

# ESTUDI I DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT ORIENTAT A LA DOCÈNCIA PER LA REALITZACIÓ D'ASSAIGS EN PERFILS AERODINÀMICS

Raúl Inglés Molina

Treball Final de Grau en Enginyeria Mecànica. Departament de Mecànica de Fluids. Escola Politècnica Superior de Vilanova i la Geltrú, Juliol 2017

## Resum

En aquest projecte s'ha dissenyat un túnel de vent de mides reduïdes enfocat a la docència. Aquest túnel permet realitzar experiments aerodinàmics de mesura de forces amb models a escala impresos amb impressores 3D.

Per poder realitzar aquests experiments de forma correcta, s'ha tractat de trobar un flux de qualitat, seguint els paràmetres límit que estableixen els experts en la matèria.

El túnel de vent dissenyat, disposarà d'una cambra de proves que permetrà l'experimentació amb models de 5,3 cm de diàmetre, amb una velocitat de flux de fins 25,5 m/s.

## 1. Introducció

Es vol estudiar i dissenyar un túnel de vent aplicat a la docència per a la realització de pràctiques de laboratori corresponents a assaigs amb perfils aerodinàmics.

El disseny s'enfoca en les proves que puguin realitzar els estudiants de la universitat. Les proves consistirien a muntar models a escala o objectes de geometries simples (esferes, cubs, cons, etc), per mesurament de forces aerodinàmiques, entre altres proves que podrien ser realitzades. Fins i tot, aquests models, podrien ser dissenyats pels alumnes i, aprofitant les impressores 3D de l'escola, es podrien arribar a fabricar i utilitzar en les pràctiques.

També donaria l'oportunitat de disposar de pràctiques del tema d'aerodinàmica dins del temari de les assignatures del Departament de Mecànica de Fluids. A més, estaria disponible pels alumnes que vulguin realitzar un estudi aerodinàmic mitjançant models i la Teoria de la Semblança, facilitant futurs treballs finals de grau.

Per realitzar aquest estudi s'han establert com objectius específics:

- Estudiar els diferents tipus de túnels de vent amb aplicacions docents existents.
- Definir el túnel de vent que millor s'adapti als requeriments plantejats.
- Dissenyar el túnel de vent i selecció de la seva instrumentació electrònica.
- Realitzar simulacions en CFD.

- Definir les pràctiques de laboratori que es podrien realitzar.
- Establir les instruccions de muntatge, funcionament i manteniment.
- Realitzar el pressupost de l'equip i la comparativa amb les alternatives comercials.

A causa de la naturalesa didàctica del disseny, les dimensions del túnel aerodinàmic han de permetre la instal·lació i el seu correcte funcionament dins del laboratori, que és un espai reduït on hi ha altres tipus de maquetes que permeten realitzar experiments. A més, la grandària dels models ha d'adequar-se a les capacitats dels estudiants, i s'ha de tenir present que la grandària dels mateixos condicionarà de forma directa les dimensions del túnel.

En quan a les dimensions mínimes, s'ha de tenir en compte les mesures dels models a utilitzar, que en principi serien les capaces de realitzar per una impressora 3D, establint així les dimensions mínimes que ha de tenir la cambra de proves on es ficaran els models.

A més, s'ha de tenir present que no és un aparell precisament econòmic. S'hauria de buscar el mínim cost possible i comparar-ho amb les ofertes que hi ha en el mercat.

Com limitacions d'aquest treball de grau, comentar que l'estudi exhaustiu de la part electrònica del túnel de vent queda fora dels objectius marcats en el treball.

## 2. Marc teòric

En els primers apartats de la memòria, s'han comentat els aspectes teòrics principals que apareixeran al llarg del projecte, com la hipòtesi del continu, la viscositat, l'anàlisi dimensional, els nombres adimensionals, la teoria de la semblança, els tipus de flux, la teoria de la capa límit, etc.

### 2.1 Túnels de vent

Tot seguit, s'estudiaran els túnels de vent. Aquest apartat es basa en l'article "Diseño aerodinámico de un túnel de

viento a bajas velocidades” [1] i en el llibre “Low-speed tunnel testing” [2].

Un túnel de vent és una eina útil en la recerca de la mecànica dels fluids tenint com a principals avantatges la possibilitat de la reducció de l'objecte d'estudi a un model a escala, optimització en el disseny i funcionament del model, control de les condicions de flux, repetibilitat dels assajos, així com el temps i l'economia, que generen avantatges enfront de les proves que es realitzen en el camp.

El disseny d'un túnel de vent, crea un flux d'aire a certa velocitat i de baixa turbulència, que és dirigit a través de la secció de prova i permet que en els processos de recerca es mesurin les interaccions que produeixen el conjunt flux d'aire-model, així com les forces resultants, els coeficients aerodinàmics, els efectes de turbulència, entre altres.

## 2.2 Tipus de túnels de vent

Existeixen diverses maneres de classificar els túnels de vent. Atenent al tipus de configuració, els túnels poden ser: **oberts**, on un ventilador succiona l'aire a través del conducte del túnel i després, expulsa l'aire de nou a l'exterior; o **tancats**, anomenat també túnel de recirculació perquè l'aire és forçat a circular en forma indefinida per l'interior del túnel. Aquests túnels són normalment més llargs i difícils de construir, a més el seu disseny és més exigent ja que es centren en buscar la qualitat del flux, no aptes per un petit laboratori.

Dins dels túnels de vent oberts hi ha una altra possible classificació: els **bufats**, el que té el grup de ventiladors abans de la càmera d'assajos i els **aspirats**, el que té el grup de ventiladors després de la càmera d'assajos. Les dues configuracions tenen avantatges i inconvenients, una vegada més dependrà de l'ús que vulguem donar-li. Per fer-nos una idea, el túnel bufat proporciona més velocitat que l'aspirat. Si mirem la uniformitat del flux, veiem que en la configuració d'aspiració el flux és més regular i uniforme.

Una altra forma de classificació dels túnels és d'acord al seu règim de treball o tipus de flux, és a dir, a la velocitat de l'aire a la zona de prova, aquí es classifiquen com: **subsònics**, on la velocitat de l'aire a la zona de prova no supera la velocitat crítica amb nombre de Mach menors de 0.75; **transsònics** amb  $0.75 < M < 1.2$ ; **supersònics** amb  $1.2 < M < 5$ ; o **hipersònics** amb  $M > 5$ .

També es poden classificar pel disseny de la secció de prova, els túnels de vent es classifiquen com: amb **secció d'assaig tancada**, on la secció de prova és una continuació de la secció de sortida de la zona de contracció i està limitada per parets sent generalment una zona de secció constant; o bé, amb **secció d'assaig oberta**, on la secció d'assajos no està confinada per les parets, l'aire de l'interior del túnel es barreja amb l'exterior, disminuint gairebé totalment el problema d'errors introduïts a causa de la proximitat de les parets al model i la seva interferència amb el flux.

### 2.2.1 Túnel de vent de circuit obert

Els túnels de vent de circuit obert són els més utilitzats en laboratoris. Existeixen dos tipus bàsics de túnels de circuit obert, els bufats i els aspirats. Les seves diferències radiquen en la posició del ventilador. El ventilador del túnel bufat, es situa a l'entrada o contracció del túnel i el de l'aspirat s'ubica a la sortida, després del difusor.

El **túnel de bufat** és el més flexible degut a que el ventilador es situa a l'interior del túnel, d'aquesta manera es pot intercanviar la secció de proves amb variacions importants del flux, i fins i tot, es pot arribar a eliminar el difusor, facilitant l'accés a la secció de proves i els instruments de mesura. No obstant, provoca pèrdues de potència. Són túnels energèticament més eficients que els aspirats, d'aquesta manera els costos d'operació es redueixen. La desacceleració del fluid en el difusor és més eficient, reduint les pèrdues de càrrega.

El **túnel aspirat** és més propens a sofrir inestabilitats en el flux que el bufat, d'altra banda existeix menys turbulències per que l'aire no travessa el ventilador abans d'entrar a la secció de proves.

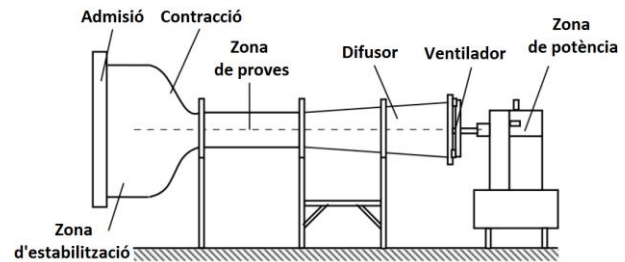


Figura 1. Esquema de les parts d'un túnel aerodinàmic obert i aspirat.

La **zona d'admissió** és pràcticament l'entrada al conducte principal del túnel i la seva funció és evitar la desestabilització dels corrents d'aire i la formació i propagació de les turbulències que es deuen a canvis abruptes de la velocitat del vent.

La **zona d'estabilització** és una zona d'àrea constant on es troben el corrector del flux i les reixetes estabilitzadores. Permet que el flux entrant pugui passar a la zona de contracció com un flux uniforme i de poca turbulència.

La **zona de contracció** és una zona on ocorre la disminució de l'àrea de pas del túnel i la seva funció és accelerar el flux i disminuir les variacions de velocitat. En aquesta zona, el fluid s'accelera fins a aconseguir la velocitat de disseny a la zona de prova.

La secció de treball o **secció de proves** és la zona on normalment s'instal·la el model d'estudi i on la velocitat del flux aconsegueix el seu règim de prova, sent les línies de corrent uniformes i paral·leles.

El **difusor** té la funció principal de disminuir la velocitat de sortida del flux, gràcies a un increment de l'àrea de pas. Amb això, s'augmenta gradualment la pressió i es disminueix la velocitat del flux, la qual cosa fa disminuir les pèrdues per fricció.

Finalment, l'aire per si solament no va a passar espontàniament pel túnel de vent. Perquè l'aire travessi el túnel és necessari induir a l'aire a travessar el túnel. Això s'aconsegueix amb una **unitat de potència**, que en la majoria dels casos és un **ventilador**, que proporciona la força necessària per moure l'aire a través del túnel de vent.

### 2.3 Instrumentació dels túnels de vent

Hi ha una sèrie d'equips clau que són comuns, necessaris per a l'execució de pràctiques de laboratori, demostracions, recerques qualitatives i calibració de l'equip. Depenent de la instrumentació, es podran realitzar uns experiments o uns altres.

Sistema	Components	Funció
Caracterització del flux	-Sensors de velocitat -Sensors de pressió	-Mesurar velocitats locals -Mesurar pressions locals -Quantificar el grau de turbulència -Calibrar el túnel de vent
Visualització del flux	-Generadors de fum -Distribuidors de partícules -Càmeres d'alta velocitat -Processadors d'imatges	-Mostrar les línies de flux -Mostrar les zones turbulentes o estancades -Registrar imatges -Postprocés d'imatges per verificar velocitat i vòrtex
Balança per models	-Dinamòmetres -Models per Calibració -Codificadors de posició	-Mesurar forces que suporta el model -Obtenir factors de correcció de parets -Calibrar el túnel de vent
Mesura automàtica	-Sistemes d'adquisició de dades -Accessoris i transductors -Controladors industrials (PLC)	-Registrar mesures de posició, velocitat, pressió i càrrega -Comunicació bidireccional amb el sistema de control dels ventiladors

Taula 1. Instrumentació bàsica per un túnel de vent. [3]

### 2.4 Aplicacions dels túnels de vent

Existeixen gran nombre d'aplicacions per als túnels de vent, tantes com sistemes amb flux d'aire:

- Patrons de moviment de vent prop d'accidents geogràfics.
- Camps de velocitats i pressions del vent.
- Patrons d'erosió i transport en terrenys.
- Patrons d'arrossegament d'inundacions per efecte del vent.
- Visualització de patrons de dispersió de contaminants.
- Experiments qualitius de ressonància per retroalimentació.
- Demostracions i experiments clàssics en mecànica de fluids.
- **Docència.** Les aplicacions docents són aquelles que no necessiten d'un gran túnel de vent per a poder-se realitzar adequadament, solen estar relacionades amb el càlcul de forces que afecten a un objecte o amb les propietats del flux que afecta a l'objecte d'estudi:
  - Càlcul de coeficients de resistència i sustentació.
  - Mesura de diferències de pressió.
  - Mesura de la variació de velocitat del flux.

- Observació de canvis en el flux canviant característiques del model.
- Càlcul d'aleiteig en perfils.

## 3. Disseny

Tot el disseny del túnel de vent s'ha realitzat seguint les indicacions del llibre "Low-speed wind tunnel testing" [2].

Primerament, limitarem la **llargada** del túnel de vent a 3 metres i la seva **alçada** serà com a màxim 0,5 metres (contant el suport) i per situar-lo a sobre d'una taula de treball. En quan a l'**amplada** situarem el seu màxim als 0,8 metres. En resum: **màxim 3x0,5x0,8 m<sup>3</sup>**.

Triarem una cambra de proves de secció quadrada (principalment per la seva facilitat de fabricació) de límit **màxim 160x160 mm<sup>2</sup> i longitud 360 mm**, d'aquesta forma evitem sobrepassar les dimensions totals màximes i és suficient per encabir-hi models fabricats en impressores 3D.

Resulta evident la tria d'un túnel de vent de cycle obert, per les limitacions de dimensions totals, dins dels túnels de circuit obert, el tipus de túnel de vent més favorable per les condicions d'aquest projecte és el **subsònic de cycle obert aspirat**.

Hem de considerar les condicions inicials del flux a l'entrada (i sortida) del túnel, doncs el fluid a utilitzar és l'aire atmosfèric i a nivell del mar. Tenim les següents dades d'entrada:

Pressió atmosfèrica	$p_0 = 101,325 \text{ kPa}$
Temperatura atmosfèrica	$T_0 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$
Densitat	$\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$
Viscositat cinemàtica	$\nu = 1,516 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Viscositat dinàmica	$\mu = 1,825 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$

Taula 2. Condicions de l'aire a nivell del mar.[4]

### 3.1 Cambra de proves

El primer a determinar-se és la càmera de proves ja que és el nucli i l'objectiu aerodinàmic del projecte. Es busca que el flux d'aire sigui paral·lel i de velocitat uniforme. A més, la secció de proves ha de ser lo suficientment llarga per a que les pertorbacions de flux resultants a la contracció siguin suficientment reduïdes abans d'arribar al model i de suficient secció per a que els objectes avaluats tinguin suficient flux d'aire. No obstant, no s'ha d'exagerar la longitud, ja que portaria a separar-se la capa límit quan entra al difusor i altres pèrdues que es tradueixen en pèrdues de potència.

En resum, es realitzaran les següents hipòtesis inicials:

- Es treballa en règim estacionari.
- Considerant condicions de l'aire a nivell del mar.
- Se suposa flux incompressible.
- Establir una velocitat mitjana a la cambra de proves de 20 m/s.
- Secció màxima de 160 x 160 mm<sup>2</sup>.
- Longitud de 360 mm.

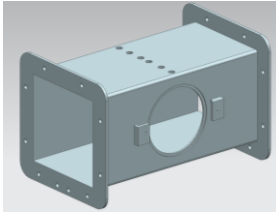


Figura 2. Cambra de proves amb Siemens NX 10.

Per trobar les dimensions màximes dels models i si són viables les dimensions proposades de la cambra, s'estudia la reducció de l'àrea útil per l'efecte del desprendiment de la capa límit. **L'àrea que es pot utilitzar per mesures, considerant un flux uniforme, es reduirà un 13,7%** respecte a les dimensions físiques de la cambra.

Amb aquesta reducció es calcula **el factor de bloqueig**, amb un màxim d'un **10%**, els models que es podrien estudiar en el túnel de vent, haurien de tindre un **diàmetre inferior a 5,3 cm**, bones dimensions per objectes fabricats amb una impressora 3D.

### 3.2 Con de contracció

El con de contracció té bàsicament dues funcions: incrementar la velocitat de l'aire, i uniformitzar i estabilitzar el flux al moment de sortir, evitant la separació de flux (gruix de capa límit al mínim).

És recomanat que el rang de la longitud de contracció fluctuï entre 0.9 i 1.8 vegades el diàmetre d'entrada al col·lector. Un altre factor a tenir en compte és la relació de l'àrea d'entrada envers l'àrea de sortida (cambra de proves). Aquesta relació, o raó de contracció, es troba entre 6 a 9 per a túnels petits [2]. Situant el nostre con entre aquests valors, amb una **longitud de 450 mm** i una **àrea d'entrada de 0,1936 m<sup>2</sup>**.

x (mm)	h (mm)
0	220
45	218,80
80	211,89
135	197,17
180	175,56
225	150
270	124,44
315	102,83
360	88,11
405	81,20
450	80

Taula 3. Valors de les alçades de les cares interiors del perfil del con de contracció respecte l'eix horitzontal x.

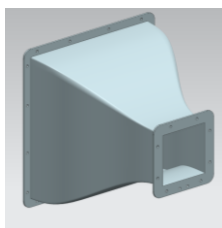


Figura 3. Con de contracció amb Siemens NX 10.

### 3.3 Cambra d'ajustos

Aquesta cambra, és un espai requerit per estabilitzar el flux, i és on s'alberguen les malles estabilitzadores i el direccionador de flux. La seva longitud recomanada és de 0.5 vegades el seu diàmetre hidràulic (440 mm) [2], per tant, tindrà una **longitud de 220 mm**.

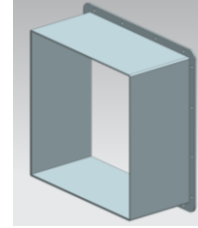


Figura 4. Cambra d'ajustos amb Siemens NX 10.

### 3.4 Malla estabilitzadora

La malla refracta el flux incident cap a la direcció normal local i redueix la intensitat de turbulència en tot el camp de flux. S'han triat uns valors de **diàmetre del filferro d'acer de 0,6 mm** i **ample de cel·la de 3 mm**, situant la porositat entre 0,5 i 0,8 [2].

### 3.5 Direccionador de flux

El direccionador o acondicionador de flux, més conegut com "Honeycomb" degut al seu tipus de disseny, és un panell que té com a objectiu proporcionar un flux espaiat, relativament uniforme i estable d'aire en la càmera de proves del túnel de vent.

Es recomana utilitzar cel·les amb una relació llarg-diàmetre de 6 a 8 i una porositat rondant el 0.8. A més, les cel·les haurien de ser entre 5 i 15 vegades més grans que les de la malla anteriorment col·locada [2].

Tenint en compte aquestes regles de disseny, es tria un direccionador de flux de **cel·les quadrades** amb una **amplada de cel·la de 15 mm**, un **gruix de paret d'1 mm** i una **profunditat de 90 mm**.

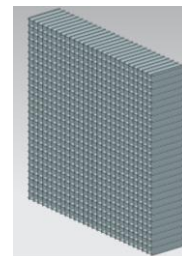


Figura 5. Direccionador de flux amb Siemens NX 10.

### 3.6 Anell d'entrada

La curvatura que ha de tenir l'admissió en l'anell d'entrada ha de estar entre 0,2 i 0,375 del diàmetre de la càmera d'estabilització [2]. Situant el nostre **gruix en 88 mm**.

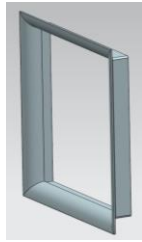


Figura 6. Anell d'entrada amb Siemens NX 10.

### 3.7 Difusor

El difusor és una part important del túnel de vent, doncs aquí el flux comença a perdre velocitat restituint la pressió. La reducció de la velocitat és necessària ja que el flux és expulsat al medi ambient, grans velocitats poden provocar càrregues considerables en els suports del túnel, a causa de l'efecte d'acció i reacció, i provocar alts nivells de soroll i vibració.

Els difusors són molt sensibles als errors de disseny, pot causar vibració al túnel, oscil·lació del ventilador i variació a la velocitat de la secció de proves.

Generalment, per al disseny dels difusors, s'utilitza el concepte d'angle d'obertura del difusor ( $2\theta_d$ ). Que és l'angle que fa un costat del perfil del difusor en relació amb l'altre costat del perfil. Aquest angle ha de situar-se entre  $4^\circ$  i  $7^\circ$ , sent convenient no superar els  $5^\circ$  [2].

A més, el difusor ha de tenir una longitud, com a mínim, de 3 vegades la longitud de la cambra de proves. I la relació d'àrees entre la entrada i la sortida normalment està situada aproximadament entre 2 i 3, sent els valors més petits els més desitjables.

Si tenim en compte les dimensions de la cambra de proves, si triéssim una **secció de sortida del difusor de 257 mm de diàmetre**, obtindriem una relació d'àrees entre la entrada i la sortida del difusor de 2,02, un valor baix i proper a 2. Una **longitud de 1,5 m** és més que suficient per complir el requisit de ser 3 vegades més llarg que la cambra de proves i situar al túnel de vent dintre de les limitacions de longitud [2]. Obtenint que  $2\theta_d$  seria  **$6,18^\circ$** , un valor dins del rang de  $4-7^\circ$ .

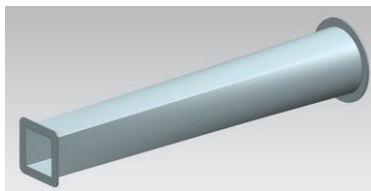


Figura 7. Difusor amb Siemens NX 10.

### 3.8 Pèrdues totals

Per tal de poder trobar un sistema de propulsió adient per al fluid que volem que circuli per l'interior del túnel de vent, haurem de calcular les pèrdues de càrrega que generen els diversos elements del túnel que afecten al flux.

Element del túnel	Pèrdua de càrrega		Percentatge
[1 unitat]	[mca]	[Pa]	[%]
Cambra de proves	0,71	8,38	33,73
Con de contracció	0,002	0,02	0,10
Cambra d'ajustos	0,003	0,04	0,14
Malla estabilitzadora	0,47	5,55	22,33
Direccionador de flux	0,08	0,92	3,8
Anell d'entrada	0,02	0,24	0,95
Difusor	0,82	9,7	38,96
Túnel de vent	2,1	24,9	100

Taula 4. Pèrdues de càrrega dels elements del túnel.

Amb aquests valors i l'equació de Bernouilli entre l'entrada i la sortida del túnel, es pot obtenir la corba característica del sistema.

### 3.8 Ventilador

El ventilador triat per aquest túnel de vent és el **HEPT/EW 25-2/H** del fabricant Sodeca. És un ventilador industrial axial helicoidal d'alta eficiència. S'ha escollit un ventilador axial per què tot i que no és el tipus de ventilador que dona més pressió, dona el cabal suficient per arribar a les velocitats de fluid objectiu a la cambra de proves. A més és fàcil d'instal·lar i de mantenir, de fet, és bastant utilitzat en aquests tipus de túnels de vent.

La seva corba característica de funcionament a les màximes revolucions (2850 rpm) ens la proporciona el fabricant:

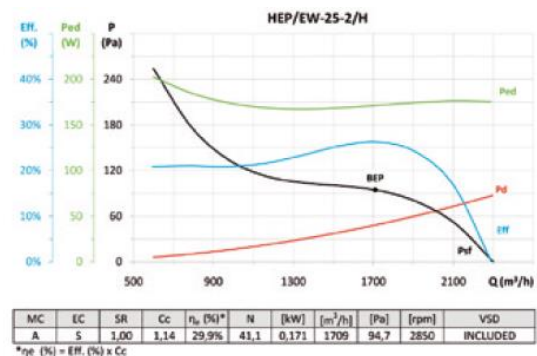


Figura 8. Corba característica del ventilador. [5]

Aproximant la corba característica del ventilador de la Figura 8, i combinant-la amb la corba de la instal·lació, obtenim el següent punt de funcionament a  $n = 2850$  rpm:

$$Q = 0,617 \text{ m}^3/\text{s} = 2221 \text{ m}^3/\text{h}; \quad H = 1,90 \text{ m}; \quad \eta \approx 10\%$$

### 3.9 Banc i unions

A causa que l'estructura no suportarà més càrrega que la del pes dels elements del túnel, no es considerarà el fer una anàlisi de càrrega estàtica per dimensionar l'estructura, amb un tub rodó d'alumini de 25 mm de diàmetre serà suficient.

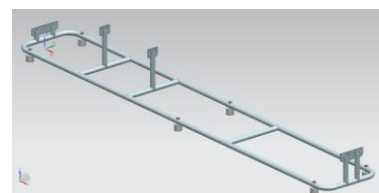


Figura 9. Banc amb Siemens NX 10.



Per collar els diferents elements del túnel s'utilitzaran cargols de mètrica 8, de diàmetre més que suficient per suportar el pes dels elements. A més, es col·locaran casquets de goma o "silentblocks" simètricament a la part inferior del banc per reduir l'efecte de les vibracions que pot provocar el ventilador.

Entre els elements, quedant per sobre de les plaques que uneixen els elements amb el banc, es col·locaran juntes de cautxú per evitar pèrdues de cabal.

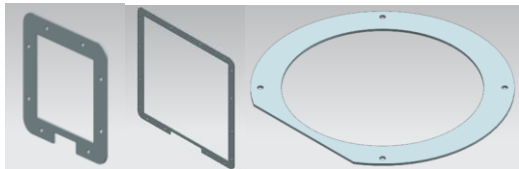


Figura 10. Els tres tipus de juntes (1, 2 i 3) amb Siemens NX 10.

### 3.10 Models

Com s'ha mencionat anteriorment, els models es realitzaran en impressió 3D, permetent una gran varietat de geometries. Tot i així, hauran de complir certs requisits: no superar 5,3 cm de diàmetre hidràulic per no sobrepassar el factor de bloqueig d'un 10% i han de tindre un forat de 0,5 o 0,6 cm de diàmetre, a la part posterior preferiblement o en un perfil, per encabir-hi el suport.

Per a les pràctiques de laboratori es poden utilitzar diferents tipus de models per així poder-los comparar:

- Semiesfera, esfera i esfera allargada
- Placa fina plana
- Naca
- Automòbils
- Projectils

Els perfils Naca, amb certa inclinació són els que afecten més al flux, obtenint forces de fins 1 N.

## 4. Simulació

Per a realitzar la simulació, primerament, s'ha realitzat un model del túnel de vent concorde al software que s'està utilitzant per simular el flux, en aquest cas Solidworks 2016. Aquest modelat és diferent del realitzat amb Siemens NX 10 (amb el qual s'han realitzat els plànols). Per a poder simular amb aquest programa, s'ha hagut de modelar el túnel de vent de forma que el programa reconegui fàcilment el volum d'aire que hi ha dins del túnel. Per limitacions de software i hardware, s'ha hagut de simular sense la malla estabilitzadora ni l'anell d'entrada.

### 4.1 Pre procés

En el pre procés, seleccionarem les condicions necessàries per simular de forma aproximada el funcionament del túnel de vent.

Primerament, a l'hora de crear el projecte de simulació, ens demanarà que seleccionem el sistema d'unitats (Sistema Internacional), el tipus d'anàlisi de flux (intern, el programa

buscarà un espai dins d'un sòlid), el fluid (aire) i el tipus de flux (laminar i turbulent) i introduir la rugositat del material, en aquest cas de 0,01 mm per la fibra de vidre i metacrilat. Tot seguit, indicarem al programa que les obertures del túnel estan a condicions atmosfèriques (pressió atmosfèrica i temperatura atmosfèrica).

S'ha de crear un volum on simularem el ventilador i introduïm les seves característiques.

Tot seguit prepararem la malla que permetrà al programa fer els càlculs de cada punt del túnel de vent. El Solidworks ens permet utilitzar una malla cúbica, establint-la en automàtic en màxima qualitat inicial 7 (les dimensions de la malla inicial depenen del sistema modelat) i amb un refinament de la malla de 9 (dividir la malla inicial en 4 cel·les 9 vegades).

Per últim, seleccionarem els resultats concrets "Goals" que volem aconseguir, com la velocitat màxima, la pressió màxima, etc.

### 4.2 Càlcul

El software Solidworks, a les zones de fluids resol les equacions de Navier Stokes, que són formulacions de les lleis de conservació de la massa i la quantitat de moviment. Aquestes equacions es complementen amb equacions d'estat fluid que defineixen la naturalesa del fluid i amb dependències empíriques de la densitat del fluid, la viscositat i la conductivitat tèrmica a temperatura.

### 4.3 Post procés

Una vegada l'ordinador hagi realitzat les iteracions necessàries per realitzar el càlcul de cada unitat del mallat, obtindrem diversos tipus de gràfiques per visualitzar els resultats. Les més importants són les de velocitat i vorticitat.

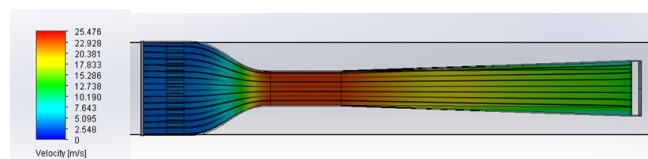


Figura 11. Simulació de la velocitat de flux amb Solidworks.

Com es pot observar en la figura 11, el rang de velocitats és aproximadament de **2,5 m/s a 25,5 m/s**, sent la velocitat més lenta del túnel a la cambra d'ajustos i la més ràpida a la cambra de proves, **millorant la velocitat objectiu en 5,5 m/s**.

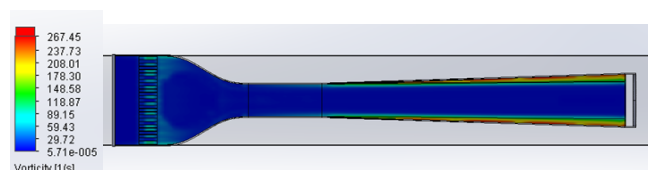


Figura 12. Simulació de la vorticitat de flux amb Solidworks.

La vorticitat és una magnitud física que s'utilitza per quantificar la rotació d'una partícula d'un fluid. En la figura 12 es veu que la major part del túnel és de color blau fosc, indicant que **la vorticitat és de  $5,7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , un valor molt petit**, confirmant-nos que les **línies de flux són realment rectes i uniformes**, aconseguint una bona qualitat de flux en el centre de la cambra de proves on se situaran els models.

Es pot veure un augment de la vorticitat en les parets del difusor, a mesura que el flux s'apropa al ventilador i una mica en el direccionador de flux. També es pot observar un petit augment de la vorticitat a les parets de la cambra de proves, això és degut al despenjament de la capa límit

## 5. Sistema de mesurament i calibració

En el nostre cas, utilitzarem una balança externa per mesurar les forces de resistència, sustentació i càrrega aerodinàmica o *Downforce*.

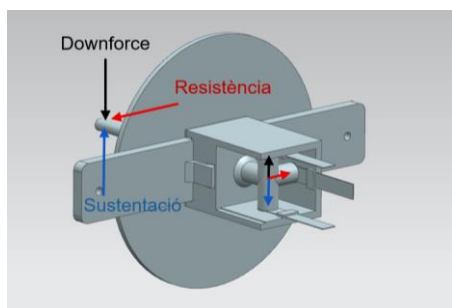


Figura 13. Transmissió de forces als sensors.

Es necessita un sensor de força per resistència (FSR) per convertir la força exercida sobre el model, a un senyal mesurable i quantificable. A més d'altres elements per fer funcionar aquests sensors. El llistat d'elements electrònics és el següent:

- 3 sensors RFP 602 (FSR)
- 3 amplificadors operacionals LM324
- 3 resistències de 47 kΩ
- 1 placa Arduino Uno
- 1 pantalla LCD HD44770
- 1 potenciòmetre de 100 kΩ
- 1 polsador
- 3 connectors Faston
- Cablejat

La placa Arduino llegirà els valors proporcionats pels sensors i els mostrarà en la pantalla LCD en unitat de Newtons.

A més, s'utilitzarà un potenciòmetre per calibrar els sensors i un polsador per iniciar/parar la recepció de dades.

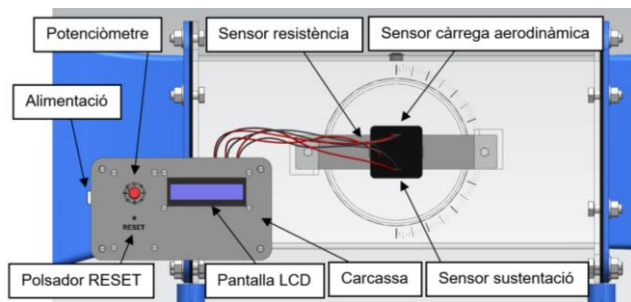


Figura 14. Elements del sistema de mesurament.

Per realitzar la calibració i conèixer la velocitat del flux per cada velocitat de gir del ventilador, s'utilitzarà un anemòmetre de fil calent com el PCE-423 de PCE-Iberica, introduint-lo pels forats de calibratge de la cambra de proves.

## 6. Pressupost

Una vegada tenim totes les parts del túnel de vent definides, des de les parts mecàniques fins les electròniques. Cal realitzar un estudi del pressupost que es necessitaria per fabricar o comprar totes aquestes parts i analitzar la viabilitat econòmica de la proposta, comparant-ho amb les alternatives que hi ha al mercat.

PRESSUPOST				
Parts Mecàniques	nº ut	Material	Cost [€]	Fabricant
Cambra de proves*	1	Metacrilat	399,42	Ferplast
Difusor	1	Fibra de vidre	450	-
Con de contracció	1	Fibra de vidre	420	-
Cambra d'ajustos	1	Fibra de vidre	160	-
Malla	1	Acer	4,16	Bastimallas
Direccionador de flux	1	Fibra de vidre	300	-
Anell entrada	1	Fibra de vidre	200	-
Balança	1	PLA/ABS	4,23	Impressió 3D**
Banc	1	Alumini	500	-
Suport ventilador	1	Fibra de vidre	220	-
Junta tipus 1	2	Cautxú	80	-
Junta tipus 2	1	Cautxú	60	-
Junta tipus 3	1	Cautxú	40	-
<b>Subtotal Parts Mecàniques:</b>			<b>2838,47</b>	
<b>Subtotal Elements d'unió i Altres (Mec.):</b>			<b>58,14</b>	
Elements Elèctrics i Electrònics	nº ut	Material	Cost [€]	Fabricant
Ventilador + variador de velocitat	1	-	786,9	Sodeca
<b>Subtotal Elements Elèctrics i Electrònics:</b>			<b>994,94</b>	
<b>Subtotal Elements d'unió i Altres (Electr.):</b>			<b>15,568</b>	
Cost d'assemblatge	6h	-	118,5	-
Honoraris del dissenyador	10%	-	390,71	R.Inglés
<b>TOTAL:</b>			<b>4416,33</b>	

Taula 5. Cost de fabricació del túnel de vent (elements principals).

\*Inclou la porta de la balança (32,1 €).

\*\*Cost del plàstic que caldria per fer la peça.

Els valors de la Taula 5 són aproximats, poden variar segons on es comprin les peces i segons la empresa que es contracti per fabricar les peces personalitzades.

El principal avantatge respecte els altres túnels de vent equivalents que hi ha al mercat, és el baix pes i el preu, que és més de 9 vegades inferior al del túnel Armfield C2, el més car dels que tenim dades.

Per estar a l'alçada dels túnels d'Armfield, s'hauria de millorar la balança, afegint sensors i altres accessoris que permetin ampliar el seu ús.

## 7. Experimentació amb el túnel de vent

S'ha realitzat un exemple de pràctica de laboratori on es mesuraran les forces de resistència i sustentació de diferents models per trobar els respectius coeficients de resistència i sustentació. La pràctica inclou:

- Introducció
- Definició de la instal·lació
- Objectiu
- Consideracions teòriques
- Metodologia experimental
- Resultats

## 8. Gestió del “End of Life”

Una vegada finalitzi la seva vida útil (end of life), aquest túnel de vent esdevindrà un residu. Com que el formen diferents materials, per a una correcta gestió, s'hauran de separar les parts de cada material. Intentant que es reciclin les parts reciclables i gestionar de la millor forma possible les no reciclables.

Per aquest anàlisi es tindrà en compte que el túnel de vent s'utilitzarà a Vilanova i la Geltrú i el residu generat també es gestionarà en la mateixa zona. **Segons l'Agència de Residus de Catalunya, com que és un residu d'una institució que no es considera industrial (l'EPSEVG), es situa en la categoria de residus municipals.** La principal gestora de residus municipals de Vilanova i la Geltrú és la Deixalleria Punt Net.

## 8. Legislació

Les màquines especialment dissenyades i fabricades amb vista a la investigació per ús temporal en laboratoris, on se situaria el túnel de vent proposat en aquest treball, es situen en l'àmbit legislatiu del **Reial Decret 1215/1997**.

## 9. Avaluació de riscos

Per a quantificar el nivell de risc, s'utilitzaran dos paràmetres, la possibilitat que succeeixi un incident i la magnitud de l'incident, establint les seves magnituds del 1 al 5 i multiplicant-los per obtenir el resultat de risc.

Els resultats obtinguts, situen el túnel de vent en un rang de risc baix, tot i que en cremades en el muntatge i en la contaminació acústica de l'ús s'apropa al risc moderat, estant 1 i 2 nivells per sota, respectivament.

S'ha de tenir en compte que aquest anàlisi pot ser molt subjectiu, sobretot essent un treball sense experimentació real.

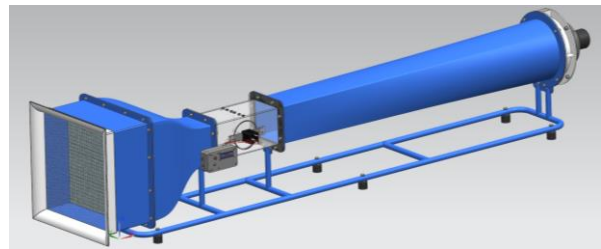
## 10. Manuals d'assemblatge, operació i manteniment

Els manuals d'assemblatge, operació i manteniment, descriuen aquests processos amb l'ajuda d'imatges del túnel

de vent i simbologia per representar els punts més crítics, per tal de reduir el màxim possible els riscos.

## 10. Conclusions

S'ha dissenyat un túnel de vent per docència, apte per l'ús en el laboratori de la universitat, seguint les limitacions establertes al principi del projecte, que permet la realització de **proves aerodinàmiques en models a escala reduïda i realitzats amb impressores 3D**.



*Figura 15. Túnel de vent proposat amb Siemens NX 10.*

Amb l'objectiu d'aconseguir un **flux de qualitat** amb una certa velocitat especificada, s'ha buscat reduir les dimensions, el pes i, amb això, el cost.

Amb el disseny realitzat s'ha aconseguit:

- Millorar la velocitat de flux que s'havia fixat en un principi de 20 m/s a poc **més de 25 m/s**.
- **No sobrepassar els 3 metres de llargada.**
- Un **pes** de aproximadament **50 kg**, inferior al dels túnels equivalents comercials.
- Un **cost d'entre 6-9 vegades inferior** als túnels de vent comercials de característiques semblants.

Tot i que, en l'apartat on es defineixen les limitacions del projecte, s'ha especificat que no es realitzaria un estudi exhaustiu de la part electrònica, és un punt a millorar del túnel proposat, deixant oberta una proposta de treball de fi de grau per un alumne d'electrònica que vulgui millorar els elements electrònics i ampliar el rang d'aplicacions del túnel proposat, utilitzant-lo com a base.

## 10. Bibliografia

- [1] QUISPE, C.A., URCUHUARANGA W.J., CHIROQUE J.E. Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades. *Revista de Investigación de Física* 17, 2014, p1-10.
- [2] BARLOW, J. Low-speed tunnel testing. New York, Editorial John Wiley & Sons, 1999 p1-300.
- [3] MONGE-GAPPER, J.G. Concepto para un túnel de viento con vórtice variable. Vol. 8, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, 2015, p33-40.
- [4] CORONEL, J.F., MARTÍN L. Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de transmisión de calor. Universidad de Sevilla, 2016, p9.
- [5] Annex C Especificacions tècniques d'elements del túnel.