50	200	0,010	0,001	0,004
50	300	0,022	0,001	0,007
50	400	0,029	0,001	0,011
50	500	0,006	0,001	0,016
55	100	0,047	0,000	0,004
55	200	0,035	0,001	0,005

Analitzant les petites desviacions obtingudes en els tests, es va confirmar que totes les dades obtingudes eren significatives i útils per al desenvolupament d'un model predictiu. Seguidament, es va calcular la mitja de les diferents repeticions per comprovar si el conjunt de dades seguia una distribució normal. Per altra banda, es va tractar d'analitzar gràficament possibles relacions entre la sortida i les combinacions d'entrada que fessin més senzill el desenvolupament del model predictiu.

Per confirmar que les dades segueixen una distribució normal es va optar per dos procediments diferents. El primer va ser visualitzar gràficament els resultats analitzant les seves distribucions, amb el codi explicat anteriorment en el punt 4.1.6.2 d'aquest document. La segona prova va ser realitzar un test de Lilliefors, [18],[19], per a cada una de les diferents variables de sortida.

```
Test de Lilliefors per a CABAL VOLUMETRIC:
H0: Les dades segueixen una distribucio normal (p >= 0.05)
H1: Les dades no segueixen una distribucio normal (p < 0.05)
Valor p: 0.5
No es pot refusar la hipotesis nula. Les dades segueixen una distribucio normal.
```

Figura 48. Exemple de test de Lilliefors per al cabal volumètric.

Després de confirmar que les 3 variables de sortida segueixen una distribució normal es va comprovar gràficament possibles relacions entre les variables d'entrada i les variables de sortida.

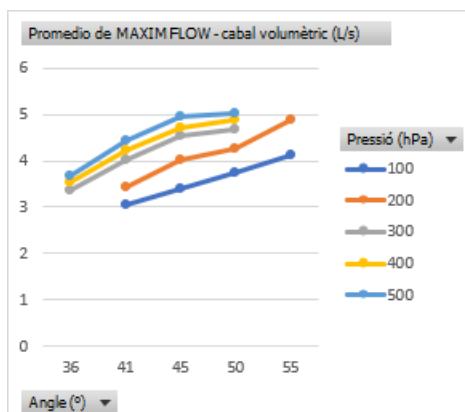


Figura 49. Relació entre els valors obtinguts de cabal volumètric i la combinació de paràmetres d'entrada.

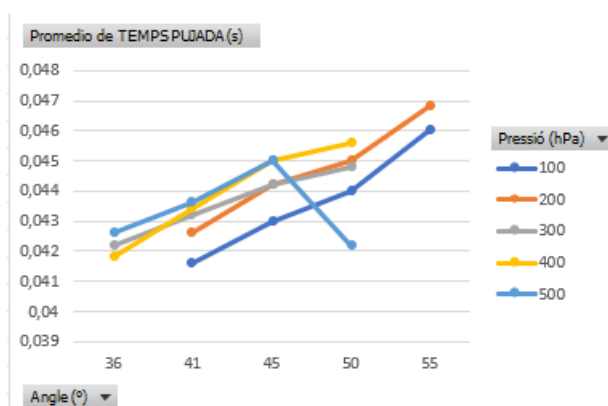


Figura 50. Relació entre els valors obtinguts del temps de pujada i la combinació de paràmetres d'entrada.

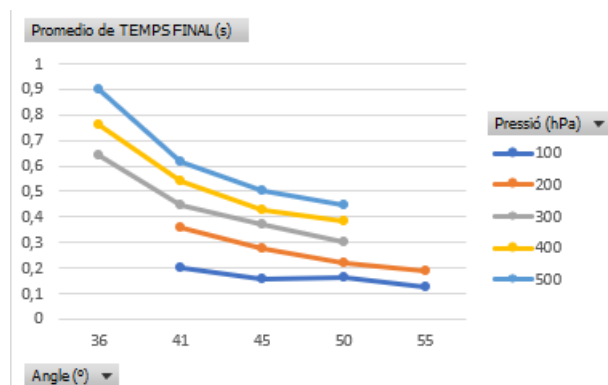


Figura 51. Relació entre els valors obtinguts del temps de pujada i la combinació de paràmetres d'entrada.

En les 3 figures superiors observem com la relació entre les combinacions de paràmetres d'entrada, angle i pressió, i la variable de sortida, ja sigui el cabal volumètric, el temps de pujada o el temps final, és una relació pràcticament lineal. Per al cas del cabal volumètric i del temps de pujada veiem com a mesura que augmenta la pressió i incrementem el valor d'angle els valors de sortida també augmenten. En el cas del temps final el comportament és al contrari, a major obertura d'angle més curta és la durada de l'esternut.

Cal destacar que en la Figura 50, per al valor d'angle 50 graus i pressió 500 hPa, trobem un valor que dista de la línia de tendència. Per aquest motiu, es varen fer diverses mesures, però el valor no canviava. S'ha arribat a la conclusió que aquest valor és degut a l'augment del gradient de pressió que ha de mesurar el sensor en usar aquesta combinació de paràmetres d'entrada, ja que estem treballant al límit del nostre rang de paràmetres òptim i, aquest fet provoca que la mesura del sensor pugui no ser tan precisa.

### 4.2.3 Models de predicció

En observar aquestes relacions entre l'entrada i la sortida es va decidir testar 3 models de predicció diferents, per tal d'analitzar els seus resultats i finalment, treballar amb el més precís pel nostre experiment.

Els 3 models de predicció inicials varen ser un model de regressió lineal, un arbre de decisió i una xarxa neuronal artificial.

#### 4.2.3.1 Model de regressió lineal

Els models de regressió lineal són eines estadístiques que permet la predicció d'un valor de resposta a partir d'un conjunt de valors d'entrada assumint una relació lineal entre variables predictoras i la resposta.

D'aquesta manera, es tracta d'ajustar una línia recta que representi la relació entre el que serà la sortida (variable predictoras) i l'entrada (variables de resposta) del nostre estudi. Per això, l'equació general d'un model de predicció és la següent:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (10)$$

Y representa la variable de resposta, mentre que els valors  $X_1$ ,  $X_2$ , etc. corresponen a les variables predictoras. Per altra banda,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ , etc. Són els coeficients de regressió i representen la influència de cada variable predictoras a la qual van associada.

Amb un model de regressió lineal, es pot ser capaç tant de predir variables de resposta com d'analitzar possibles relacions causals, punt que pot ser aplicat en l'estudi per tal d'observar diverses relacions entre entrades i sortides tal com s'ha fet anteriorment amb els gràfics dels valors obtinguts, Figures 49, 50 i 51.

Per aplicar aquest tipus de regressió existeixen diversos models en Matlab, però per al nostre estudi s'ha usat la funció *fitlm*. Aquest model basat en regressió lineal permet trobar una relació entre la sortida desitjada i els paràmetres d'entrada que es volen predir tenint en compte els diferents coeficients de l'equació (10).

A més, basant-nos en una regressió lineal tenim la possibilitat de treballar amb el *Regression Learner* de Matlab, una eina molt potent a l'hora de desenvolupar models, ja que permet crear diferents taules d'entrenament i de test a partir de les dades originals ràpidament. Aquesta eina, també permet analitzar les diferents relacions entre les variables predictoras i els coeficients de cada una d'aquestes.

En treballar amb models basats en regressió lineal, l'objectiu és poder fer la predicció utilitzant una equació de la regressió que acoti al màxim possible els valors que es fan servir per a l'entrenament del model, tal com es veu en l'exemple a continuació.

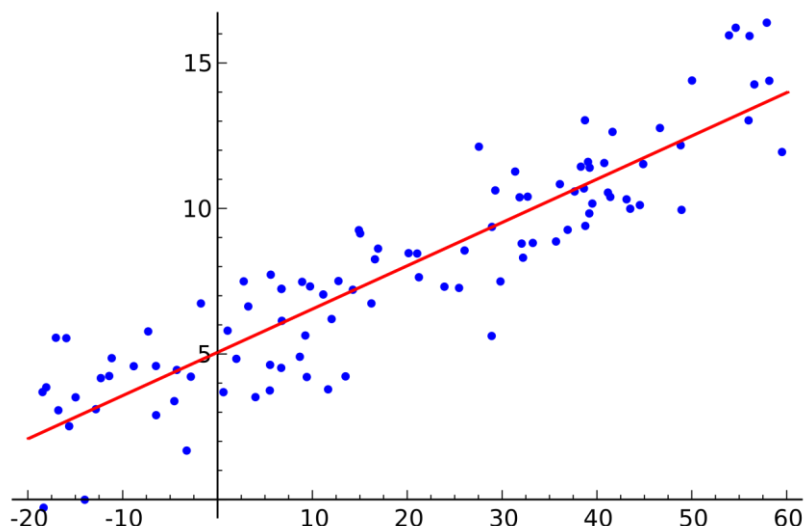


Figura 52. Exemple de càlcul de la regressió lineal d'un conjunt de dades, [20].

#### 4.2.3.2 Arbres de decisió

Els models basats en arbres de decisió tracten les dades d'una forma que esquemàticament s'assimila un arbre. Cada node intermedi, d'on surten dues branques, representa una condició que han de complir les branques que surten d'aquell punt, cada branca fa referència a una resposta en aquella condició, mentre que les fulles representen la predicció.

En l'estudi, tot i que s'ha utilitzat per provar i comparar els resultats obtinguts amb altres models, aquest no sembla inicialment ser el model més adient pel nostre cas, ja que es basa més en les condicions de les variables que no pas en obtenir una regressió entre aquestes.

Per aconseguir prediccions basades en aquest model, s'ha usat la funció *fitrtree* de Matlab. Aquesta funció crea un arbre de regressió a partir d'iterar repetitivament dividint el conjunt de dades segons les característiques per minimitzar la variància de les fulles, és a dir dels resultats assolits, Figura 53.

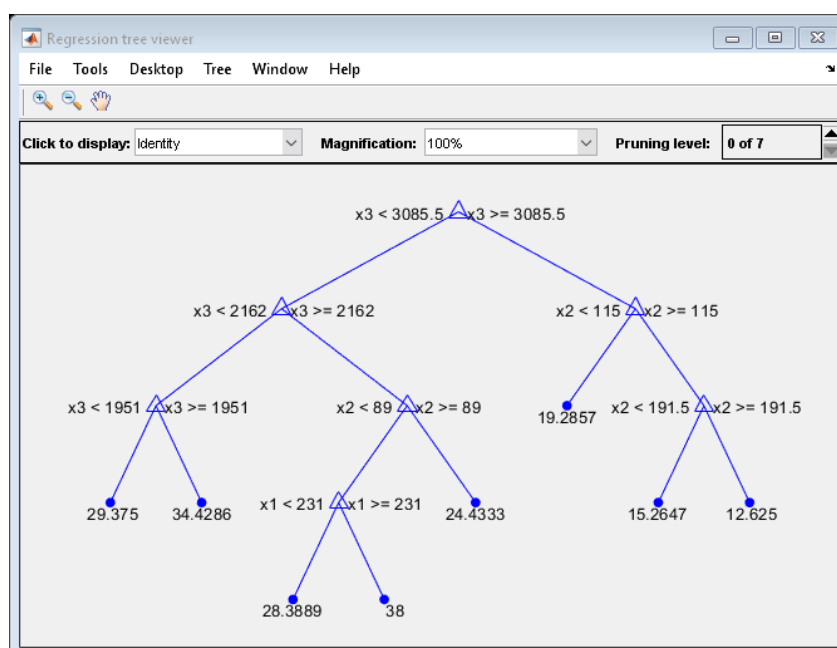


Figura 53. Representació esquemàtica del funcionament d'un model de predicció, [21].

#### 4.2.3.3 Xarxa neuronal artificial

Les xarxes neuronals artificials, també conegudes com a ANN, són models de predicció inspirats en l'estructura i funcionament de xarxes neuronals biològiques com el cervell humà. D'aquesta manera, una xarxa neuronal està formada per diverses capes de neurones interconnectades. Hi ha una capa d'entrada, diferents capes ocultes i una capa de sortida. En cada capa s'hi troben els nodes, simulen ser les neurones del cervell, que processen la informació i es connecten entre si representat pesos.

Les xarxes neuronals basen el seu funcionament en Forward Propagation, on les dades d'entrada, és a dir la informació, avança a través de les diferents capes de la xarxa fins a arribar a la sortida. Per poder calcular l'error de les prediccions els models ANN usen la Backpropagation, on es calcula la contribució de cada un dels pesos, és a dir de les connexions, en l'error total per poder ajustar-los i tractar de minimitzar l'error de la predicció. Així doncs, en cada iteració que es produeix durant l'entrenament del model hi trobem un moviment de Forward Propagation i, després, Backpropagation per ajustar el model.

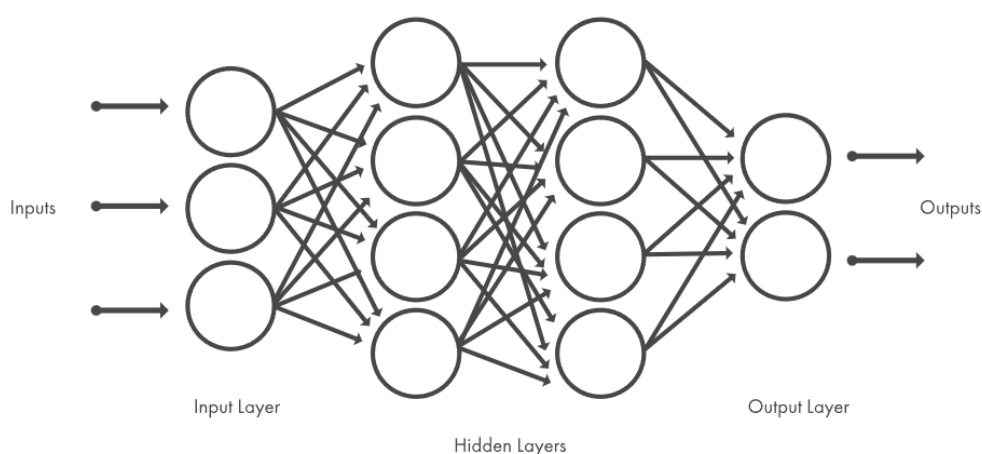


Figura 54. Estructura d'una xarxa neuronal, [22].

Alguns dels principals avantatges d'aquests tipus de models són la capacitat d'aprendre les relacions no lineals que trobem en les dades, la seva tolerància al soroll o la capacitat per generar grans conjunts d'entrenament. Tot això, però, requereix també majors quantitats significatives de dades d'entrenament, el que implicaria fer més proves en el nostre estudi i, un major cost computacional que no pas altres models.

En l'estudi, s'ha usat la funció *fitnet* de Matlab com a model de predicció basat en ANN. Aquesta funció permet crear una xarxa neuronal amb un nombre de capes ocultes escollit per l'usuari. Es recomana el seu ús per tasques de regressió i reconeixement de patrons, fet pel qual és interessant provar-la en l'estudi. Per entrenar aquesta xarxa s'utilitza l'algoritme de Levenberg-Marquardt, [23], el qual modifica els pesos de les connexions de la xarxa per reduir el possible error en la predicció.

#### 4.2.4 Resultats dels models de predicció

Un cop desenvolupats els codis per a fer ús dels 3 tipus de models predictius mencionats anteriorment, cal fer les proves adients i comparar els resultats obtinguts per a poder escollir quin dels tres és més adequat. Cal destacar, que a priori els models més adequats són el model de regressió lineal, que usa la funció *fitlm*, i el model basat en una xarxa neuronal, que usa la funció *fitnet*, en Matlab.

Per testar els models s'ha fet us de la mateixa base de dades per als tres, la qual és el conjunt de dades aconseguïdes en completar les diferents combinacions de la Taula 3, tenint en compte que s'han fet 5 repeticions per cada una de les combinacions i, per tant, la base de dades compta amb 100 resultats.

Les proves fetes per la comparació dels models de predicció s'han basat en dos tipus.

En primer lloc, s'introdueixen uns paràmetres d'entrada (angle i pressió) aleatoris a la màquina per tal d'obtenir els valors de sortida. Aquests valors són els que s'indiquen al programa de Matlab perquè el model predictiu indiqui els valors d'entrada que s'haurien d'utilitzar. En cas que els models fossin perfectes i no tinguessin cap mena d'error, els valors predits han de ser els mateixos que s'han indicat inicialment a la màquina de forma aleatòria.

Un exemple d'aquesta prova és el següent:

S'introdueixen a la màquina una pressió de 400 hPa i un angle de 46 graus. Amb aquesta combinació s'assoleix la següent sortida, Figura 55.

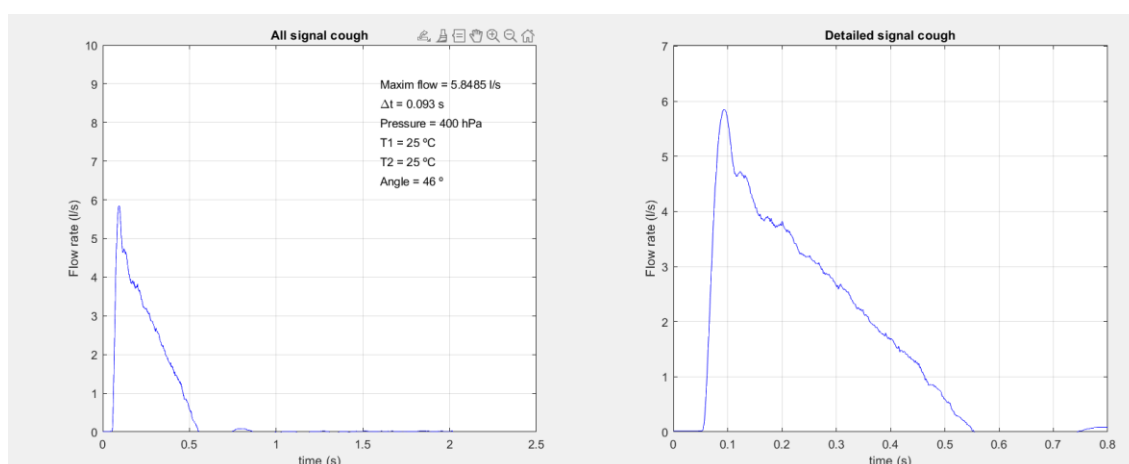


Figura 55. Sortida obtinguda en fer el test amb una pressió de 400 hPa i un angle de 46 graus.

Els valors de sortida obtinguts són un cabal volumètric de 5,8485 (L/s), un temps de pujada de 0,043 (s) i un temps final de 0,5 (s). Per tant, s'indiquen aquestes dades en la finestra GUI de cada un dels models, Figura 25, i s'aconsegueixen les següents prediccions.

Taula 6. Resultats obtinguts ens les prediccions comparats amb els valors esperats (control).

	Valor d'angle (graus)	Valor de pressió (hPa)
Control	46	400
Predicció amb model de regressió lineal	46	600
Predicció amb model arbre de decisió	43	500
Predicció amb model xarxa neuronal artificial	53	708

El segon tipus de prova realitzada va ser introduir directament als models predictius uns valors de sortida esperats i comprovar amb els valors d'entrada predits quina sortida s'obtenia.

En aquest cas, es varen demanar al model els valors d'entrada per obtenir una sortida amb un cabal volumètric de 3,5 (L/s), un temps de pujada de 0,044 (s) i un temps final de 0,53 (s).

Taula 7. Resultats obtinguts ens les prediccions introduint paràmetres de sortida aleatoris (control) en comparació amb els valors obtinguts a partir de les prediccions.

	Valor de pressió (hPa)	Valor d'angle (graus)	Cabal volumètric obtingut (L/s)	Temps de pujada (s)	Temps final (s)
Control	-	-	3.5	0.044	0.53
Predicció amb model de regressió lineal	244	41	4.6336	0.041	0.46
Predicció amb model arbre de decisió	390	48	Error del sensor, valor massa alt	0.04	0.4
Predicció amb model xarxa neuronal artificial	243	40	5.707	0.044	0.28

En acabar totes les proves i comparacions, es va decidir descartar el model d'arbre de decisió, ja que les seves prediccions no anaven en línia amb les dels dos models restants. Per altra banda, es va veure que en totes les proves d'ambdós models de predicció, tant el de regressió lineal com el de la xarxa neuronal artificial s'obtenien resultats similars. Amb aquest fet, es va decidir continuar treballant i desenvolupant el model de predicció basat en la regressió lineal, ja que oferia la possibilitat de realitzar canvis en l'equació de la funció *fitlm*, permetent així una major personalització.

Cal destacar, que des del primer moment en què es van tenir en consideració els resultats de les proves amb les diferents combinacions, Figures 49, 50 i 51, aquest semblava el model més adequat per l'estudi, ja que es pot observar que les relacions entres les entrades i sortida són majoritàriament lineals.

Tot i això, les prediccions del programa encara no són acceptables, perquè els valors predits de pressió i angle difereixen massa dels valors que s'haurien d'aconseguir. Per tant, es va continuar en l'estudi personalitzant el model.

#### 4.2.5 Personalització i millora del model de predicció basat en la regressió lineal

Com s'ha explicat anteriorment, el model de regressió lineal ofereix la possibilitat de personalitzar, en la mesura del possible, la influència de cada una de les variables predictorres segons la necessitat de l'usuari.

Degut en aquest motiu, s'han provat diverses combinacions de coeficients en les variables predictorres, realitzant diversos tests per tal d'analitzar els resultats obtinguts en cada una de les diferents prediccions.

Cal tenir en compte que l'equació en Matlab, per defecte, es declara de la següent forma:

```
model_angle = fitlm(trainTable_angle, 'ANGLE~+CABALVOLUMETRIC+TEMPSPUJADA+TEMPSFINAL');
```

En aquesta, angle és la variable de resposta mentre que les variables situades a la dreta del signe (~) són les predictorres. Per tal de poder personalitzar l'equació existeixen les següents possibilitats:

- Introduir un signe (-) com a coeficient de qualsevol variable predictorra, això indica una relació inversa entre la variable predictorra i la variable de resposta.
- Introduir el signe (\*) entre dues variables predictorres indica una interacció directa entre les dues variables predictorres, és a dir que estan relacionades entre si.

- Per acabar, podem afegir un coeficient quadràtic ( $\wedge 2$ ) per representar una variable predictora que creguem que presenti una relació quadràtica amb la variable de resposta.

Tenint en compte aquestes característiques es va decidir testar 5 models d'angle i 5 models de predicció de la pressió. Després d'analitzar els resultats, es podrà decidir i treballar amb els models més precisos.

Les equacions declarades per cada un dels models varen ser les següents:

Taula 8. Models de predicció d'angle testats amb l'equació de la regressió personalitzada.

Model d'angle	Equació del model d'angle
Model 1	ANGLE~CABALVOLUMETRIC*TEMPSPUJADA-TEMPSFINAL
Model 2	ANGLE~CABALVOLUMETRIC+TEMPSPUJADA-TEMPSFINAL
Model 3	ANGLE~CABALVOLUMETRIC+TEMPSPUJADA+TEMPSFINAL
Model 4	ANGLE~CABALVOLUMETRIC $\wedge 2$ *TEMPSPUJADA-TEMPSFINAL
Model 5	ANGLE~CABALVOLUMETRIC+TEMPSPUJADA+TEMPSFINAL

Taula 9. Models de predicció de pressió testats amb l'equació de la regressió personalitzada

Model de pressió	Equació del model de pressió
Model 1	PRESSIO~CABALVOLUMETRIC+TEMPSFINAL $\wedge 2$ -TEMPSPUJADA
Model 2	PRESSIO~CABALVOLUMETRIC*TEMPSFINAL-TEMPSPUJADA
Model 3	PRESSIO~CABALVOLUMETRIC+TEMPSFINAL+TEMPSPUJADA
Model 4	PRESSIO~CABALVOLUMETRIC+TEMPSFINAL $\wedge 2$ +TEMPSPUJADA
Model 5	PRESSIO~CABALVOLUMETRIC*TEMPSFINAL $\wedge 2$ +TEMPSPUJADA

#### 4.2.5.1 Tests realitzats

Un cop declarats tots els models, es van realitzar les diferents proves. Aquestes van constituir-se de 5 tests diferents, en cada un d'aquests s'usaven una pressió i angle coneguts (control) per obtenir uns valors de sortida. Aquests resultats són els que s'indiquen al programa com a variables predictores per tal que els models prediguin les dues variables que s'haurien d'utilitzar com entrada.

El funcionament és el mateix que el dut a terme en el primer test de la prova feta en el punt 4.2.4 d'aquest document. Els resultats es faran servir com a control per finalment, un cop assolit el model més adequat per cada variable (angle i pressió) es comparin els resultats reals amb els que s'obtenen en fer la predicció i, així saber l'error real que existeix en usar la màquina amb els valors predits.

Taula 10. Paràmetres control en cada test.

		TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
Control	Angle (graus)	46	36	42	50	44
	Pressió (hPa)	350	450	230	180	270
	Cabal volumètric (L/s)	5,8897	4,6387	4,8705	5,8241	5,6116
	Temps de pujada (s)	0,043	0,041	0,042	0,045	0,043
	Temps final (s)	0,38	0,74	0,36	0,2	0,36

Obtinguts els valors reals de les sortides en cada test, aquest s'usaran com a variables predictorres per als diferents models declarats anteriorment, Taules 8 i 9. Cada un d'aquests models, realitza una predicció d'angle i pressió diferent segons l'equació de regressió lineal que se l'ha atribuït.

Taula 11. Resultats obtinguts en cada predicció.

		TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
Control	Angle (graus)	46	36	42	50	44
	Pressió (hPa)	350	450	230	180	270
Model1	Angle (graus)	49	42	44	51	48
	Pressió (hPa)	325	464	310	166	310
Model 2	Angle (graus)	48	41	44	52	48
	Pressió (hPa)	300	300	300	300	300
Model 3	Angle (graus)	52	39	48	56	52
	Pressió (hPa)	269	446	235	202	256
Model 4	Angle (graus)	59	40	45	44	55
	Pressió (hPa)	305	429	269	177	289
Model 5	Angle (graus)	44	35	43	50	44
	Pressió (hPa)	308	327	317	289	308

Obtinguts tots els resultats, es va seguir amb l'estudi de l'error de cada un dels models. Per això, es va calcular l'error de cada predicció per després poder aconseguir l'error quadràtic mig (RMSE) de cada model.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (11)$$

Com es veu en l'equació superior, es calcula l'error RMSE del model a partir de la suma de les diferències entre els diferents valors predits pel model (P) i els valors reals (O) al quadrat. Aquest resultat es divideix entre el nombre de prediccions estudiades (n) i s'aplica l'arrel quadrada. Aquesta forma de calcular l'error, no es veu influenciada per si l'error en la predicció ha sigut cap a un valor més elevat o més petit de l'original.

Gràcies en això, serem capaços d'identificar els models més precisos i amb menys dispersió de les prediccions realitzades.

Taula 12. Errors de cada predicció i càlcul del RMSE de cada model.

		TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5	RMSE del Model
Model 1	Error angle (graus)	-3	-6	-2	-1	-4	4
	Error pressió (hPa)	25	-14	-80	14	-40	43
Model 2	Error angle (graus)	-3	-6	-2	-1	-4	4
	Error pressió (hPa)	50	150	-70	-120	-30	95
Model 3	Error angle (graus)	-6	-3	-6	-6	-8	6
	Error pressió (hPa)	81	4	-5	-22	14	38
Model 4	Error angle (graus)	-13	-4	-3	6	-11	8
	Error pressió (hPa)	45	21	-39	3	-19	29
Model 5	Error angle (graus)	2	1	-1	0	0	1
	Error pressió (hPa)	42	123	-87	-109	-38	87

Analitzant els resultats obtinguts es pot afirmar que el model 4 de pressió i el model 5 d'angle són els més adequats per usar amb aquesta màquina, ja que són els models amb un RMSE més baix.

Model d'angle final:  $ANGLE \sim -CABALVOLUMETRIC + TEMPSPUJADA + TEMPSFINAL$

Model de pressió final:  $PRESSIO \sim -CABALVOLUMETRIC + TEMPSFINAL^2 + TEMPSPUJADA$

Obtinguts els models més precisos, cal demostrar quins valors de sortida s'obtenen usant els valors d'entrada a la màquina predits pel programa i estudiar els coeficients de cada una de les diferents variables per veure la seva significança en el model.

Per avaluar els coeficients de les variables, vam centrar-nos a revisar cada un d'aquests valors per distingir la seva significança en el model. A més, com es pot veure per al model de pressió, la variable temps final presenta un coeficient al quadrat, això significa que la seva relació amb la variable de resposta, la pressió, és quadràtica en comptes de ser totalment lineal.

La significança estadística de la variable predictora en el model es pot determinar a partir del Valor P, *p-value*, [24]. Aquest, permet diferenciar resultats productes de l'atzar de resultats significatius estadísticament segons el valor que pren. Per això, s'estableix un criteri a partir del qual es diu que es pot refutar una hipòtesi nul·la, d'aquesta manera com major és el *p-value* major és la possibilitat que els canvis en el valor de la variable predictora no comportin modificacions en la sortida, és a dir en la variable de resposta i que, per tant, no tinguin una

gran correlació. El valor d'aquest criteri en estudis estadístics usualment és 0,05, mateix valor que s'ha usat en aquest estudi.

Taula 13. *P-values* de cada variable predictora en cada test realitzat pel model.

Model	Variable predictora	P-value
Model d'angle	Cabal volumètric	-
	Temps de pujada	3.862e-11
	Temps final	3.0059e-16
Model de pressió	Cabal volumètric	-
	Temps de pujada	5.6848e-06
	Temps final	2.3463e-20
	Temps final <sup>2</sup>	2.2541e-10

Tal com es pot observar, totes les variables predictores són estadísticament significatives pel model, ja que els seus *p-values* són menors a 0,05. A pesar d'això, cal remarcar que a l'haver declarat el coeficient de la variable Cabal Volumètric (-), el model usat no presenta el valor *p-value* de la variable *i*, per tant, no es pot assegurar la seva significança.

Per altra banda, per tal de comprovar, no tan sols estadísticament sinó també amb resultats de tests, que el model proporcionava les prediccions adequades per obtenir uns valors de sortida similars als sol·licitats en el programa, es van introduir els valors predits pel model en cada test a la màquina i es van recopilar les dades obtingudes en fer les proves, Taula 14. Les gràfiques resultants d'aquestes combinacions d'entrada van ser comparades amb els valors inicials (control) de cada un dels tests realitzats, Taula 10, per veure els errors finals en la predicció del model, Taula 15.

Taula 14. Valors de sortida obtinguts usant com a paràmetres d'entrada els valors d'angle i pressió predits pel model.

		TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
Model final	Cabal volumètric (L/s)	5,771	4,5019	5,6535	5,4335	5,7347
	Temps de pujada (s)	0,043	0,04	0,043	0,045	0,043
	Temps final (s)	0,35	0,73	0,32	0,2	0,34

Taula 15. Error final en els valors de sortida usant com a paràmetres d'entrada a la màquina els valors d'angle i pressió predits pel model.

		TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
Error en la predicció final	Cabal volumètric (L/s)	0,1187	0,1368	-0,783	0,3906	-0,1231
	Temps de pujada (s)	0	0,001	-0,001	0	0
	Temps final (s)	0,03	0,01	0,04	0	0,02

Aquests resultats també es poden observar gràficament comparant la sortida obtinguda amb els paràmetres de control i la gràfica que s'obté en usar la màquina amb els valors d'entrada predits pel model.

Les següents imatges presenten la comparació gràfica dels resultats assolits amb els paràmetres d'entrada, control (gràfic esquerre) i, els paràmetres predits pel model (gràfic dret). Es presenten els resultats dels 5 tests realitzats inicialment, Taula 10, per finalment validar el model.

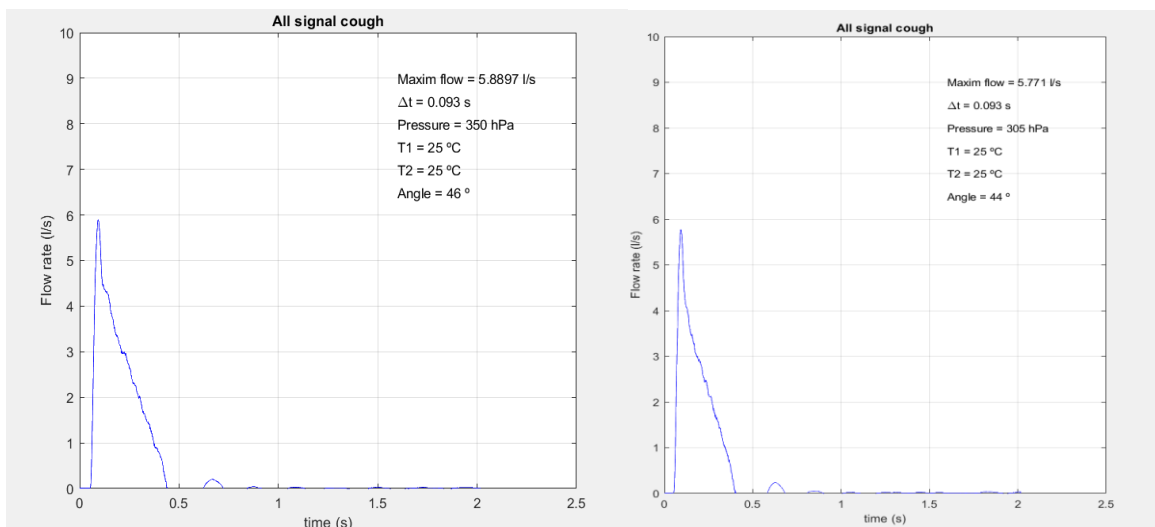


Figura 56. Comparació gràfica dels resultats obtinguts amb paràmetres d'entrada Control (gràfic esquerre) i paràmetres predits (gràfic dret) pel Test 1.

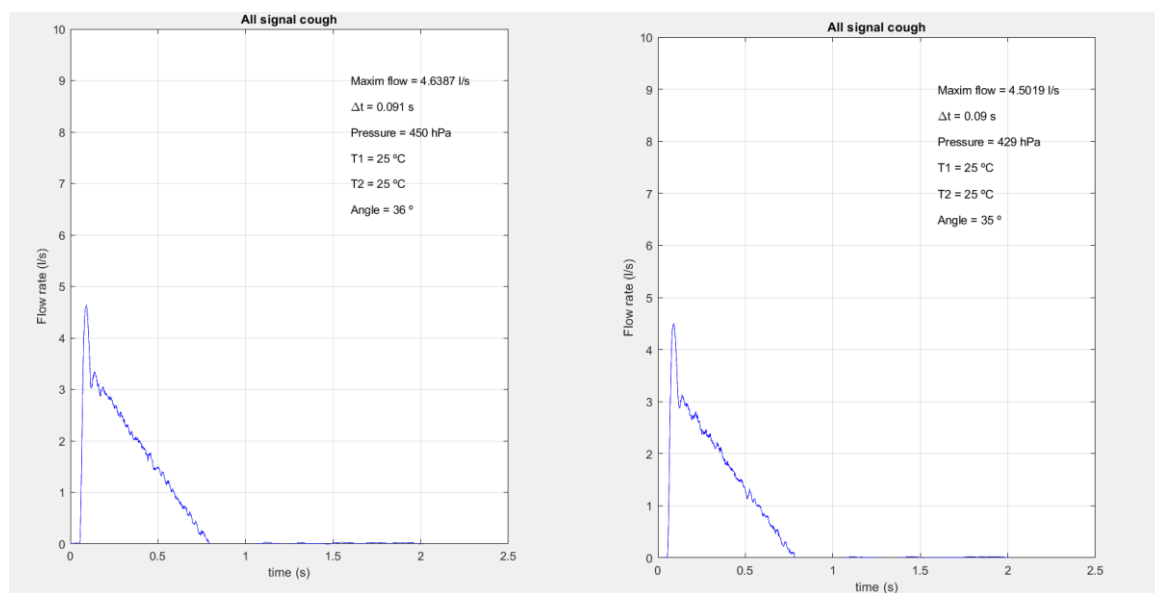


Figura 57. Comparació gràfica dels resultats obtinguts amb paràmetres d'entrada Control (gràfic esquerre) i paràmetres predits (gràfic dret) pel Test 2.

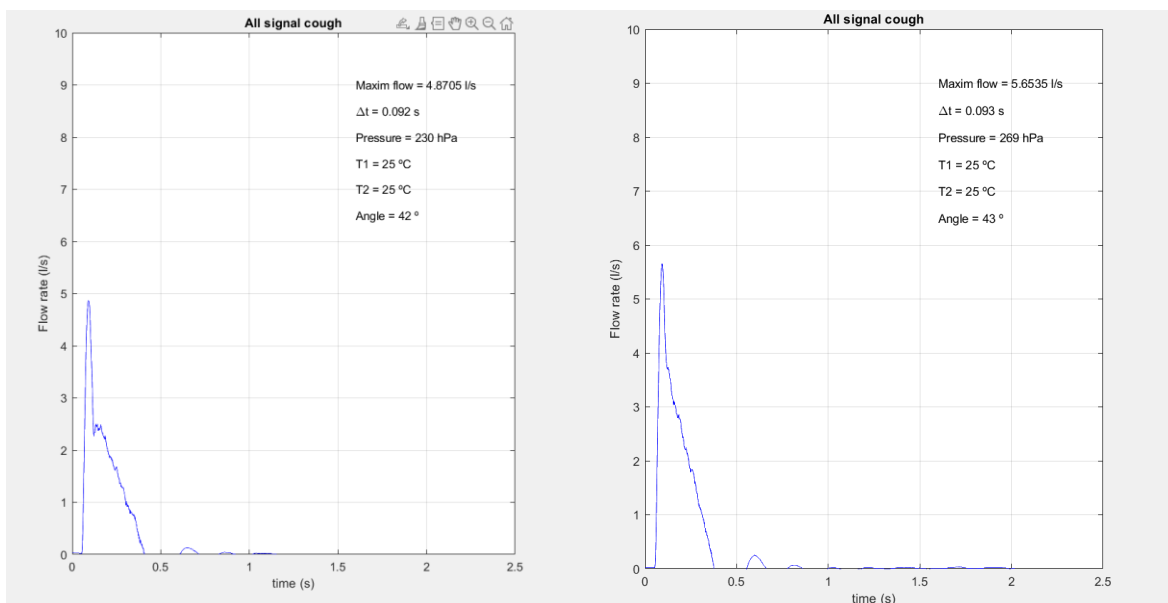


Figura 58. Comparació gràfica dels resultats obtinguts amb paràmetres d'entrada Control (gràfic esquerre) i paràmetres predits (gràfic dret) pel Test 3.

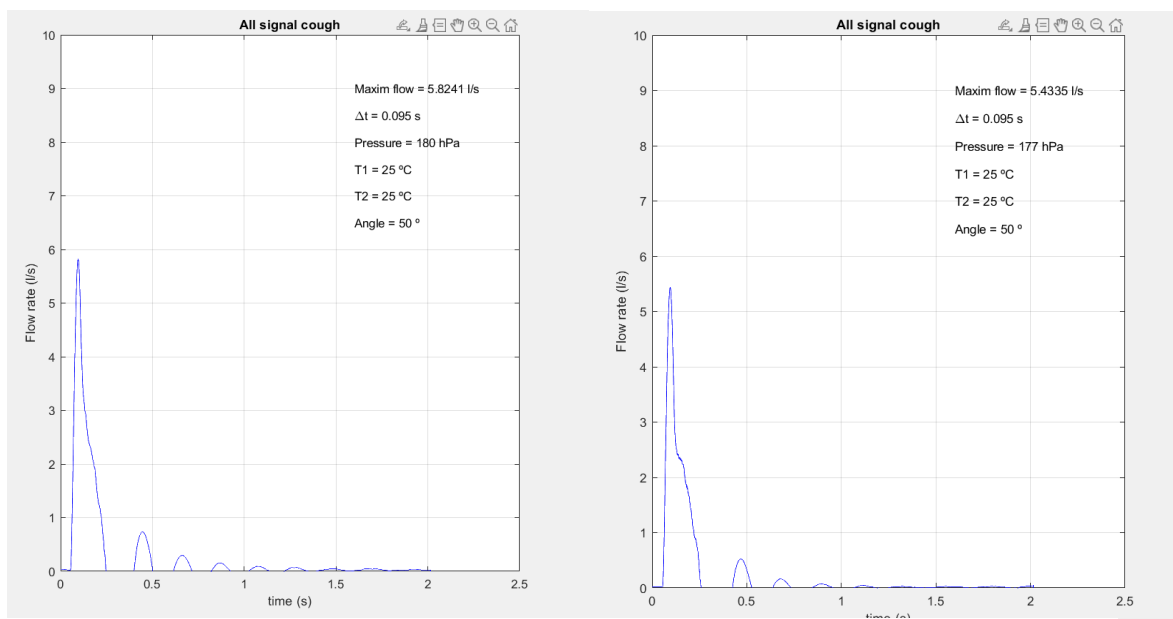


Figura 59. Comparació gràfica dels resultats obtinguts amb paràmetres d'entrada Control (gràfic esquerre) i paràmetres predits (gràfic dret) pel Test 4.

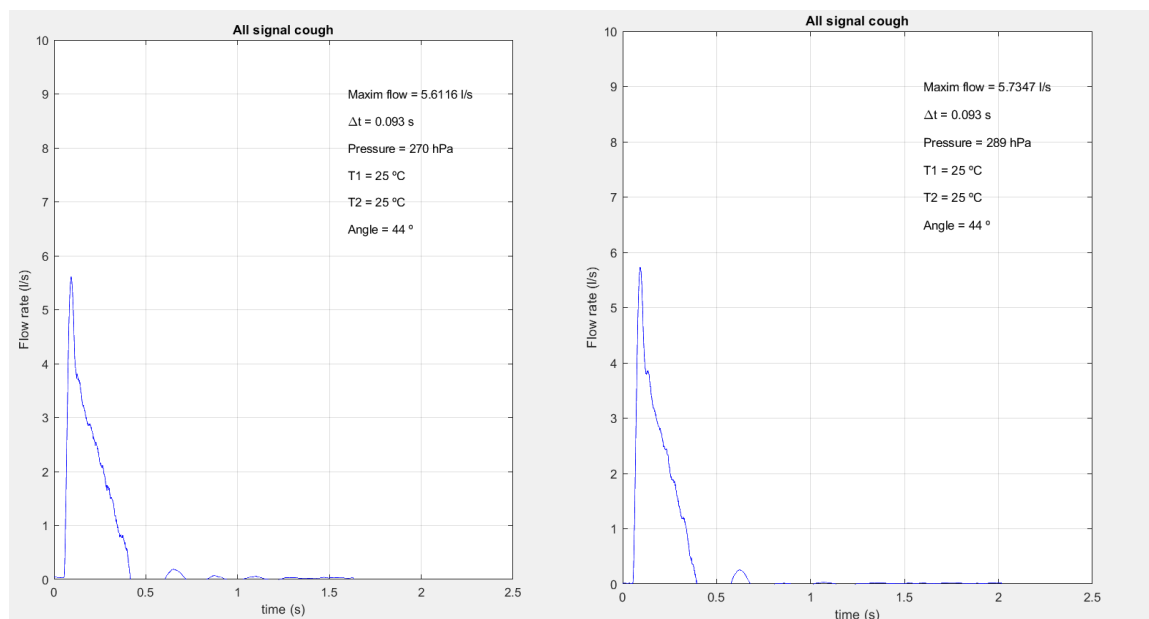


Figura 60. Comparació gràfica dels resultats obtinguts amb paràmetres d'entrada Control (gràfic esquerre) i paràmetres predits (gràfic dret) pel Test 5.

Observant les diferents comparacions de les 5 proves realitzades, es pot afirmar que el model és prou precís per ser usat i, que les gràfiques que s'obtenen amb els valors predits pel programa són pràcticament idèntiques, no tan sols en els valors estudiats fins al moment de cabal, temps de pujada i temps final sinó també referint-se a la forma del gràfic.

El fet d'haver pogut desenvolupar un programa capaç de predir els valors a utilitzar com entrada en la màquina d'esternuts per obtenir una sortida coneguda, facilitarà molt l'ús del dispositiu en el futur, ja que no s'haurà de perdre temps en provar diverses combinacions fins per casualitat encertar, sinó que ràpidament se sabrà com programar l'equip per a cada cas particular.

## 5 Futures millores i conclusions

L'objectiu general del projecte en què es desenvolupa aquest estudi, i que seguirà en desenvolupament, és treballar un codi de Matlab capaç de poder distingir les diferents partícules d'aerosols expulsades en l'esternut replicat per la màquina.

Com s'ha explicat anteriorment, amb la càmera ràpida s'obté un vídeo d'un breu període de temps, aproximadament uns 5 segons, en els quals es pot observar la distribució de les partícules. S'ha plantejat desenvolupar un codi capaç d'analitzar varis *frames* del vídeo captat per estudiar la distribució de les partícules en cada un d'aquests i, veure'n la distribució.

Tot i que el codi per aconseguir el proposat ja ha sigut escrit, no s'ha arribat al resultat esperat. En aquest codi, es captura un *frame* a la meitat del vídeo i el *frame* final, d'aquesta manera s'aconsegueixen dues imatges amb les quals analitzar i comparar la distribució de les partícules. La idea inicial era tractar d'agrupar les partícules més properes entre si, en conjunts o clústers, per així diferenciar diferents patrons de moviment i poder analitzar com s'han distribuït aquests mateixos clústers en el *frame* final del vídeo.

Per aconseguir-ho, primer cal tenir una imatge prou nítida per diferenciar cada una de les partícules i, seguidament, binaritzar correctament la imatge per tractar-la segons les necessitats i establir els clústers correctament.

Com es veu en les imatges inferiors, Figures 61 i 62, en aquest pas ens veiem forçats a no poder seguir, ja que en la imatge obtinguda per la càmera les partícules no es diferencien amb la suficient nitidesa, fet que fa que a l'hora de binaritzar-se la imatge, s'obtingui tan sols un gran conglomerat en comptes de veure cada una de les diferents partícules. Degut en això, el programa no pot funcionar correctament i establir clústers, ja que no és capaç de diferenciar correctament.

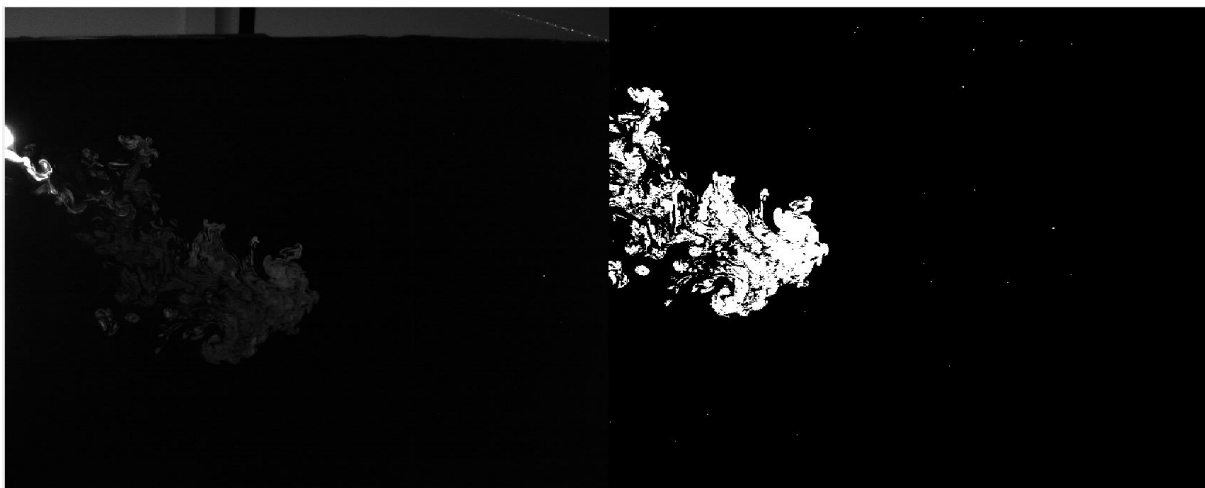


Figura 61. Imatge real (esquerra) i imatge binaritzada en Matlab (dreta) obtingudes en un punt mig del vídeo.

Cal destacar també, que en aquesta configuració de càmera no es pot observar un gran contrast entre el fons i les partícules de l'esternut il·luminades amb el feix de llum del làser. Per aquest fet, encara es dificulta més la possibilitat de tractar les imatges obtingudes, ja que tal com es veu en l'última imatge, Figura 65, el programa no capta la major part de les partícules en el *frame* final.

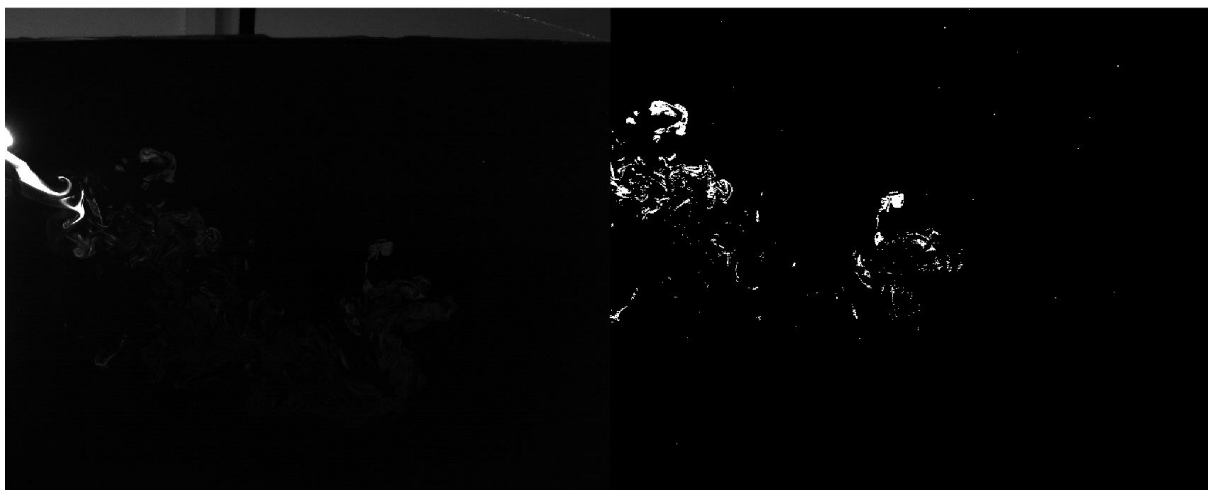


Figura 62. Imatge real (esquerra) i imatge binaritzada en Matlab (dreta) obtingudes en el *frame* final del vídeo.

En tenir aquesta limitació, es proposa treballar en el futur amb una càmera de millor resolució i capaç de captar la llum que incideix en les partícules per poder diferenciar-les i tractar-les en el programa.

D'aquesta manera, s'obindrà un codi que possibilitarà l'anàlisi de la distribució de partícules d'aerosols expulsades en qualsevol esternut realitzat amb aquest equip.

A pesar d'això, en finalitzar l'estudi i després d'analitzar els resultats de les diferents proves realitzades en aquest, es poden treure algunes conclusions respecte al funcionament de la màquina d'esternuts, la relació entre les diferents variables d'entrada i la sortida esperada i, en últim lloc, es pot usar aquest estudi com a base per a seguir desenvolupant el funcionament del conjunt en el laboratori per finalment poder analitzar la distribució de les partícules de l'esternut amb un codi de Matlab.

En primer lloc, cal destacar que l'equip i l'estructura queden preparats al laboratori per seguir en ús de forma que no s'hagi de tornar a muntar per futurs estudis.

Més important i punt principal, s'ha obtingut un model capaç de predir les variables d'entrada a la màquina segons els valors de l'esternut que espera l'usuari. Com s'ha mencionat, això facilita en gran manera l'ús del dispositiu i, sobretot, permet a l'usuari estalviar molt de temps de proves. En aquest sentit, és rellevant destacar que s'ha aconseguit establir un rang de paràmetres òptims, per a la simulació d'esternuts amb la màquina, per si en el futur es vol fer algun tipus de proves diferents.

Cal destacar, que tal com s'ha vist en els resultats obtinguts cada una de les diferents variables predictorres té una relació i significança diferents respecte a les variables de resposta, angle i pressió.

S'ha demostrat que la relació entre el temps final i la pressió és quadràtica. Aquesta mateixa relació s'ha pogut observar també gràficament, Figura 51, quan s'han analitzat les gràfiques del conjunt de dades amb què s'ha treballat. A pesar d'això, veient els resultats obtinguts amb els altres models de predicció de pressió on el temps final no es considerava com a coeficient quadràtic, que tot i no ser tan precisos donaven resultats acceptables, es pot dir que la relació és quadràtica, però molt propera a ser lineal.

Per altra banda, cal destacar també, que no s'ha pogut observar cap relació significativa entre el cabal volumètric i la pressió. En proves anteriors, es va veure que els resultats obtinguts per la predicció de la pressió eren menys precisos en considerar el cabal, en canvi, en el moment en què es va declarar el cabal volumètric (-) en l'equació de la regressió, es van

obtenir els primers resultats correctes. Pel model d'angle, tot i que en el model final també s'ha declarat el cabal (-), cal destacar que en altres models on sí que es considera el cabal els resultats, tot i no ser els més precisos, continuen essent acceptables.

D'aquesta manera, es considera que el cabal volumètric no es defineix per la pressió que s'introdueix en la màquina, sinó més aviat per l'obertura de l'angle. A pesar d'això, es creu que amb una base de dades amb què en comptes de treballar amb 100 combinacions, tal com s'ha fet en aquest estudi, es disposi d'un conjunt de dades major, es podrà observar més clarament l'afectació del cabal volumètric.

Finalment, cal remarcar que aquest estudi presenta les anàlisis prèvies per abordar l'estudi de la deposició de partícules expulsades en l'esternut en futurs treballs, obtenint una plataforma en què realitzar els diferents experiments en el laboratori, facilitant l'ús del dispositiu i presentant el comportament i les relacions de les diferents variables per tal de poder implementar aquestes idees en el projecte general en què s'ha desenvolupat aquest TFG.

## **6 Agraïments**

M'agradaria aprofitar per agrair tant ambdós tutors, en Jordi Pallarès i en Salvatore Cito, com al meu company al laboratori, el Nicolás, qui és estudiant de Doctorat, per haver-me guiat i ajudat en la realització del treball.

Vull destacar l'ajut rebut, ja que durant el desenvolupament d'aquest treball m'han sigut resolts nombrosos dubtes que tenia sobre la matèria, fet que m'ha permès adquirir un major coneixement i poder desenvolupar les tasques requerides correctament. Alhora, també mencionar la predisposició del Nicolás a l'hora de fer tasques en el laboratori, ja que moltes vegades no érem capaços de coincidir per incompatibilitats horàries i, tot i això, es buscava la manera de resoldre'm dubtes.

Per altra banda, agrair tant a la meva família com amics el suport rebut durant el desenvolupament, ja no tan sols d'aquest treball, sinó dels estudis cursats. Gràcies en ells he sigut capaç de gaudir d'aquesta bonica etapa i poder treure el màxim de mi mateix.

## 7 Referències

- [1] Johns Hopkins University, "Report of Co-Vid19 cases," 2020.
- [2] J. P. Duguid and B. So, "[ 471 ] THE SIZE AND THE DURATION OF AIR-CARRIAGE OF RESPIRATORY DROPLETS AND DROPLET-NUCLEI."
- [3] R. Mittal, R. Ni, and J. H. Seo, "The flow physics of COVID-19," *J Fluid Mech*, vol. 894, 2020, doi: 10.1017/jfm.2020.330.
- [4] J. K. Gupta, C. H. Lin, and Q. Chen, "Flow dynamics and characterization of a cough," *Indoor Air*, vol. 19, no. 6, pp. 517–525, Dec. 2009, doi: 10.1111/j.1600-0668.2009.00619.x.
- [5] L. Bourouiba, "Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19," *JAMA - Journal of the American Medical Association*, vol. 323, no. 18. American Medical Association, pp. 1837–1838, May 12, 2020. doi: 10.1001/jama.2020.4756.
- [6] S. Yang, G. W. M. Lee, C. M. Chen, C. C. Wu, and K. P. Yu, "The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects," *Journal of Aerosol Medicine: Deposition, Clearance, and Effects in the Lung*, vol. 20, no. 4, pp. 484–494, Dec. 2007, doi: 10.1089/jam.2007.0610.
- [7] A. Brostrøm, K. I. Kling, K. S. Hougaard, and K. Møhlhave, "Complex Aerosol Characterization by Scanning Electron Microscopy Coupled with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-65383-5.
- [8] P. Anfinrud, V. Stadnytskyi, C. E. Bax, and A. Bax, "Visualizing Speech-Generated Oral Fluid Droplets with Laser Light Scattering," *New England Journal of Medicine*, vol. 382, no. 21, pp. 2061–2063, May 2020, doi: 10.1056/nejmc2007800.
- [9] Science Direct, "Reynold's Number," from *Natural Gas Engineering Handbook (Second Edition)*, 2005. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reynolds-number> (accessed May 27, 2023).
- [10] N. Connor, "What is Darcy Friction Factor - Definition." <https://www.thermal-engineering.org/what-is-darcy-friction-factor-definition/> (accessed May 27, 2023).
- [11] S. Asadi, A. S. Wexler, C. D. Cappa, S. Barreda, N. M. Bouvier, and W. D. Ristenpart, "Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-38808-z.
- [12] J. E. Huber, B. Chandrasekaran, and J. J. Wolstencroft, "Changes to respiratory mechanisms during speech as a result of different cues to increase loudness," *J Appl Physiol*, vol. 98, no. 6, pp. 2177–2184, Jun. 2005, doi: 10.1152/jappphysiol.01239.2004.
- [13] A. Bahramian, M. Mohammadi, and G. Ahmadi, "Effect of indoor temperature on the velocity fields and airborne transmission of sneeze droplets: An experimental study and transient CFD modeling," *Science of the Total Environment*, vol. 858, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159444.
- [14] R. P. Mahajan, P. Singh, G. E. Murty, and A. R. Aitkenhead, "Relationship between expired lung volume, peak flow rate and peak velocity time during a voluntary cough manoeuvre," 1994.
- [15] H. S. Badeer, "HEMODYNAMICS FOR MEDICAL STUDENTS," 2001.

- [16] S. G. Kwak and J. H. Kim, "Central limit theorem: The cornerstone of modern statistics," *Korean J Anesthesiol*, vol. 70, no. 2, pp. 144–156, Apr. 2017, doi: 10.4097/kjae.2017.70.2.144.
- [17] P. Díaz and P. Fernández, "Investigación: La distribución normal La distribución normal," 2001. [Online]. Available: [www.fisterra.com](http://www.fisterra.com)
- [18] H. Abdi and P. Molin, "Lilliefors/Van Soest's test of normality," *Encyclopedia of measurement and statistics*, 2007.
- [19] G. S. Cembrowski, J. O. Westgard, W. J. Conover, and E. C. Toren, "Statistical Analysis of Method Comparison Data Testing Normality." [Online]. Available: <http://ajcp.oxfordjournals.org/>
- [20] Colaboradores de Wikipedia, "Wikipedia: Regresión Lineal," 2023.
- [21] MathWorks Collaboratives, "MathWorks: Fitrtree," 2014.
- [22] MathWorks Collaboratives, "MathWorks: ¿Qué es una red neuronal?".
- [23] A. Ranganathan, "The Levenberg-Marquardt Algorithm," 2004.
- [24] M. S. Thiese, B. Ronna, and U. Ott, "P value interpretations and considerations," *J Thorac Dis*, vol. 8, no. 9, pp. E928–E931, 2016, doi: 10.21037/jtd.2016.08.16.

## Annexes

### Annex I – Conjunt de valors recopilats en Excel per calibrar el sensor

Exemple del conjunt de valors que capta el sensor al mesurar la diferència de pressió entre dos punts del tub i que serviran per calibrar-lo.

6					0,05					3				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
5944	6069	6084	6251	6037	71	71	71	71	72	1779	1915	1783	1763	1695
6050	6092	6065	6201	6106	71	71	71	71	72	1632	1875	1740	1750	1732
5866	6169	6137	6476	6035	71	71	71	71	72	1762	1882	1765	1729	1618
5687	6258	6126	6526	6086	71	71	71	71	71	1910	1879	1826	1730	1625
5748	6174	6134	6318	6155	71	71	71	71	71	1858	1918	1719	1777	1765
5760	6085	6247	6290	5815	71	71	71	71	71	1867	1907	1707	1800	1811
5707	6121	6313	6364	5422	71	71	71	71	71	1986	1879	1760	1769	1792
5787	6098	6338	6323	5407	71	71	71	71	71	2011	1911	1793	1766	1803
5899	6157	6344	6074	5356	71	71	71	71	71	1989	1938	1829	1809	1823
5956	6344	6221	6017	5061	71	71	71	71	71	2041	1931	1823	1865	1840
6023	6333	6119	5996	5045	71	71	71	71	71	2060	1911	1771	1907	1848
6052	6152	6188	5758	5235	71	71	71	71	71	1990	1940	1771	1911	1850
6044	6130	6249	5608	5232	71	71	71	71	71	1945	1983	1849	1904	1905
6085	6105	6113	5597	5118	71	71	71	71	71	2002	1992	1840	1932	1946
6092	6021	5906	5490	5185	71	71	72	71	71	2030	2005	1795	1970	1904
6037	6131	5905	5424	5297	70	71	72	71	71	1979	2005	1766	1976	1917
6137	6206	6009	5396	5349	70	71	71	71	71	1915	1958	1737	1955	1979
6236	6119	5996	5399	5414	70	71	72	71	71	1880	1954	1812	1956	1955
6071	6013	5954	5476	5359	70	71	72	71	71	1883	2019	1856	1972	1903
6025	6001	6047	5515	5287	70	71	72	71	72	1982	1955	1814	1940	1949
6216	5981	6163	5450	5297	70	71	72	71	72	1962	1794	1882	1806	1959
6202	5946	6181	5372	5270	70	71	72	71	72	1893	1766	1879	1729	1869
6034	5917	6221	5405	5327	70	71	72	71	72	1956	1903	1714	1757	1863
6134	6018	6344	5541	5442	70	71	72	71	72	1984	1939	1720	1775	1947
6271	6099	6378	5538	5479	70	71	72	71	72	1901	1880	1924	1747	1963
6191	5997	6238	5456	5523	70	71	72	71	72	1935	1862	1991	1757	1905