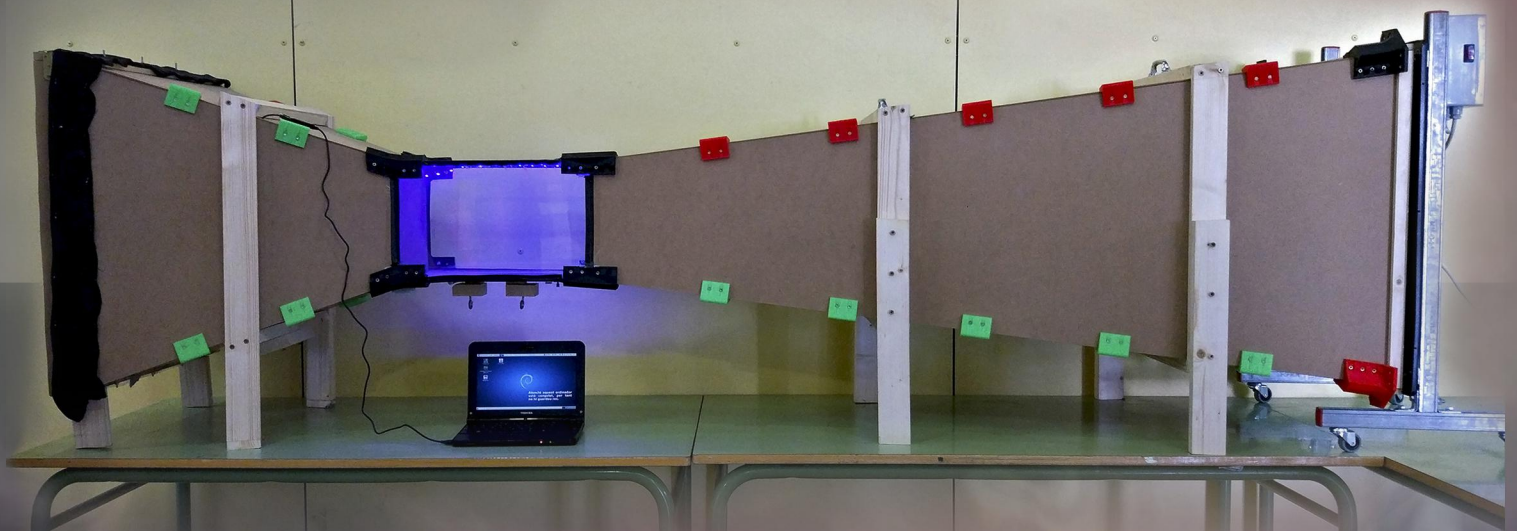


PROTOTIP D'UN TÚNEL DE VENT

Estudi, construcció i experimentació d'un prototip de túnel de vent



Un projecte qualificatiu
fet per alumnes
de Batxillerat


Des de l'abril del 2016 fins al gener del 2017




AVÍS

Aquest informe va ser preparat com un treball de recerca. Ni el centre ni cap membre seu, ni cap dels autors d'aquest informe, fa cap garantia, explícita o implícita, ni assumeixen cap responsabilitat legal o responsabilitat per l'exactitud, completesa o utilitat de qualsevol informació, aparell, producte o procés, ni assegura que el seu ús no infringiria els drets de propietat privada. Les referències a un producte comercial específic, procés o servei per nom comercial, marca registrada, fabricant, o d'altra manera no necessàriament constitueix ni implica el seu suport, recomanació o preferència per part dels autors.

Disponible electrònicament a https://www.dropbox.com/s/ayl0olx70xg4bpr/TDR_TDV.pdf?dl=0

 windtunnelins@gmail.com

 [@windtunnelins](https://www.instagram.com/windtunnelins)



RESUM

Els túnels de vent són unes instal·lacions en forma de tub per on passa el vent amb una velocitat determinada. Els científics i enginyers col·loquen un objecte dins el túnel i després estudien la forma amb què es mou l'aire al voltant del model. En observar com actua el cos dins el túnel, aconseguixen una idea precisa de com un avió de mida real volarà a l'atmosfera o com un vehicle perdrà rendiment per culpa de l'aire. És molt més senzill, més barat i més segur construir i provar un model que construir i fer volar un avió real.

Aquest informe es centrarà principalment en el disseny, la construcció i l'assaig pràctic d'un túnel de vent subsònic de cicle obert en el qual les propietats del flux poden ser mesurades i representades. Els components que intervenen en la construcció d'aquest túnel de vent seran presentats i acompanyats de comentaris i explicacions sobre els processos físics més adequats per la construcció. El temari de treball inclou tots els fonaments en els quals es basa aquest túnel, ja siguin físics, matemàtics o tecnològics. A més d'obtenir una major comprensió de l'aerodinàmica i la importància dels túnels de vent, el principal objectiu del nostre projecte és aprendre el procés que els enginyers passen per investigar, analitzar i solucionar els problemes científics i matemàtics en la nostra societat.

Aquest projecte crea una nova instal·lació que es pot utilitzar per a la investigació i l'ensenyament en un futur i pot servir de guia per qualsevol estudiant que desitgi ampliar els seus coneixements científics.



Índex

RESUM.....	3
LLISTA DE SÍMBOLS.....	8
LLISTA D'ABREVIATURES.....	9
1. Introducció.....	10
1.1 Agraïments.....	10
1.2 Motivacions personals.....	11
1.3 Objectius.....	12
1.4 Estructura del treball.....	13
2. Aerodinàmica.....	14
2.1 Què és l'aerodinàmica?.....	14
2.2 L'aire.....	14
2.3 Les forces.....	15
2.3.1 Empenyiment i resistència aerodinàmica.....	15
2.3.2 Pes i sustentació.....	17
2.4 Principi de la continuïtat i principi de Bernoulli.....	18
2.5. Nombre de Reynolds.....	19
3. Túnel de vent.....	20
3.1 Història dels túnels de vent.....	20
3.2 Què és un túnel de vent?.....	24
3.2.1. Túnel del vent.....	24
3.2.2. Classificacions del túnels.....	26
4. Disseny.....	29
4.1 Recerca d'informació.....	29
4.1.1 Forma i optimització de l'estructura.....	30
4.2 Esquemes i plànols.....	32
4.3 Parts del túnel.....	36
4.3.1 Ventilador.....	36
4.3.2 Col·lector i difusor.....	39
4.3.3 Laminador.....	41
4.3.4 Zona de test.....	42
5. Materials i pressupost.....	48
6. Construcció.....	52
VENTILADOR.....	52
DIFUSOR, COL·LECTOR I LAMINADOR.....	53
ZONA DE TEST.....	54
SUPORTS, REFORÇOS I UNIONS.....	56
PROTOTIP DE TÚNEL DE VENT ACABAT.....	57
7. Funcionament del túnel.....	58
7.1 Utilització de l'eina.....	58
7.2 Dades del prototip.....	59
8. Experimentació.....	61
Pràctica 1: El coeficient aerodinàmic en cossos geomètrics.....	62
Pràctica 2: L'aerodinàmica en objectes quotidians.....	66
Pràctica 3: Com volen els avions?.....	70
9. Conclusions i valoracions.....	73
10. Bibliografia i webgrafia.....	75



Índex d'il·lustracions

Il·lustració 1: Mostra de les quatre forces que actuen en un avió.....	14
Il·lustració 2: Comparació de la resistència aerodinàmica segons la forma del vehicle.....	15
Il·lustració 3: Mostra de la FRA en vertical.....	15
Il·lustració 4: Exemples d'objectes que generen sustentació.....	16
Il·lustració 5: Perfil d'un túnel de vent.....	17
Il·lustració 6: Comparació de flux laminar a turbulent.....	18
Il·lustració 7: Esquema del braç giratori	19
Il·lustració 8: Braç giratori de Cayley.....	20
Il·lustració 9: Evolució dels primers planadors.....	20
Il·lustració 10: Primer túnel de vent construït per Herbert Wenham	21
Il·lustració 11: Flyer I.....	21
Il·lustració 12: Sebastià Kienle al túnel de vent de Mercedes-Benz.....	23
Il·lustració 13: Experimentació d'una pilota.....	24
Il·lustració 14: Experimentació de les forces aerodinàmiques que afecten els edificis.....	24
Il·lustració 15: Experimentació de la sustentació en un perfil d'ala d'avió.....	24
Il·lustració 16: Esquema del funcionament d'un túnel de vent de cycle obert	25
Il·lustració 17: Esquema del funcionament d'un túnel de vent de cycle tancat.....	25
Il·lustració 18: Experimentació d'un avió comercial en un TDV subsònic.....	26
Il·lustració 19: Experimentació d'un prototip en un TDV supersònic.....	26
Il·lustració 20: TDV que utilitza aire i fum.....	26
Il·lustració 21: Túnel que utilitza l'aigua com a fluid.....	26
Il·lustració 22: Fotografies d'un túnel de vent vertical.....	27
Il·lustració 23: Funcions de cada part d'un túnel de vent de cycle obert.....	28
Il·lustració 24: Captures de pantalla de l'aplicació per calcular les mides del TDV.....	29
Il·lustració 25: Angle de diferència del difusor i la llarga determinada.....	30
Il·lustració 26: Esquema de l'estructura mostrat per l'aplicació.....	30
Il·lustració 27: Plànol de les parets del col·lector i el difusor.....	32
Il·lustració 28: Representacions 3D del col·lector i el difusor.....	33
Il·lustració 29: Disseny en 3D més representatiu de tota l'estructura del túnel de vent.....	34
Il·lustració 30: Parts del túnel de vent.....	35
Il·lustració 31: Extractor HCFB/4-560-H.....	36
Il·lustració 32: Les mides (en mm) del ventilador.....	36
Il·lustració 33: Imatge de les instruccions de la connexió.....	36
Il·lustració 34: Esquema elèctric de les connexions del regulador de voltatge	37
Il·lustració 35: Dades tècniques del fabricant del regulador de voltatge.....	37
Il·lustració 36: Estructura metàl·lica en forma de T invertida.....	37
Il·lustració 37: Ventilador arpenjat perfectament sobre l'estructura.....	37
Il·lustració 38: Esquema del col·lector i el difusor i com es comporta l'aire.....	38
Il·lustració 39: Col·lector muntat en forma de tronc de piràmide de base quadrada.....	39
Il·lustració 40: Peça dissenyada.....	39
Il·lustració 41: Reforços + Suports del difusor.....	40
Il·lustració 42: Parts del laminador.....	41
Il·lustració 43: Unió difusor-ZDT.....	42
Il·lustració 44: Unió difusor-ZDT (II)	42
Il·lustració 45: Unió col·lector-ZDT.....	43
Il·lustració 46: Unió col·lector-ZDT (II)	43
Il·lustració 47: Zona de test totalment acabada.....	44
Il·lustració 48: Sistema de sensors de les forces horitzontals.....	44
Il·lustració 49: Sistema de sensors de les forces verticals.....	44
Il·lustració 50: Il·luminació de la zona de test per visualitzar el fum	45



Il·lustració 51: Làmines de plàstic poliestirè (PS).....	46
Il·lustració 52: Estructura del ventilador	50
Il·lustració 53: Connexió motor.....	50
Il·lustració 54: Regulador de voltatge.....	50
Il·lustració 55: Unió del ventilador al túnel.....	51
Il·lustració 56: Marcar i foradar.....	51
Il·lustració 57: Muntar col·lector i difusor.....	51
Il·lustració 58: Marc del laminador.....	51
Il·lustració 59: Palletes del laminador.....	51
Il·lustració 60: Reforç del laminador.....	52
Il·lustració 61: Foradar i tallar les làmines.....	52
Il·lustració 62: Unió de làmines	52
Il·lustració 63: Base de la ZDT.....	52
Il·lustració 64: Porta de la ZDT.....	53
Il·lustració 65: Sistema de sensors exteriors.....	53
Il·lustració 66: Sistema de sensors interiors.....	53
Il·lustració 67: Il·luminació.....	53
Il·lustració 68: Reforç difusor i col·lector.....	54
Il·lustració 69: Suport difusor col·lector	54
Il·lustració 70: Unió ventilador-difusor.....	54
Il·lustració 71: Unió ZDT col·lector/difusor.....	54
Il·lustració 72: Unió col·lector-laminador.....	55
Il·lustració 73: Tapar orificis.....	55
Il·lustració 74: Ordinador i MultiLog.....	55
Il·lustració 75: Prototip acabat	55
Il·lustració 76: Passos a seguir per experimentar amb el TDV.....	56
Il·lustració 77: Gràfic velocitat de l'aire – Posició RDF.....	57
Il·lustració 78: Cossos geomètrics vistos des d'on impacte el flux de l'aire.....	60
Il·lustració 79: Cossos geomètrics impresos en 3D.....	61
Il·lustració 80: Col·locació de l'objecte dins la ZDT.....	61
Il·lustració 81: Gràfics Força/Velocitat de l'aire.....	62
Il·lustració 82: Comparativa de coeficients aerodinàmics dels cossos geomètrics.....	63
Il·lustració 83: Pilotes de diferents tipus.....	64
Il·lustració 84: Vehicles de joguina de diferents tipus.....	64
Il·lustració 85: Gràfic comparatiu de la força que rep cada pilota.....	65
Il·lustració 86: Esquema comparatiu de les mides de les pilotes.....	65
Il·lustració 87: Explicació gràfica del comportament d'una pilota de golf a l'aire.....	66
Il·lustració 88: Comparativa dels ca dels diferents vehicles.....	66
Il·lustració 89: Angle d'atac d'una ala.....	69
Il·lustració 90: Perfil d'ala imprès en 3D.....	69
Il·lustració 91: Sustentació segons l'angle d'atac.....	70
Il·lustració 92: Sustentació segons l'existència de velocitat.....	70



LLISTA DE SÍMBOLS

v	Velocitat
D	Diàmetre
\varnothing	Diàmetre
m	Metres
m	Massa
cm	Centímetres
mm	Milímetres
p	Pes
P	Pressió
Pa	Pascals
kg	Quilograms
ρ	Densitat
A	Àrea
A	Ampers
A_f	Àrea frontal
C_a	Coeficient aerodinàmic
F	Força
N	Newtons
g	Acceleració de la gravetat
Re	Nombre de Reynolds
h	Altura
h	Hores
k	Constant
s	Segons
W	Watts
dB	Decibels



LLISTA D'ABREVIATURES

INS	Institut
TDR	Treball De Recerca
TDV	Túnel De Vent
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ZDT	Zona De Test
USB	Bus Sèrie Universal
SKP	SketchUp
IMG	Imatge
MDF	Medium Density Fibreboard
DM	Densitat Mitjana
PVC	Clorur de polivinil
PC	Policarbonat
PMMA	Polimetilmetacrilat
PS	Poliestirè
MW	MW Materials World



1. Introducció

1.1 Agraïments

Els autors volen expressar el seu sincer agraïment pel suport facilitat durant el desenvolupament del projecte a les següents persones:

- Al tutor del projecte. Agrair-li el seguiment del projecte, les valoracions, el material proporcionat i l'aportació d'idees necessàries per obtenir el resultat final.
- A les famílies. Agrair el material proporcionat, el pressupost per poder comprar tot el que ha calgut i la paciència i el suport durant les diferents etapes del TDR.
- Als professors de l'institut. Agrair-los les consultes que els hem fet per petites que fossin i la bona col·laboració i implicació en el treball que han mostrat tots. Agraïment especial al professor de química per deixar utilitzar l'equip de sensors de força de l'institut i al professor de física per l'anemòmetre. Tant un aparell com l'altre han estat molt útils.
- A la direcció de l'institut i a consergeria. Agrair a la direcció que ens deixessin un espai per col·locar el túnel de vent i permetre'ns venir a treballar-hi fora de l'horari de l'institut. Agrair a les conserges per la paciència que han tingut amb nosaltres proporcionant-nos tot el material que ens feia falta.
- Als companys de classe per facilitar-nos el material d'experimentació i per oferir l'ajuda en qualsevol moment.



1.2 Motivacions personals

Aquest treball de recerca, tot i ser de l'àmbit tecnològic, té una gran part de la branca científica, concretament de la física. De fet, aquest va ser un dels principals atractius del treball: que es combinessin les nostres dues assignatures preferides.

En aquest treball, la part física que s'ha de treballar no es troba en el temari de batxillerat. S'han d'estudiar certs aspectes del camp de mecànica de fluids, més concretament de l'aerodinàmica, una disciplina de la qual tothom ha sentit a parlar però que no es coneix com funciona exactament. S'ha trobat molt interessant poder estudiar sobre aquest tema.

Pel que fa a la part tecnològica, es tenia clar des d'un principi que el treball de recerca a realitzar havia de consistir en construir alguna cosa. En els anys que es porta fent tecnologia a l'institut no s'ha pogut crear cap gran projecte a causa de les poques hores de què es disposava per invertir-hi. El treball de recerca ha estat l'excusa perfecta per dur a terme un projecte seriós, llarg i, sobretot, independent, ja que s'ha pogut escollir lliurement en qualsevol etapa del treball què és el que es preferia fer sense haver de seguir cap pauta. Per tant, la creativitat pel que fa a la solució de problemes tècnics, també ha estat un aspecte motivador a l'hora de fer el treball.



1.3 Objectius

Aquest treball de recerca consisteix en la construcció d'un prototip de túnel de vent funcional i, posteriorment, poder experimentar-hi. Els objectius concrets són els següents:

- Construcció del prototip de túnel de vent.
- El túnel de vent ha de ser funcional i útil. És a dir, un cop acabat s'ha de poder treballar -hi per ser utilitzat com a eina d'investigació.
- Extreure dades numèriques del túnel. En la majoria de prototips de TDV vistos a internet no s'extreu cap tipus de dada sobre forces aerodinàmiques. Un dels principals objectius és poder extreure dades mitjançant aparells amb les quals poder treballar després.
- Poder estudiar el moviment de l'aire dins el túnel visualment. És a dir, utilitzar alguna tècnica per crear fum i poder observar els fluxos d'aire.
- Obtenir coneixements bàsics sobre aerodinàmica. L'aerodinàmica és la ciència en la qual es basen els túnels de vent.
- Aprendre a treballar de forma autònoma.
- Aprendre a utilitzar i a treballar moltes eines i materials amb els quals no s'està familiaritzat.



1.4 Estructura del treball

Aquest treball consta de tres grans parts: la recerca d'informació, la part tecnològica de construcció i la part experimental.

Pel que fa a la recerca d'informació, ha estat essencial des del primer moment. Abans de poder començar a treballar en res s'ha hagut d'invertir moltes hores a informar-se, ja que aquest és un tema completament nou i desconegut per nosaltres. Ha calgut informar-se sobre els túnels de vent i el seu funcionament. Referent a aquest apartat, ha calgut recercar molt sobre la ciència dels túnels i totes les propietats físiques que hi tenen a veure. Els apartats d'aerodinàmica (2), dels túnels de vent (3) i de disseny (4) formen part de la recerca d'informació.

La part tecnològica comença un cop s'ha dissenyat com s'ha de fer el prototip. En aquesta part és en la que més hores s'ha invertit. De fet, per construir el TDV s'han estat unes 250 hores. En la memòria escrita, en l'apartat de construcció (5) s'expliquen els procediments pas a pas que s'han seguit a l'hora de construir el túnel. A continuació hi ha un apartat sobre el material i el pressupost (6). Per acabar, s'explica com funciona el túnel i les dades que se'n poden obtenir (7).

Finalment, l'experimentació ha sigut l'última part del projecte (8). En aquest apartat s'han realitzat tres pràctiques físiques referents a l'aerodinàmica mitjançant la utilització del túnel.

Un cop acabades les tres parts, hi ha les conclusions, les valoracions i la bibliografia i webgrafia del treball.



2. Aerodinàmica

Aquest treball està basat en un seguit de conceptes físics que pertanyen a l'aerodinàmica. Abans de començar ha calgut informar-se i documentar-se sobre aquesta disciplina, ja que no ha estat treballada mai en el temari de física de l'institut. A continuació hi ha un seguit de conceptes sobre l'aerodinàmica indispensables per seguir amb el treball.

2.1 Què és l'aerodinàmica?

L'aerodinàmica és una branca de la física de la mecànica de fluids. L'aerodinàmica consisteix en l'estudi del moviment dels gasos, normalment, respecte a un cos sòlid. El principal objecte d'estudi són les forces provocades pel gas sobre un cos quan aquests dos es troben en un moviment relatiu entre ells.

L'aerodinàmica troba la seva principal aplicació en l'aeronàutica (qualsevol objecte volador) i en el disseny d'automòbils amb l'objectiu d'evitar al màxim la fricció de l'aire en altes velocitats.

L'estudi de l'aerodinàmica és força complex perquè, quan un fluid interactua amb un sòlid no aplica tota la seva força en un sol punt del cos (com passaria en un xoc entre dos sòlids), sinó que s'aplica a tota la superfície de l'objecte. Per tant, tot i que totes les forces poden ser estudiades i són predictibles, l'experimentació pràctica és molt utilitzada en aquest camp i una de les eines més útils per dur-la a terme són els túnels de vent. L'estudi matemàtic de les forces aerodinàmiques és molt complex i inclou la utilització d'eines matemàtiques d'alt nivell.

2.2 L'aire

El gas més estudiat en l'aerodinàmica és l'aire que es troba dins l'atmosfera. A causa de les aplicacions pràctiques que té aquesta disciplina, és normal que s'estudiï el gas amb què interactuen els objectes que es volen millorar respecte a la seva aerodinàmica.

L'aire és una mescla de gasos. Principalment, està format de nitrogen en un 78% i d'oxigen en un 21%. L'1% restant està format d'aigua, diòxid de carboni, argó i altres...

En condicions normals i al nivell del mar, la densitat de l'aire és d' $1,205\text{kg/m}^3$ (unes mil vegades més petita que la de l'aigua). Aquesta densitat varia en funció de l'alçada respecte al nivell del mar i disminueix fins a sortir de l'atmosfera, on és nul·la.

La pressió de l'aire, la temperatura o la velocitat seran altres factors molt importants a tenir en compte en l'estudi del gas. Pel que fa a la velocitat, on el moviment és relatiu, es podrà treballar en aire "parat" pel qual un cos sòlid es mou o en aire en moviment (vent) i el cos quiet.



2.3 Les forces

Quan un cos es mou a través d'un fluid (l'aire en el nostre cas) o viceversa apareixen dues forces principals: la resistència aerodinàmica i la sustentació. Aquestes dues forces són el principal objecte d'estudi de la disciplina física.

Per tant, qualsevol objecte que es mogui en moviment constant horitzontalment dins l'atmosfera experimentarà quatre forces vectorials: l'empenyiment, la resistència aerodinàmica, el pes i la sustentació. Excepte el pes, totes són forces mecàniques, és a dir: necessiten la interacció de matèria (en estat gas, líquid o sòlid) per aparèixer.



Il·lustració 1: Mostra de les quatre forces que actuen en un avió a velocitat constant (Font: Langley Flying School)

2.3.1 Empenyiment i resistència aerodinàmica

L'**empenyiment** és la força que fa avançar un objecte o un cos. En el cas dels vehicles s'aconsegueix gràcies a un motor. En un moviment rectilini uniforme, on la velocitat és constant, aquesta força només seria necessària en l'inici del recorregut per agafar certa velocitat que posteriorment es mantindria si es treballés en condicions ideals.

A la Terra, aquesta situació no es compleix i, a causa de l'existència de les forces de fricció, l'empenyiment ha d'estar present en tot el procés de moviment o l'objecte quedaria aturat.

Les forces de fricció són les que, mitjançant el contacte, actuen en sentit contrari al moviment causant un impediment a l'inici del moviment o reduint-lo un cop ha començat. La força de fricció més comuna és el fregament produït quan un sòlid es mou a través d'una superfície.

La **resistència aerodinàmica** és, doncs, una força de fricció. Aquesta força actua quan apareix moviment relatiu entre un sòlid i l'aire.

Hi ha molts factors que afecten la resistència que oposa l'aire al moviment. Referent a l'aire, la seva **densitat** (ρ) afectarà la força de fricció, un increment de densitat del gas implicarà un augment proporcional de la força. La **velocitat relativa** (v) entre l'objecte i el fluid també és molt



important. De fet, no és fins a velocitats molt elevades on la resistència aerodinàmica es té en compte a l'hora d'estudiar el moviment de vehicles.

Pel que fa al cos, l'àrea frontal (A_f) per on "impacta" el fluid també s'ha de tenir en compte. Finalment, la forma del cos és, també, un dels factors a estudiar. A l'hora de calcular la resistència aerodinàmica s'utilitza el **coeficient aerodinàmic** (c_a) que és el que té en compte la forma. Aquest coeficient es troba experimentalment i varia cada cop que la direcció de moviment respecte el cos i el fluid canvia.

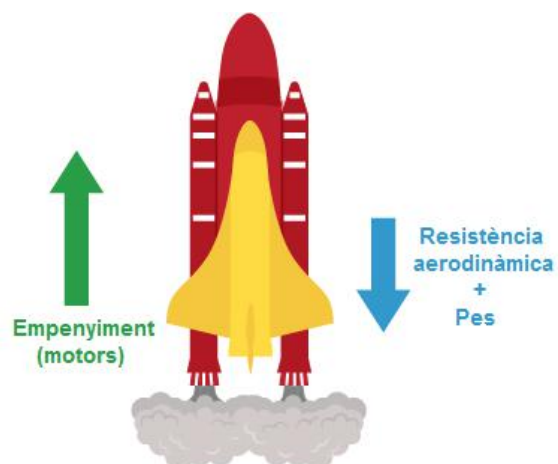


Il·lustració 2: Comparació de la resistència aerodinàmica segons la forma del vehicle (Font: pròpia)

Tots aquests factors estan relacionats mitjançant una fórmula física que ens permet predir la força de la **resistència aerodinàmica** (F_{RA}) que s'obté en casos concrets. També és molt utilitzada per trobar el coeficient aerodinàmic quan es coneix la força efectuada al cos.

$$F_{RA} = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot c_a \cdot A_f \cdot \rho$$

L'empenyiment i la resistència de l'aire sempre apareixen en la mateixa direcció (la del moviment) però en sentits oposats. Tot i que normalment es representa en horitzontal, en qualsevol altre tipus de moviment també és vàlid. En el cas de la imatge, la resistència aerodinàmica, juntament amb el pes, van en contra el moviment de la nau en vertical.



Il·lustració 3: Mostra de la F_{RA} en vertical (Font: Viquipèdia)



2.3.2 Pes i sustentació

El **pes** és la força amb què la gravetat terrestre atreu els cossos cap al centre de la Terra. Per tant, segons diu la segona llei de Newton: el pes (P) dependrà proporcionalment de la **massa** (m) i l'**acceleració de la gravetat** (g) en el lloc on ens trobem. Per altures baixes respecte el nivell del mar es treballarà la gravetat amb la constant de $9,807\text{m/s}^2$.

$$P = m \cdot g$$

Com que el vector del pes sempre es dirigeix cap al centre de la terra, serà l'única força que afecta el moviment que mai variarà en direcció i sentit independentment de la trajectòria del cos.

Finalment, la **sustentació** és una força aerodinàmica que es crea quan un cos es mou a través d'un fluid. Apareix perpendicularment a la velocitat relativa del cos respecte al gas. La sustentació és la força que permet que certs cossos s'aguantin en l'aire sense caure a causa de l'acció del pes.

Els factors que intervenen en la sustentació són l'existència d'un fluid pel qual es mogui el cos (generalment un gas) i el moviment relatiu. L'existència d'un fluid és necessària perquè la sustentació és una força mecànica (creada a partir de la interacció de matèria). Així, per exemple, un cos fora l'atmosfera o en el buit no pot generar sustentació. La velocitat de l'objecte respecte al gas o viceversa també és indispensable per la creació de sustentació, ja que aquesta força es crea a partir de les diferències en velocitat del gas.

L'exemple més clar de la força de sustentació el trobem en els avions entre d'altres. La força que aguanta els avions i permet que s'elevin en l'aire o que no caiguin durant la trajectòria és la sustentació.



Il·lustració 4: Exemples d'objectes que generen sustentació suficient com per mantindre's en l'aire. Un avió de paper a l'esquerra, una ala delta a la dreta (Font: Pixabay)



2.4 Principi de la continuïtat i principi de Bernoulli

El principi fonamental en què es basa el funcionament d'un túnel de vent és el principi de la continuïtat. Aquesta equació és aplicable a qualsevol fluid circulant dins un conducte (suposant que no hi ha pèrdues):

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

El principi de l'equació ens diu que el producte de l'àrea del conducte (A) i la velocitat del fluid (v) dins seu és una constant que sempre es manté. Per tant, al reduir la secció d'un conducte la velocitat del fluid augmenta proporcionalment dins seu. És d'aquesta manera com s'aconsegueixen grans velocitats a la zona d'experimentació dels TDV, ja que aquesta és la que té l'àrea més petita de tot el túnel.

D'aquest principi se'n deriva el principi de Bernoulli. Aquest segon principi també té a veure amb la conservació de l'energia dins d'un conducte. El principi diu que la suma de l'energia cinètica del fluid*, l'energia potencial del fluid* i la pressió que té serà constant a tot el trajecte. L'equació és la següent:

$$\frac{1}{2} v_1^2 \rho + P_1 + \rho g h_1 = \frac{1}{2} v_2^2 \rho + P_2 + \rho g h_2$$

v velocitat en m/s

P Pressió en Pa

h Altura de referència en m

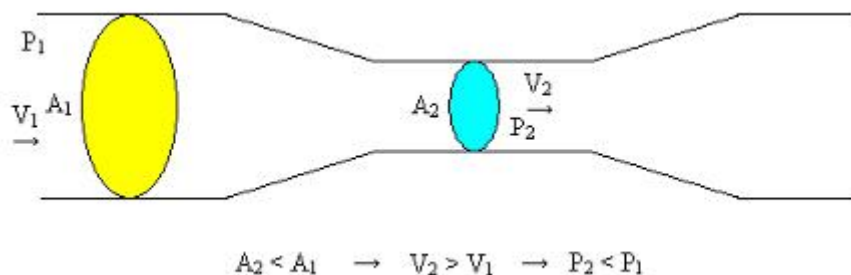
ρ densitat en kg/m^3

g Acceleració de la gravetat en m/s^2

k Constant

**(Les equacions d'energia cinètica i potencial en fluids utilitzen la densitat del fluid en lloc de la massa)*

A efectes pràctics, en un TDV l'altura 1 i l'altura 2 són la mateixa ja que és un conducte en horitzontal. Per tant, es pot afirmar que quan dins el túnel augmenti la velocitat per la reducció d'àrea (principi de continuïtat) la pressió disminuirà. La imatge de sota mostra l'aplicació dels dos principis en un TDV:



Il·lustració 5: Perfil d'un túnel de vent on es mostren les relacions entre l'àrea, la velocitat i la pressió. (Font: Viquipèdia)



2.5. Nombre de Reynolds

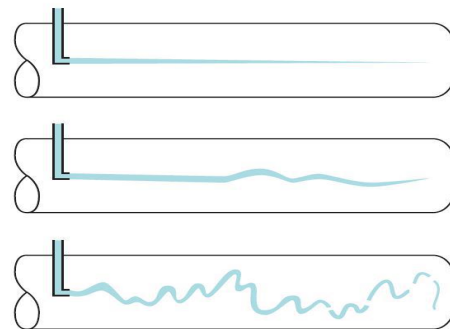
Expressa la relació entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses d'un flux en una expressió adimensional, que intervé en múltiples problemes de dinàmica de fluids. Aquest nombre caracteritza el moviment d'un fluid. Segons el nombre obtingut, un flux serà laminar o turbulent. Matemàticament el **nombre de Reynolds (Re)** s'expressa mitjançant la següent fórmula:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

ρ densitat del fluid kg/m^3 D diàmetre interior de la conducció del fluid m
 v_s velocitat del fluid m/s μ viscositat del fluid $Pa \cdot s$

Un valor de Re petit significa que les forces de viscositat són grans comparades amb les forces d'inèrcia que actuen sobre el fluid, de manera que qualsevol partícula fluida serà esmorteïda ràpidament, i com a conseqüència el flux serà laminar. Si per contra el Re és molt gran llavors el flux serà gairebé sempre turbulent. De manera que el pas de laminar a turbulent depèn d'aquest paràmetre.

$Re < 2000$	Laminar
$2000 \leq Re \leq 4000$	Transició
$Re > 4000$	Turbulent



Il·lustració 6: Comparació de flux laminar a turbulent (de dalt a baix) (Font: ecoursesonline.iasri.res.in)

Com s'observa en la imatge, un flux laminar és aquell en què els raigs d'aire són paral·lels entre ells i tots segueixen uniformement una direcció. En canvi, un flux turbulent és el que, tot i que va en una direcció concreta, ho fa de manera irregular i uniforme com es mostra en l'últim exemple. En un túnel de vent, el flux ha de ser tan laminar com sigui possible i, per tant, com més inferior sigui el nombre de Reynolds millor.



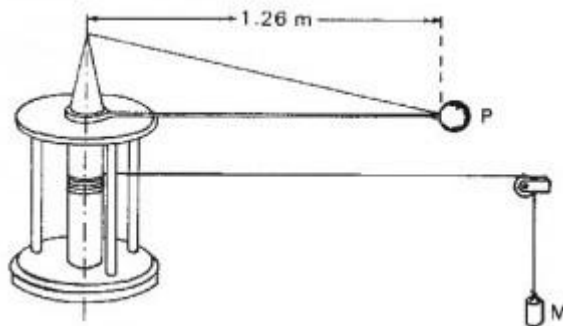
3. Túnels de vent

3.1 Història dels túnels de vent

La història de la invenció dels túnels de vent va lligada completament a la història de l'aeronàutica. El desig de la humanitat per volar ha estat el que ha permès fer tants avenços en aquests camps físics i tecnològics.

*La raó per la qual les aus poden volar i nosaltres no,
és simplement perquè ells tenen una fe perfecta,
tenir fe és tenir ales. - J.M.Barrie (1891)*

El desenvolupament dels túnels de vent es remunta al segle XVIII. Durant el segle s'intentaven construir màquines voladores. Els nombrosos dissenys, igual que amb moltes meravelles de l'enginyeria, van ser inspirats per la **natura**. La intenció era copiar els ocells, però les invencions no tenien èxit. Van arribar a la conclusió que calia entendre quin efecte tenien els corrents d'aire sobre les seves superfícies. Es va reconèixer que, per obtenir les dades necessàries, es tenia dues opcions: moure l'aeronau en l'aire amb la velocitat requerida o, viceversa, podien fer passar l'aire, amb la velocitat preferible, per l'aeronau. El **braç giratori** va ser el primer intent dels investigadors en la primera opció.



Il·lustració 7: Esquema del braç giratori (Font: wrightflyer.umwblogs.org)

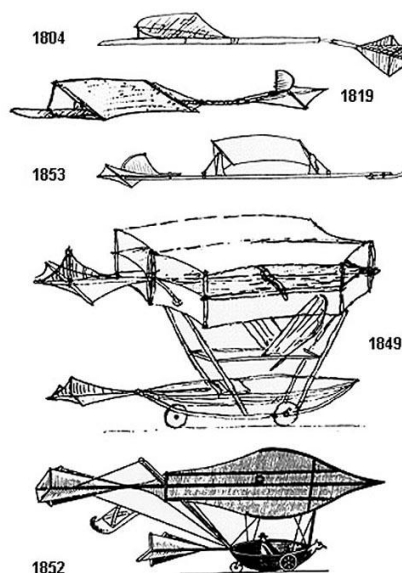
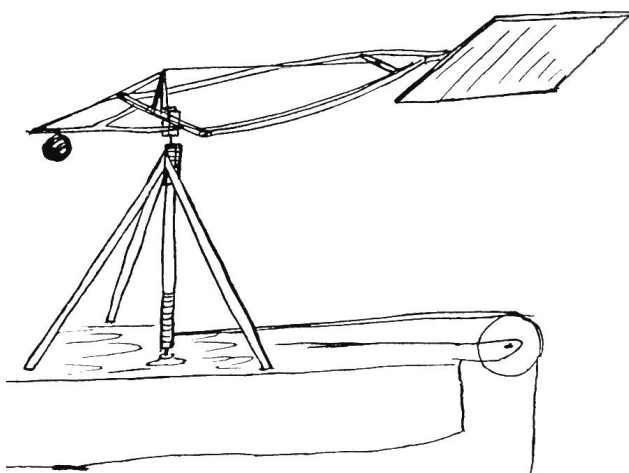
L'enginyer britànic Benjamin Robins va ser el primer a utilitzar el braç giratori (*whirling arm*), que consistia en una mena de centrifugadora que feia girar el braç on s'hi muntava el model a escala, simulant les condicions del vol. El sistema es feia voltar mitjançant una massa (M) que pel fet de caure feia girar l'eix juntament amb el braç, la velocitat del qual arribava només a 1 metre per segon. Robins va concloure que «*totes les teories de la resistència establerts fins al moment són*



extremadament incorrectes» demostrant que objectes amb diferents formes encara que tinguin la mateixa àrea, no sempre tenen la mateixa resistència aerodinàmica. Aquesta complexa relació entre la resistència, la forma del model, l'orientació del model, i la velocitat de l'aire va invalidar la teoria proposada anteriorment per Isaac Newton.

George Cayley(1773-1857) va utilitzar aquest sistema posteriorment per fer estudis sobre la resistència i la sustentació de distints àleps. Va millorar el model del braç giratori dissenyat per Robins aconseguint incrementar la velocitat fins a 6 metres per segon.

En 1799 es va descobrir que l'aire que flueix per sobre d'una ala genera una força cap amunt que fa que l'ala s'elevi i se sustenti. Amb totes les dades recollides dels experiments, en 1804 es va dissenyar un petit **planador** que és considerat el primer vehicle més pesant que l'aire que va volar amb èxit.



Il·lustració 8: Braç giratori de Cayley (Font: wright-brothers.org)

Il·lustració 9: Evolució dels primers planadors (Font: Viquipèdia)

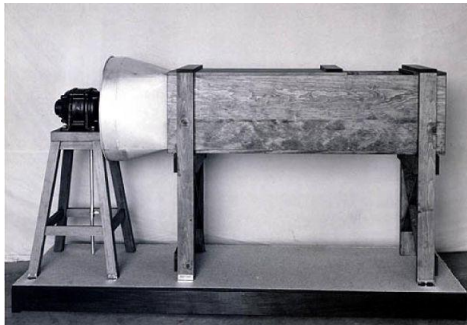
Els experiments dels planadors de l'enginyer Otto Lilienthal seguien el mètode que havia ideat prèviament el britànic George Cayley. Va construir diversos braços giratoris fins a 7 m de diàmetre. Tot i així, els seus assajos fets en braços giratoris van produir resultats incorrectes que el van dur a la conclusió que el vol a motor era impossible.

El braç giratori va proporcionar la majoria de les dades aerodinàmiques fins als finals del segle XIX quan es va arribar a construir braços de 18 metres de diàmetre. No obstant això els resultats estaven influenciats negativament pel moviment de rotació del braç, ja que es generaven moltes turbulències i resultava molt difícil i imprecís determinar la veritable velocitat relativa entre el model

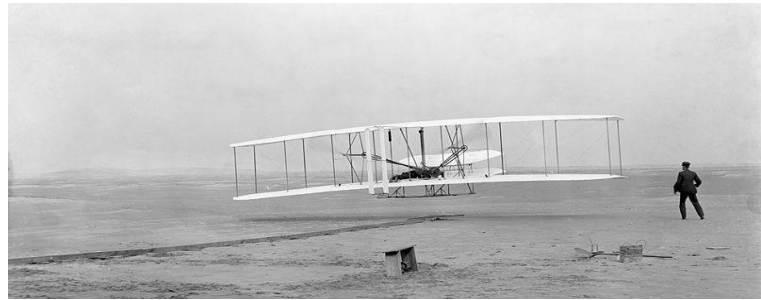


i l'aire. A més, resultava força complicat muntar els instruments necessaris per mesurar les forces que actuaven sobre el prototip. Es necessitava alguna tècnica millor. Es necessitava flux d'aire constant i controlable.

La solució va ser donada per Francis Herbert Wenham (1824-1908), considerat com el dissenyador i creador del primer **túnel de vent** en 1871. El dispositiu era de 3,7m de longitud i 46cm² de secció que podia generar una corrent de 65km per hora (18m/s). Quan aquest avanç va ser aconseguit, les dades tècniques detallades van extreure's ràpidament utilitzant aquesta eina. Els resultats van mostrar que les ales llargues i estretes tenien una millor relació entre les forces de sustentació i resistència que ales curtes i gruixudes amb una àrea igual. Es van obtenir resultats més optimistes que els precedents que va fer possible pensar que el **vol amb motor** era possible, ja que les ales podien suportar més pes.



Il·lustració 10: Primer túnel de vent construït per Herbert Wenham (Font: Viquipèdia)



Il·lustració 11: Flyer I, avió que va dur a terme el primer vol motoritzat de la història (Font: Viquipèdia)

Osborne Reynolds (1842-1912) va fer una important aportació en corroborar que el corrent d'aire sobre un prototip a escala seria el mateix per al vehicle real si cert paràmetre del flux fos equivalent. Aquest factor és conegut com el **Nombre de Reynolds**.

Els germans Wright van crear-se, també, un túnel de vent en 1901 per tal de dissenyar el seu planador de 1902 i el Flyer de 1903 (*orig. Flyer I*), la primera màquina voladora amb motor, el primer **avió**.

Durant els anys, els túnels de vent van incrementar en grandària i en velocitat de l'aire fins a la 2a Guerra Mundial. Les guerres semblen ser un dels principals impulsors i inspiracions per l'avenç de les noves tecnologies. Actualment, es necessiten avions supersònics, míssils, vehicles més ràpids, edificis més forts. Tot comprovat en els túnels aerodinàmics. En la taula següent es mostra en ordre cronològic els túnels rellevants durant la història:



Cronologia de desenvolupament dels túnels			
Any	Descripció	Dissenyador	Origen Nacional
1871	Primer túnel de vent	Frank Wenham	Bretanya
1897	Primer túnel rus	Tsiolkovsky	Rússia
1901	Túnel de 40cm x 40cm	Wright Brothers	EEUU
1901	Túnel de 1,8m x 1,8m	Albert Zahm	EEUU
1904	Túnel rus	Riabouchinsky	Rússia
1909	Primer túnel tancat	Ludwig Prandtl	Alemanya
1912	Túnels bessons	Gustav Eiffel	França
1917	Primer túnel modern	Ludwig Prandtl	Alemanya
1923	Túnel de densitat variable	Max Munk	EEUU
1927	Túnel d'estudi d'hèlix	<i>NASA (Langley)</i>	EEUU
1931	Túnel a escala real	Smith DeFrance	EEUU
1936	Primer túnel supersònic	Peenemünde	Alemanya
1936	Túnel d'altas velocitats	William Boeing	EEUU
1938	Túnel vertical	<i>MIT</i>	EEUU
1939	Túnel transsònic de 6m	<i>NASA</i>	EEUU
1942	Primer túnel supersònic U.S	<i>NASA (Langley)</i>	EEUU
1944	Túnel de 12m x 24m	Carl Bioletti	EEUU
1955	Túnel supersònic de 3m x 3m	<i>NASA (Lewis)</i>	EEUU



3.2 Què és un túnel de vent?

En aquest apartat s'acabarà de definir completament què és un túnel de vent i, posteriorment, es farà una classificació dels diversos tipus de túnel que existeixen actualment.

3.2.1. Túnel del vent

Un túnel de vent és una instal·lació especialment dissenyada per l'estudi dels efectes del moviment de l'aire al voltant d'objectes sòlids.



Il·lustració 12: Sebastia Kienle al túnel de vent de Mercedes-Benz. (Font: mercedes-benz.com)

És una eina molt utilitzada en la actualitat, ja que permet realitzar experiments de cossos sòlids d'una gran varietat com avions, edificis, ponts, naus espacials, cascs, míssils, automòbils o part d'aquests objectes, com una ala d'avió. Es fan assaigs tant de prototips a petita escala com a escala real, depenent del tipus de túnel disponible. L'avantatge d'experimentar en túnels de vent és la possibilitat de fer proves en un espai tancat on els fluxos d'aire estan totalment controlats. Per tant, és molt més segur i econòmicament eficient construir una maqueta i simular les condicions atmosfèriques que fer-ho en un espai obert.

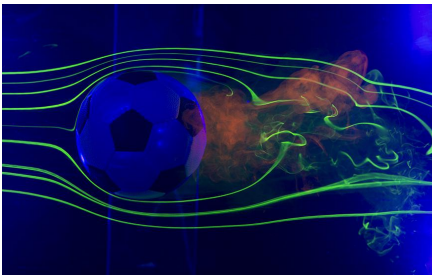
Els objectius d'aquests experiments inclouen les possibilitats de simular, visualitzar, observar i mesurar les característiques aerodinàmiques dels cossos en interactuar amb l'aire o, dit d'una altra manera, analitzar els efectes que es produeixen en l'aire per la interposició d'un objecte determinat, per tal de trobar errors i fer canvis necessaris per millorar el disseny final del prototip. Aquestes característiques poden ser les forces aerodinàmiques (empenyiment, sustentació, resistència, pes), les distribucions de pressions a la superfície, la influència dels diferents detalls que hi ha sobre un vehicle, etc.

En definitiva, els túnels de vent són estructures en forma de tub en les quals es produeix un corrent de vent rectilini i uniforme, generalment, creat per un ventilador. Un objecte es col·loca de forma fixa en la zona d'experimentació del túnel on s'observa el moviment de l'aire, que normalment s'aconsegueix visualitzar utilitzant un generador de fum. També és la secció on es



troben els instruments necessaris per extreure les dades necessàries.

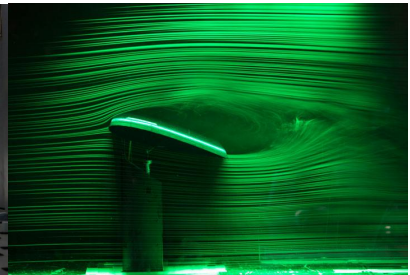
Avui en dia, cap nau espacial ni cap avió és construït o llançat abans que el seu disseny i els seus components hagin estat completament provats en túnels de vent. Tot i la gran importància d'experimentar les forces aerodinàmiques en el món de l'aeronàutica, en aquest no és l'únic on es fa. Pilotes, edificis, cotxes i vaixells són part dels molts exemples d'objectes estudiats en un TDV. De fet, qualsevol cos al qual es vulgui millorar el rendiment respecte a les pèrdues per fricció d'aire en moviment serà estudiat en un túnel de vent.



Il·lustració 13: Experimentació d'una pilota de futbol en un túnel de vent (Font: NASA)



Il·lustració 14: Experimentació de les forces aerodinàmiques que afecten els edificis d'una ciutat (Font: Gradient Wind Engineering)



Il·lustració 15: Experimentació de la sustentació en un perfil d'ala d'avió (Font: Illinois Institute of Technology)



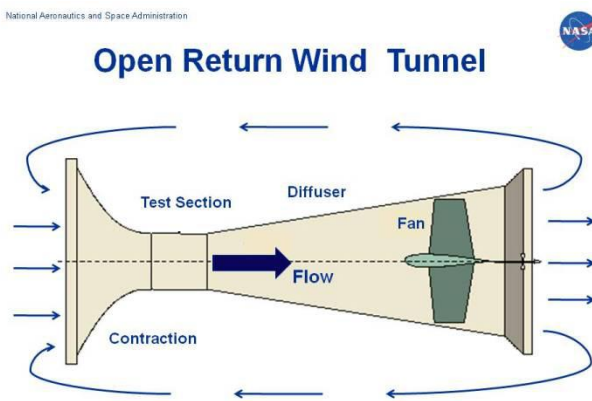
3.2.2. Classificacions del túnels

Podem classificar els túnels segons diferents criteris, tenint en compte les pluralitats de les seves característiques, com la geometria, les velocitats de flux, etc.

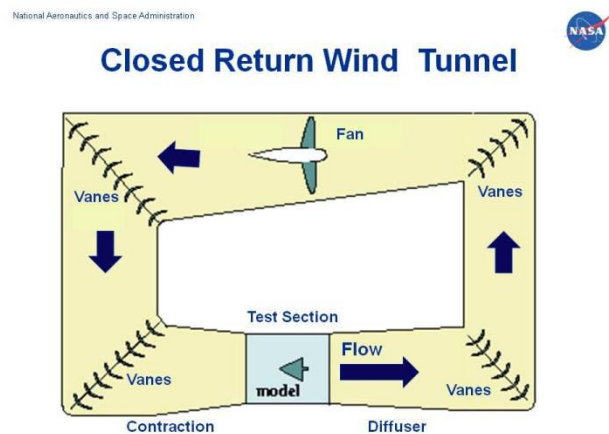
Tipus de retorn

Circuit obert (open-return). Si l'aire és aspirat directament des de l'entorn cap a dins el túnel de vent i després es retorna un altre cop a l'exterior, aquest tipus de túnel és amb circuit obert, o a vegades anomenat Túnel d'Eiffel (*Eiffel tunnel*), mostrat en l'esquema següent.

Circuit tancat (closed-return). Si l'aire que circula dins del túnel és tota l'estona el mateix, de manera que no s'aspira ni es fa cap retorn, es considera un túnel de vent amb circuit tancat, o túnel de Prandtl (*Prandtl tunnel*), il·lustrat en l'esquema següent.



Il·lustració 16: Esquema del funcionament d'un túnel de vent de cicle obert (Font: NASA)



Il·lustració 17: Esquema del funcionament d'un túnel de vent de cicle tancat (Font: NASA)

Nombre Mach

La classificació segons el nombre Mach és representada en la taula a continuació però, abans de centrar-se en la taula, cal aclarir el concepte.

El nombre de Mach (M) és la relació entre la *velocitat d'un objecte* en un punt i la *velocitat del so* en el mateix punt i en el mateix medi. M es representa amb la fórmula següent:

$$M = \frac{v}{v_s}$$

v_s és un valor que depèn del medi físic en el qual es transmet el so.



Subsònics. TDV en què la velocitat de l'aire a l'interior és inferior a la velocitat del so.



Il·lustració 18: Experimentació d'un avió comercial en un TDV subsònic ($M < 1$) (Font: Viquipèdia)

Supersònics. TDV en què la velocitat de l'aire a l'interior és superior a la velocitat del so.



Il·lustració 19: Experimentació d'un prototip en un TDV supersònic ($M > 1$) (Font: Viquipèdia)

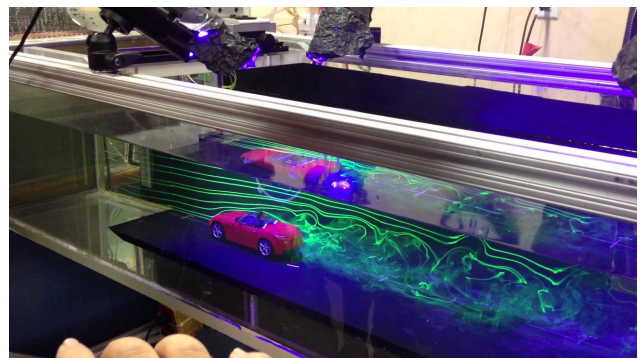
Fluid utilitzat

Aire. L'aire sol ser el fluid més utilitzat sobretot en TDV en què $M < 1$ (la majoria). És així perquè l'aire és amb el que es trobaran els objectes estudiats en el seu funcionament habitual.



Il·lustració 20: TDV que utilitza aire i fum per mostrar el flux al impactar amb el vehicle (Font: A2 TDV)

Altres. Per visualitzar les ones de xoc d'avions supersònics, per estudiar els fluxos al voltant de submarins o vaixells sovint s'utilitza l'aigua com el fluid principal. També hi ha hagut casos en què s'han utilitzat altres gasos com heli(He) o nitrogen(N). Aquest últim va ser utilitzat per les proves de major nombre de Reynolds de fluxos transsònics.



Il·lustració 21: Túnel que utilitza l'aigua com a fluid (Font: NASA ames)

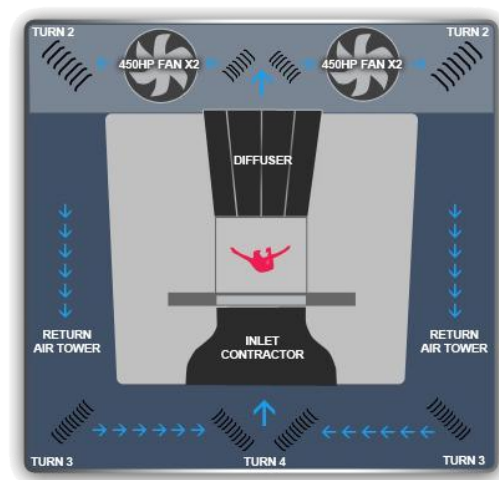


Direcció

Horitzontal. La majoria de TDV són en horitzontal ja que, normalment, les trajectòries de moviment de qualsevol objecte són paral·leles al terra.

Vertical. Els TDV verticals van ser dissenyats per al perfeccionament del disseny de les bombes de caiguda, l'estudi d'efectes aerodinàmics de certs fenòmens de vol, bombardeig en picat per exemple, i/o per a millorar els avions en condicions de pèrdua.

La gran majoria d'aquest tipus de túnel de vent, però, serveixen com a simuladors de paracaigudisme i són coneguts per diferents noms, túnel d'aire, *indoor skydiving*, *bodyflying* o simplement túnel de vent. El túnel mou aire verticalment a aproximadament 195 km/h (o 55m/s), la velocitat límit d'un humà en la caiguda lliure. També és una eina lúdica.



Il·lustració 22: Fotografies d'un túnel de vent vertical on es fan proves de paracaigudisme a l'esquerra. Esquema del funcionament d'un túnel vertical de cicle tancat a la dreta. (Font: iFly)

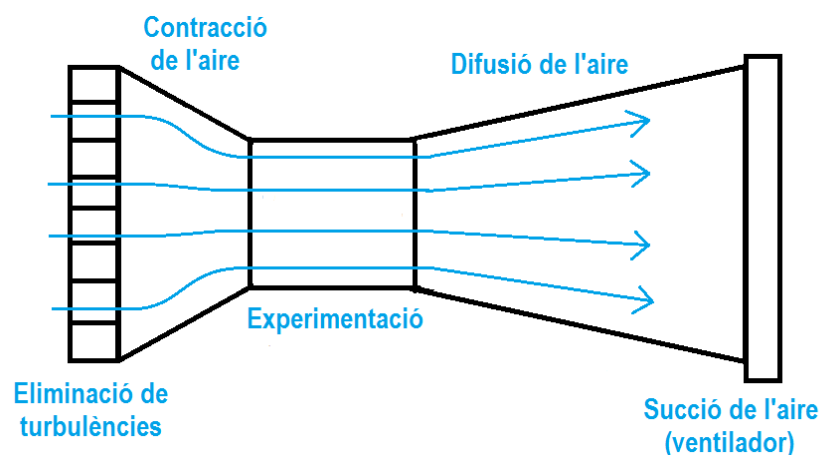


4. Disseny

4.1 Recerca d'informació

La recerca d'informació és una part clau del treball. L'objectiu principal del treball és aconseguir un prototip funcional d'un túnel de vent de cicle obert. A internet s'ha pogut trobar un seguit de gent que també ha realitzat túnels semblants a l'esperat. Després d'estudiar molts projectes diferents s'ha utilitzat el que ha convingut més de cada un.

El funcionament d'un túnel de vent consisteix en la succió d'aire per una boca de secció gran que posteriorment transporta a la zona d'experimentació. Abans d'entrar al túnel, però, l'aire ha de passar per una zona que converteix el flux d'aire en laminar eliminant les turbulències. La zona d'experimentació té una secció molt inferior a la d'entrada provocant un augment en la velocitat de l'aire. Finalment, l'aire es dirigeix cap al ventilador que està succionant tot el fluid. En aquesta zona la secció torna a augmentar.



Il·lustració 23: Funcions de cada part d'un túnel de vent de cicle obert (Font: pròpia)

Tots els túnels de vent de cicle obert tenen aquest funcionament, per tant, partint d'aquí es comença a dissenyar el propi. El material de construcció de l'estructura és la fusta i el plàstic. La fusta per les parets de les parts més grans per on circularà l'aire i el plàstic per la zona d'experimentació. Per tant, a causa de les propietats d'aquests materials i a les eines per treballar-los disponibles, es decideix construir el túnel a partir de cossos geomètrics plans, sense parts corbes.



4.1.1 Forma i optimització de l'estructura

Per fer el disseny principal de l'estructura s'ha utilitzat un applet molt útil trobat al web Glenn Research NASA. Aquesta aplicació simula un túnel de vent i les característiques que tindrà segons les mides desitjades. Per tant, mitjançant aquesta aplicació, es dissenya el túnel de forma òptima per, amb el mínim de material, aconseguir la velocitat de l'aire màxima.

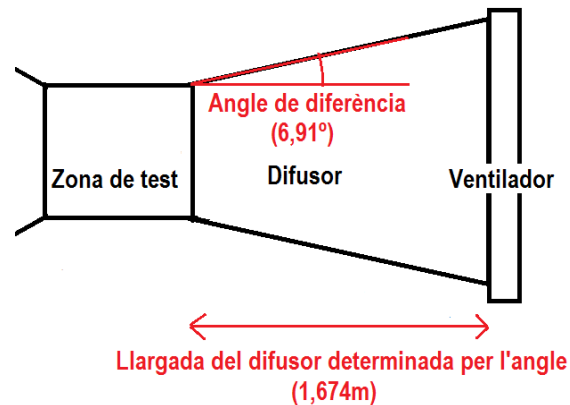


Il·lustració 24: Captures de pantalla de l'aplicació per calcular les mides del TDV (Font: Glenn Research NASA)

En aquestes captures de pantalla es mostra l'aplicació. A la primera, s'introdueixen les dades desitjades i en la segona se'ns mostra les condicions que tindrà la zona de test. Les úniques dades de les quals es depenen són les del ventilador. Per tant, s'ha introduït que fa 0,67m de costat, que és d'àrea quadrada i que el cabal és de 3,4m³/s i el programa ha calculat tota la resta.

En condicions ideals, el vent dins la zona de test va a 48,1 m/s. Aquesta velocitat és un 14,1% de la velocitat del so, per tant, el túnel a construir és subsònic. Tot i així, no s'espera arribar a tanta velocitat.

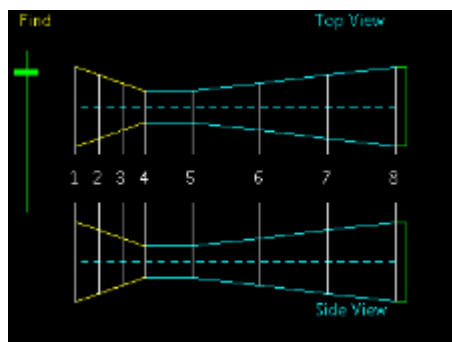
L'angle de diferència on diu 6,91° també ha estat molt important a l'hora de fer el disseny. Aquest angle és el que hi ha entre la zona de test i la zona que porta l'aire cap al ventilador (quan la secció augmenta, mostrat en la imatge de la pàgina següent). Un angle molt gran implicaria la creació de turbulències per part del vent al dirigir-se al ventilador, mentre que un angle molt petit implicaria augmentar molt la llargada de la zona en direcció al ventilador (difusor). Per tant, segons el programa, l'angle òptim és l'utilitzat. Aquest angle acaba implicant que la llargada del difusor serà d'1,674m.



Il·lustració 25: Angle de diferència del difusor i la llarga determinada (Font: Pròpia)

Pel que fa a la zona que capta l'aire, també cal tenir en compte que l'angle no sigui molt abrupte, però no és tan important com el del difusor i, per tant, pot ser més obert i de llargada més curta.

Finalment, l'aplicació també ens mostra un petit croquis de les mides i proporcions del túnel:



Il·lustració 26: Esquema de l'estructura mostrat per l'aplicació. (Font: Glenn Research NASA)

Es mostra el col·lector (1 a 4), la zona de test (4 a 5) i el difusor (5 a 8). El ventilador és la part verda a la dreta del difusor.

Com es pot observar, la part més llarga és el difusor, ja que s'ha hagut de respectar l'angle de diferència i les mides del ventilador. La boca del túnel que agafa l'aire (a la dreta) té les mateixes mides que la boca del ventilador. La part més estreta (a la imatge del 4 al 5) és la zona de test. Aquesta zona té forma de prisma de base quadrada, mentre que les altres dos zones tenen forma de tronc de piràmide de base quadrada.



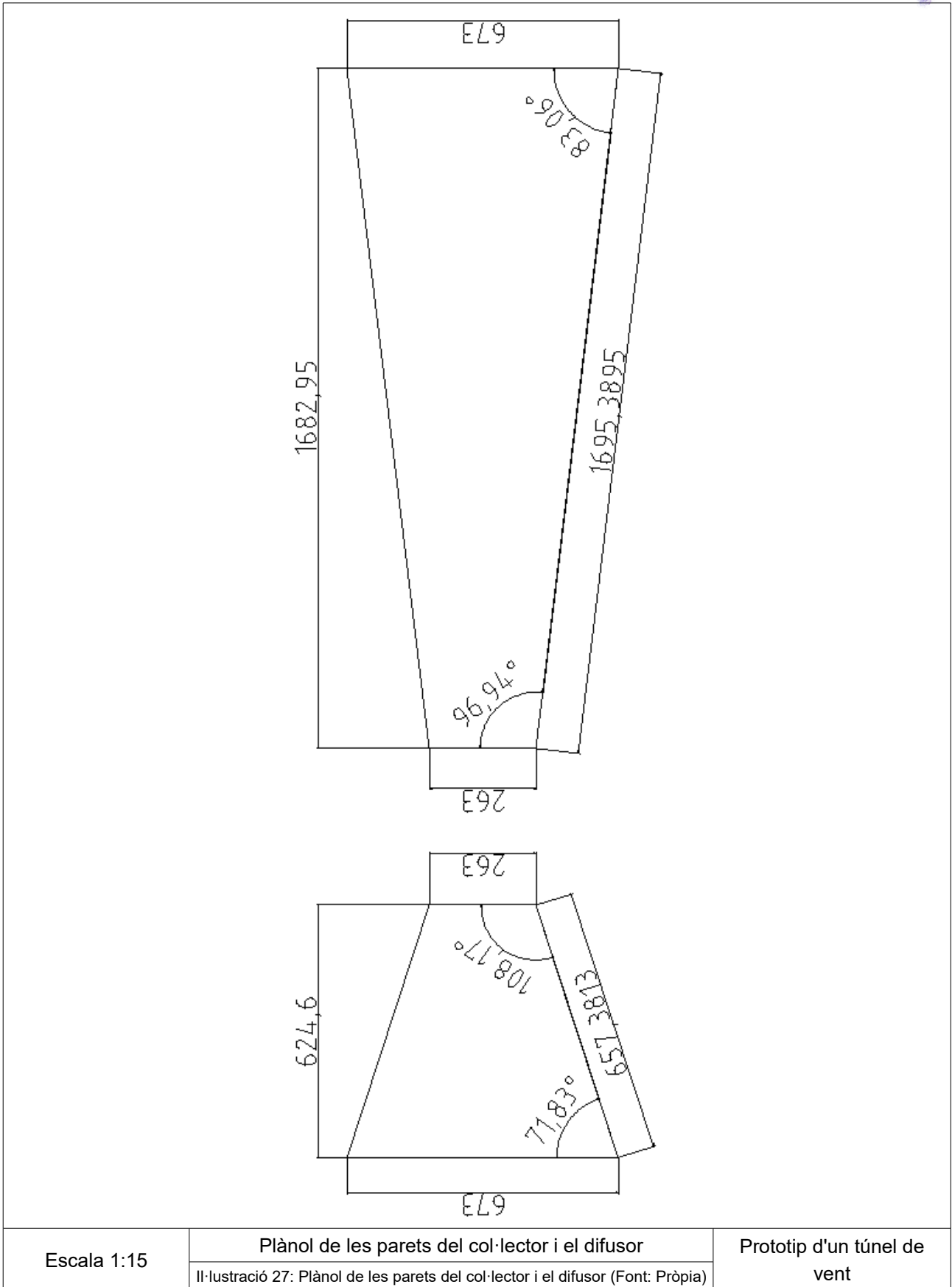
4.2 Esquemes i plànols

En obtenir les mides exactes de les bases i dels costats dels troncs de piràmide, tant del difusor com del col·lector, i les del prisma de la ZDT, la següent feina és fer els plànols adequats de cada part amb les mides i angles corresponents.

Els plànols són fets exclusivament amb aplicacions informàtiques. Per crear el plànol 2D de la figura següent s'ha utilitzat el LibreCAD, l'aplicació de disseny assistit per ordinador o *Computer-Aided Design* (CAD).

A part del plànol 2D, també s'ha treballat en 3D, en aquest cas s'ha utilitzat un programa de modelatge, SketchUp. Treballar en tres dimensions ha permès visualitzar i fer una aproximació de com és el túnel, a més a més, totes les idees de la millora són prèviament dissenyades en SketchUp i només després de ser aprovades són aplicades en la construcció.

En les següents pàgines, s'anirà mostrant per ordre l'evolució dels plànols i esquemes.

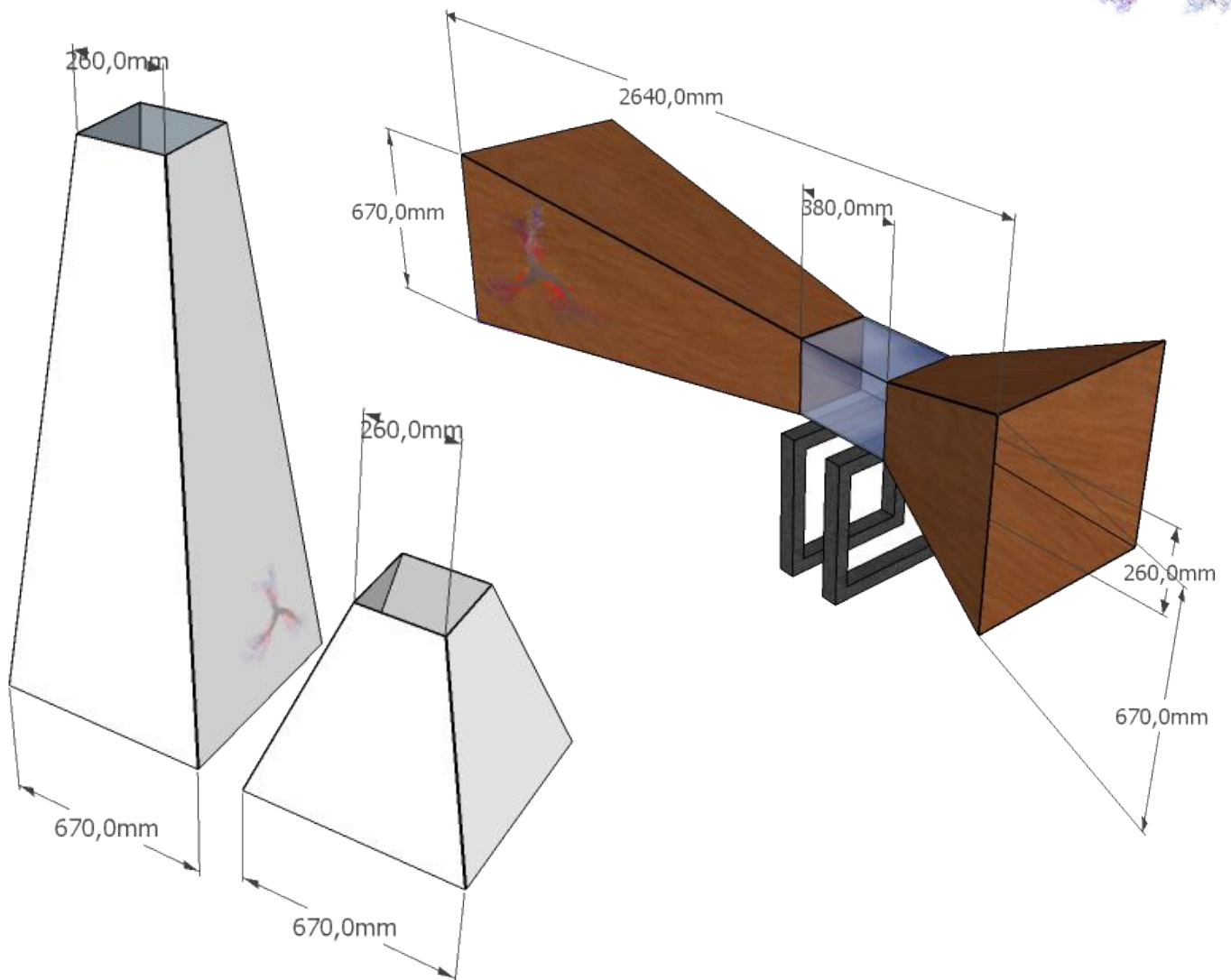


Escala 1:15

Plànol de les parets del col·lector i el difusor

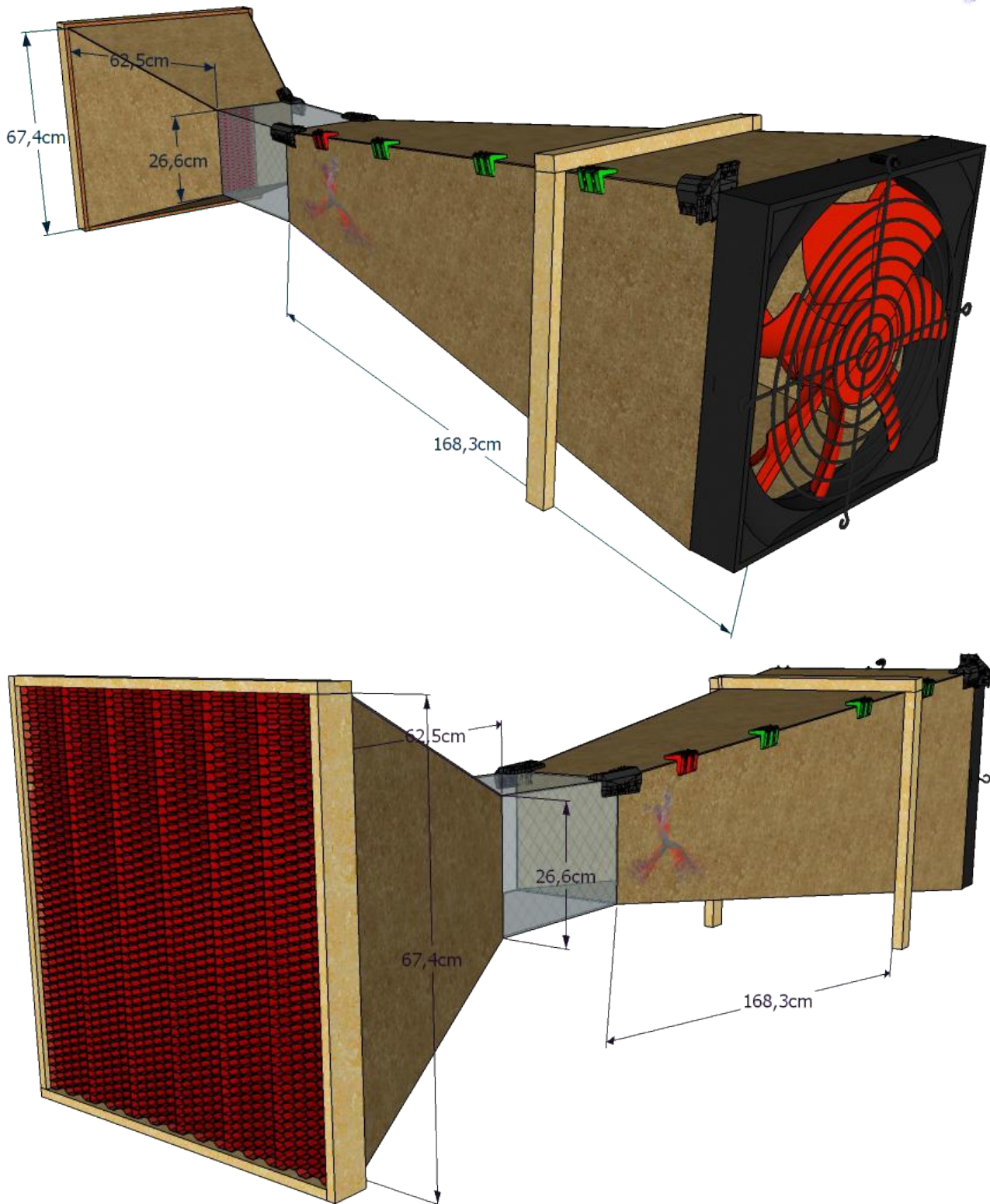
Prototip d'un túnel de vent

Il·lustració 27: Plànol de les parets del col·lector i el difusor (Font: Pròpia)



Visualització dels dos troncs de piràmide que formen el col·lector i el difusor. En vertical i en un disseny més senzill a l'esquerra, i en la seva posició real a la dreta.

Il·lustració 28: Representacions 3D del col·lector i el difusor (Font: Pròpia)



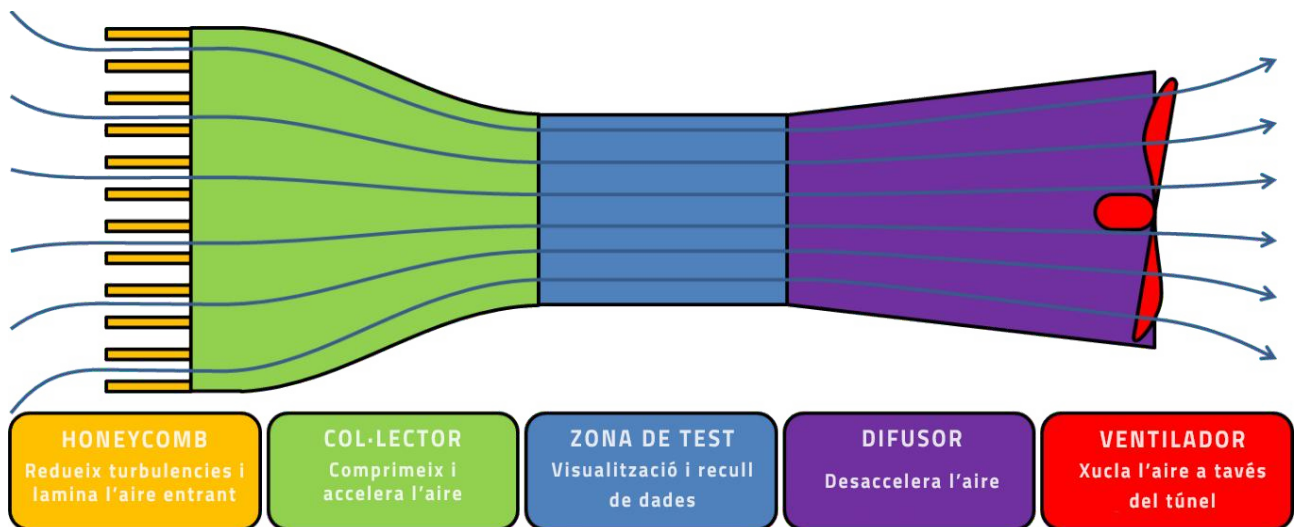
Visualització fitxer 3D (.skp) disponible electrònicament: [enllaç](#)

Il·lustració 29: Disseny en 3D més representatiu de tota l'estructura del túnel de vent. (Font: Pròpia)



4.3 Parts del túnel

Un túnel de vent consta de diferents parts. Les parts principals són (en l'ordre de l'esquema de sota): el laminador (*honeycomb*), el col·lector, la zona de test, el difusor i el ventilador. En aquest projecte s'han dividit en subapartats ja que en cada part les propietats i els aspectes a treballar són molt diferents.



Il·lustració 30: Parts del túnel de vent (Font: Viquipèdia)

4.3.1 Ventilador

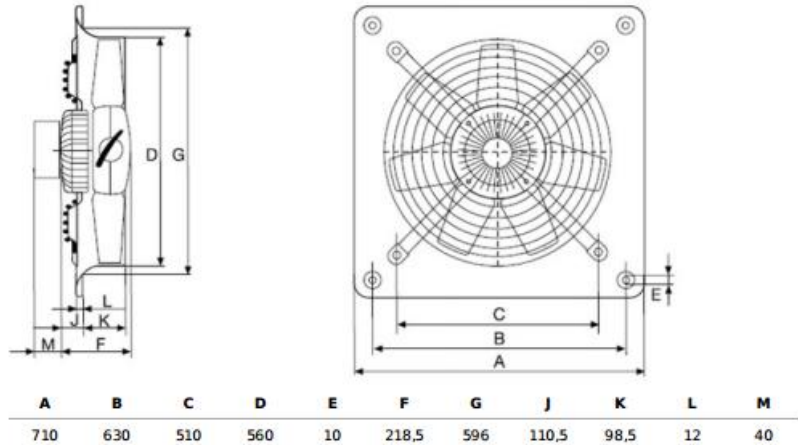
El ventilador és la part del túnel de vent encarregada de succionar l'aire de l'ambient de fora cap dins el túnel. La capacitat i potència d'aquest aparell són determinants a l'hora d'aconseguir velocitats altes amb les quals poder experimentar dins del túnel.

En el cas d'aquest projecte, s'ha pogut aconseguir un ventilador molt potent sense haver de pagar el seu cost. Per tant, aquest ventilador ha sigut a partir del qual s'ha dissenyat tot el túnel de vent (en lloc de dissenyar el túnel i després buscar un ventilador adequat).

El ventilador utilitzat és un extractor *Soler&Palau* de la sèrie *COMPACT* i model *HCFB/4-560-H*. Aquest ventilador té les aspes de plàstic reforçades amb fibra de vidre i utilitza un motor monofàsic. El ventilador té un diàmetre de 560mm tot i que el marc quadrat fa 710mm de costat. Les característiques del ventilador:



Velocitat màx (r.p.m)	Potència absorbida (W)	Intensitat màx. (A)	Voltatge (V)	Nivell pressió sonora (dB(A))	Cabal (m ³ /h)	Pes (kg)
1250	980	4,9	230	71	12480	22



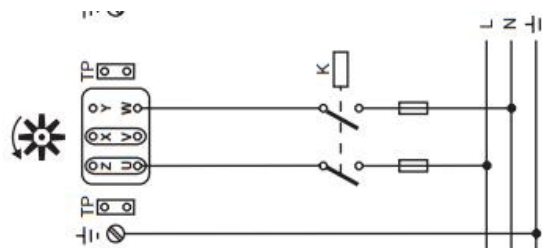
Il·lustració 31: Extractor HCFB/4-560-H (Font: Web S&P)

Il·lustració 32: Les mides (en mm) del ventilador (Font: Web S&P)

Part elèctrica

Aquest extractor no és d'ús quotidià, per tant, abans de muntar-lo en l'estructura cal adequar-lo i afegir els element elèctrics necessaris.

El ventilador no té cap cable per connectar-se a la xarxa. El primer que s'ha de fer és col·locar-n'hi un. Caldrà tenir en compte la polaritat dels pols del motor del ventilador ja que en aquest cas interessa que l'extractor succioni l'aire enlloc de "bufar-lo". Per fer aquesta connexió cal seguir les instruccions de muntatge per fer els ponts necessaris al motor.

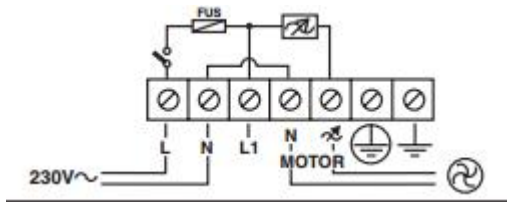


Il·lustració 33: Imatge de les instruccions de la connexió del ventilador amb el cable d'alimentació amb el sentit de rotació correcte. (Font: S&P)

A continuació cal connectar el regulador de voltatge, un aparell que regula el voltatge del ventilador permetent variar la velocitat de rotació d'aquest. Aquest regulador és indispensable ja que, sense ell, el ventilador funcionaria a màxima potència constantment i faria impossible l'obtenció de dades comparatives pel que fa a la velocitat de l'aire.



El regulador de velocitat ha estat el model *REB-10* de *S&P*. Aquest regulador té un voltatge de 230V i permet ser configurat segons es desitgi. El voltatge mínim que transmet al ventilador és de 80V ja que una tensió inferior no donaria suficient parell al ventilador en l'acceleració d'aquest i podria danyar l'aparell. Per tant, la velocitat mínima del ventilador amb el regulador engegat no serà 0, sinó la proporcional a 80V.



Il·lustració 34: Esquema elèctric de les connexions del regulador de voltatge (Font: S&P)

DATOS TÉCNICOS

- Voltaje 230V 50Hz
- Intensidad máx. 5A
- Intensidad mínima a regular 0,8A
- Control por potenciómetro
- Regulación de máximo a mínimo
- Interruptor luminoso
- Conexión por regletas
- Ajuste de la velocidad mínima
- Ajuste de la velocidad máxima
- Caja estanca IP 54
- Filtro EMC según EN55014
- Protección por fusible HF de 5A
- Switch selección arranque pulso inicial (SW1-1).
- Inicio mediante rampa de aceleración seleccionable (SW1-2).
- Dimensiones (mm) 164x96x85

Il·lustració 35: Dades tècniques del fabricant del regulador de voltatge (Font: S&P)

Part estructural

El ventilador utilitzat requereix el seguiment de certes mesures de seguretat a causa de la gran velocitat a la qual pot moure les aspes que estan al descobert. A més, el conjunt de l'aparell té una massa aproximada d'uns 25kg. Per tant, cal adequar les condicions del túnel per poder utilitzar-lo amb seguretat.

Es construeix una estructura que aguanta el ventilador. Aquesta estructura metàl·lica constarà de dos grans peces en forma de T invertida sobre les quals s'aguantarà el ventilador. Aquest, té quatre forats en el marc que seran utilitzats per fixar adequadament l'aparell a l'estructura. El regulador de voltatge també anirà enganxat a aquesta estructura, de tal manera que la velocitat del túnel es controlarà directament des d'on es troba el ventilador.



Il·lustració 36: Estructura metàl·lica en forma de T invertida (Font: Pròpia)



Il·lustració 37: Ventilador arrenpenjat perfectament sobre l'estructura (Font: Pròpia)



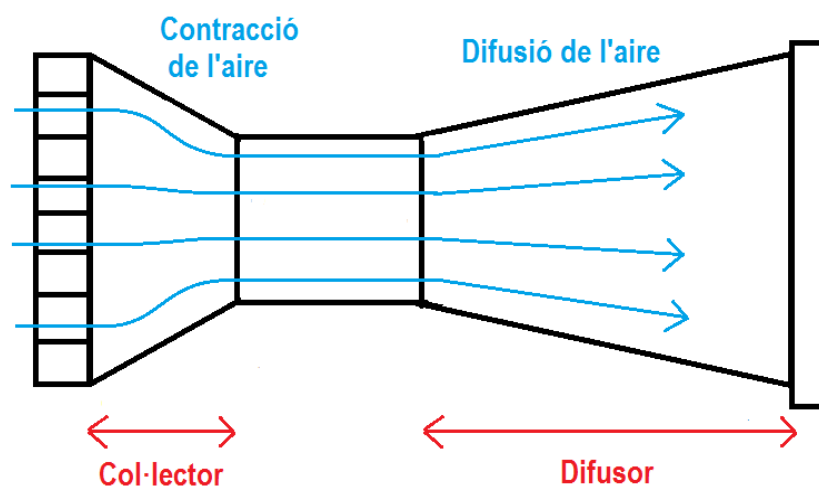
Pel que fa al pes de l'aparell, s'afegeixen quatre rodes a la base de l'estructura metàl·lica. D'aquesta manera, s'aconsegueix més estabilitat i mobilitat i es faciliten les feines de construcció. Posteriorment, quan el túnel estigui en funcionament, les rodes hauran de ser travades per evitar que es pugui moure el ventilador.

Finalment, el ventilador s'unirà al túnel de manera que les aspes quedaran totalment dins el conducte de l'aire per evitar el perill que suposa que estiguin al descobert. Es muntarà un petit marc sobre el difusor per aconseguir que el marc del ventilador i el túnel encaixin perfectament. Per acabar, s'unirà l'extractor al difusor mitjançant cargols.

4.3.2 Col·lector i difusor

El col·lector i el difusor són les dues grans parts del túnel que funcionen com a conducte de l'aire i que donen forma a l'estructura. El col·lector és el que agafa l'aire de l'exterior (després de passar pel laminador) i el transporta fins la zona de test. El difusor, en canvi, transporta l'aire de la zona on s'experimenta fins al ventilador que el succiona.

Tant un com l'altre són un tronc de piràmide que, per tant, fan que el conducte variï d'àrea a mesura que l'aire avança en direcció al ventilador. El col·lector té una boca d'entrada d'àrea quadrada de 670mm de costat i es va estrenyent fins a tenir una secció quadrada de 260mm de costat, de manera que contrau l'aire fent que augmenti de velocitat. El difusor fa tot el contrari, comença amb la mateixa secció amb què acaba el col·lector i arriba també fins als 670mm de costat on es troba el ventilador. Tot i així, el difusor ho fa d'una manera molt més suau que el col·lector per raons explicades a l'apartat de la forma de l'estructura (4.1.1).



Il·lustració 38: Esquema del col·lector i el difusor i com es comporta l'aire (en blau) dins seu. (Font: Pròpia)



Estructura del conducte

L'estructura, tant del col·lector com del difusor, té forma de tronc de piràmide de base quadrada. Per aquest motiu, al no ser una figura geomètrica senzilla com una de regular, s'escolleix la fusta com a material. Concretament, fullola de DM de 3mm de gruix. Aquest material permet ser treballat fàcilment i, a més, és molt econòmic.



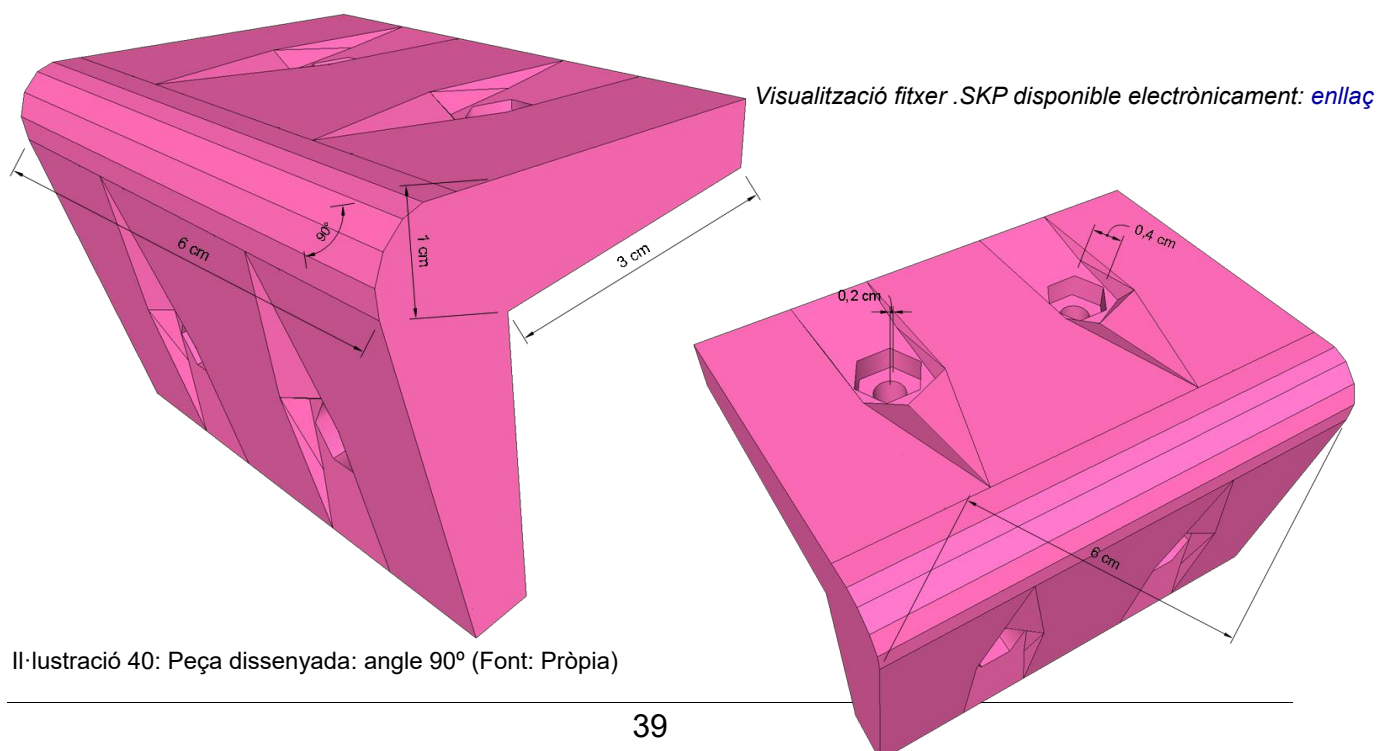
L'estructura en forma de tronc es construeix mitjançant la unió de quatre parts de fullola en forma de trapezi que fan de parets. Les fulloles en forma de trapezi han estat tallades per un professional amb les eines adequades ja que, en aquest cas, la precisió dels talls havia de ser molt alta per obtenir un bon resultat que no seria possible si fos tallat amb les eines de què es disposa a l'institut.

Il·lustració 39: Col·lector muntat en forma de tronc de piràmide de base quadrada

(Font: Pròpia)

Peces d'unió

En tenir les fulloles del col·lector i del difusor tallades, la qüestió és aconseguir crear l'estructura de tronc de piràmide, és a dir, unir les fulloles per crear la forma necessària. Per la unió dels trapezis s'ha decidit dissenyar les peces d'unió mitjançant el programa ja esmentat, SketchUp. El fet de dissenyar-les ha ofert l'avantatge de poder personalitzar-les i així fer-les més resistents i més fermes. A més, s'han dissenyat perquè puguin subjectar una femella, per facilitar les unions.



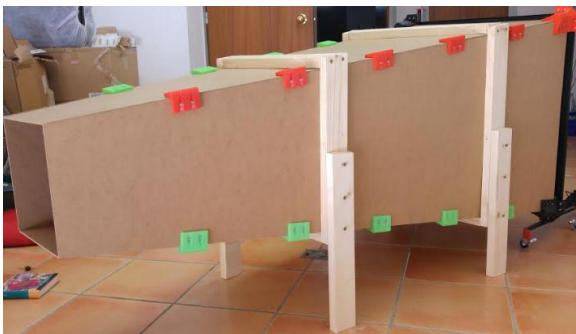
Il·lustració 40: Peça dissenyada: angle 90° (Font: Pròpia)



Suports i reforços

Un cop el col·lector i el difusor estan muntats, cal reforçar-los i construir-hi uns suports sobre els quals es puguin arpenjar sobre el terra.

El reforç és necessari perquè la fullola, al ser de gruix de 3mm, en les zones on té una superfície molt gran s'enfonsa pel seu propi pes. Per evitar el risc de trencament o problemes durant el funcionament del túnel de vent es reforça. Es construeixen diversos marcs al llarg de l'estructura, els quals s'enganxen al túnel mitjançant cargols. D'aquesta manera es crea una zona on les parets del túnel queden subjectades.



Il·lustració 41: Reforços + Suports del difusor (Font: Pròpia)

Pel que fa als suports, el túnel ha de quedar de tal manera que la zona de test i la direcció de l'aire que passa per dins seu quedin paral·leles al terra. El túnel té un total de 12 punts de suport al terra degut al seu pes: les quatre rodes del ventilador, quatre potes al difusor, dues potes al col·lector i dues potes més al laminador.

Referent a les potes del col·lector i el laminador s'han aprofitat els marcs de fusta construïts com a reforços.

4.3.3 Laminador

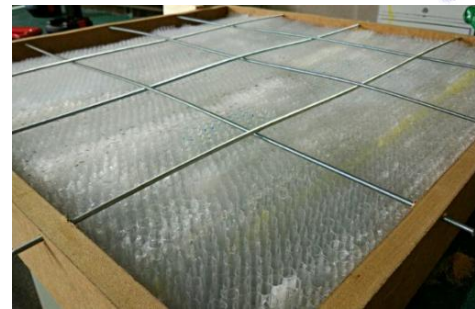
El laminador és la primera part del túnel per on entra l'aire. En aquesta zona s'eliminen les turbulències de l'aire. És a dir, és converteix el flux d'aire de turbulent a laminar. Aquest és un pas imprescindible a l'hora de poder experimentar correctament ja que d'aquesta manera l'aire entra totalment paral·lel a la direcció de la zona de test.

Un laminador consisteix en una unió de molts conductes de diàmetre bastant més petit que la llargada que tinguin. D'aquesta manera s'aconsegueix que quan l'aire passa a través d'aquests petits conductes agafi la seva direcció i entri correctament.

En el cas del túnel a dissenyar, aquest laminador ha de cobrir una secció de 670x670mm (l'àrea de la boca del col·lector) i no s'ha pogut trobar cap laminador prou gran o adequat per comprar. Per tant, s'ha hagut de construir.



El laminador fet pel túnel està fet de trossos de palletes per beure amb un diàmetre de 0,8cm. Els trossets de palleta, tallats en llargades de 5cm, són els petits conductes que dirigiran l'aire en la direcció correcta al entrar el túnel. Degut a la gran secció a cobrir de trossos de palleta, s'utilitzen unes 1500 canyes obtenint 6.500 trossets que són units un a un amb cola blanca. També es construeix un marc de fusta al qual van repenjades les canyes i, finalment es col·loquen unes barres de ferro darrere les palletes per evitar que la força del aire les pugui succionar.



Finalment, s'afegeixen dues potes de fusta al laminador per donar més estabilitat a tot el túnel.



Il·lustració 42: Parts del laminador. El marc de fusta a sota i les palletes i les barres col·locades a sobre. (Font: Pròpia)

4.3.4 Zona de test

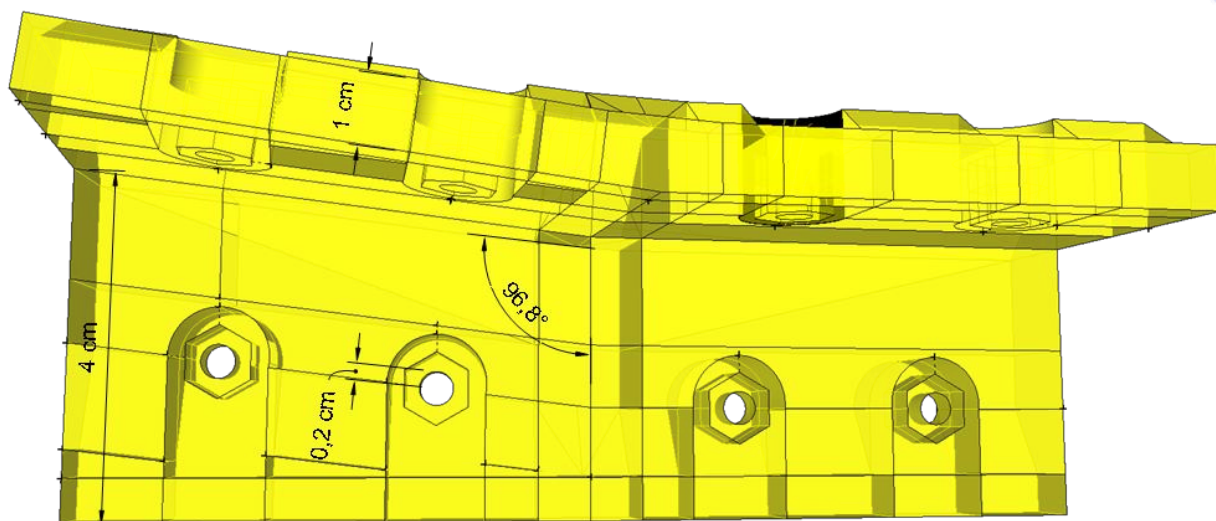
La zona de test és la part del túnel de vent on es duu a terme l'experimentació. Aquesta part sol estar al centre i és la zona en la qual la velocitat de l'aire és màxima. Una part molt important de l'experimentació en l'aerodinàmica és la visualització; per tant, aquesta part està feta de material transparent que permet veure què passa dins.

Estructura

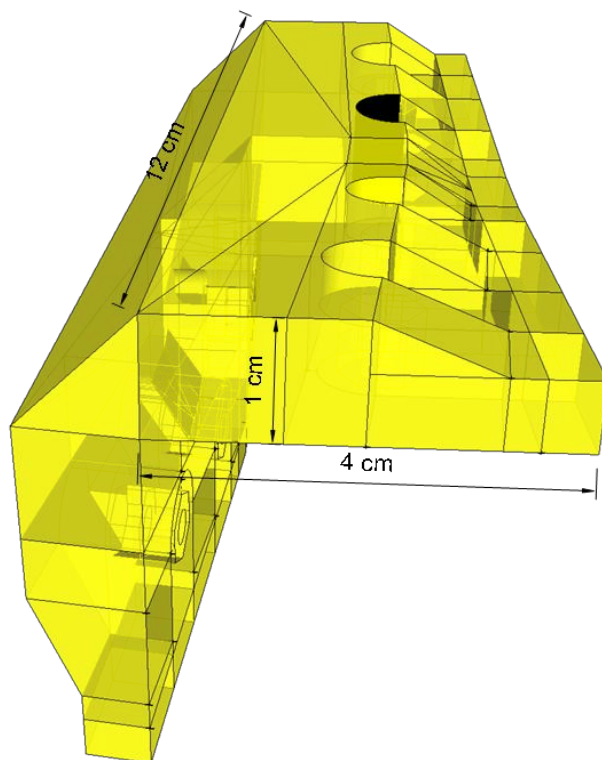
Pel que fa l'estructura, la zona de test té forma de prisma de base quadrada. La base fa 26x26cm i la llargada és de 38cm. Les parets i el sostre de la ZDT són de plàstic poliestirè mentre que la base, on es fixa l'objecte a experimentar s'ha fet del mateix material que la resta del túnel, fullola de fusta.

Les quatre cares de la ZDT han estat unides mitjançant unes peces impreses expressament. Aquestes peces serveixen, alhora, de subjecció entre les parets de la zona de test i d'unió d'aquesta zona amb la resta del túnel. Com es pot observar en les imatges del final d'aquest subapartat, tenen el mateix angle d'inclinació que el col·lector i el difusor.

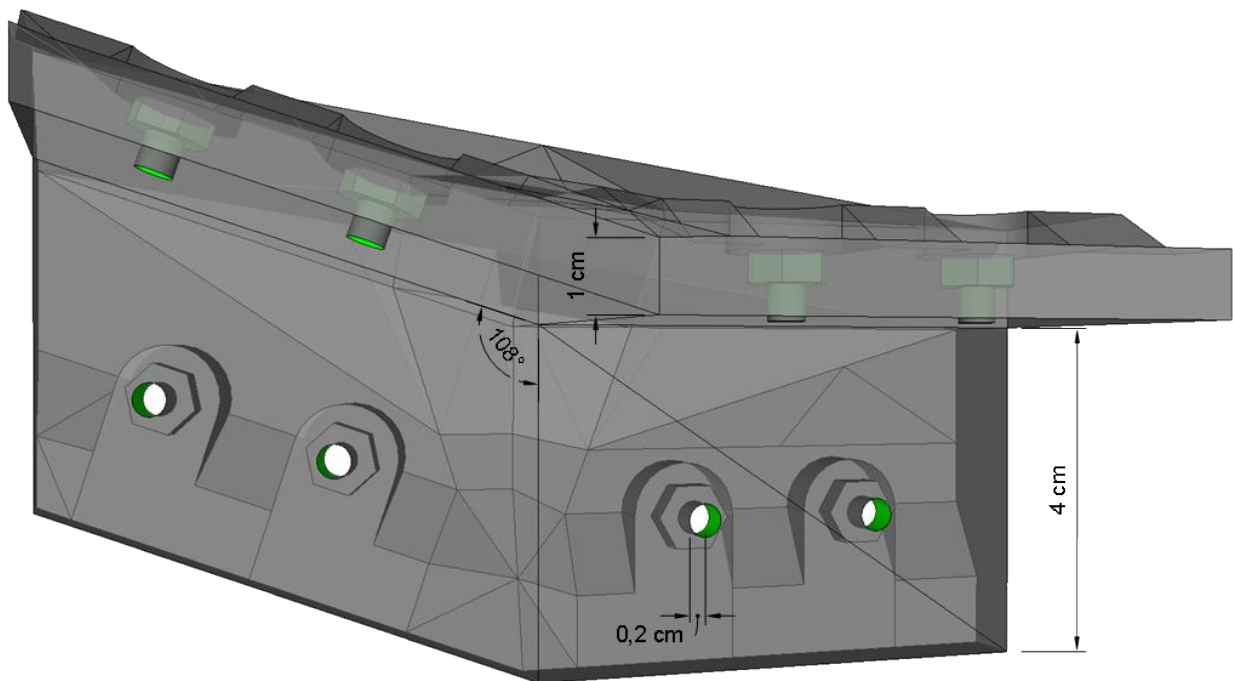
A la base de la ZDT es munta una porta. Aquesta porta està tallada sobre la mateixa fullola que fa de base i s'obre cap a baix. És per aquí per on s'introdueixen les mostres a estudiar.



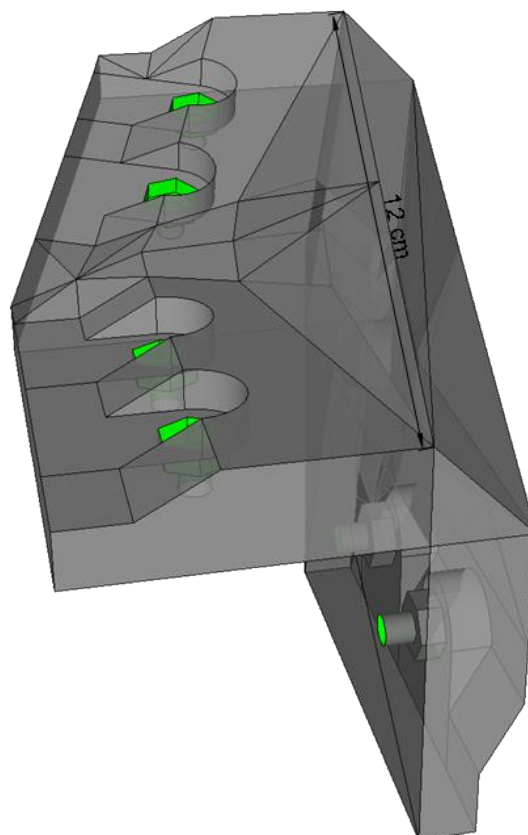
Il·lustració 43: Unió difusor-ZDT; 12cm llarg; 1cm gruix; 97° ; Ø4 (Font: Pròpia)



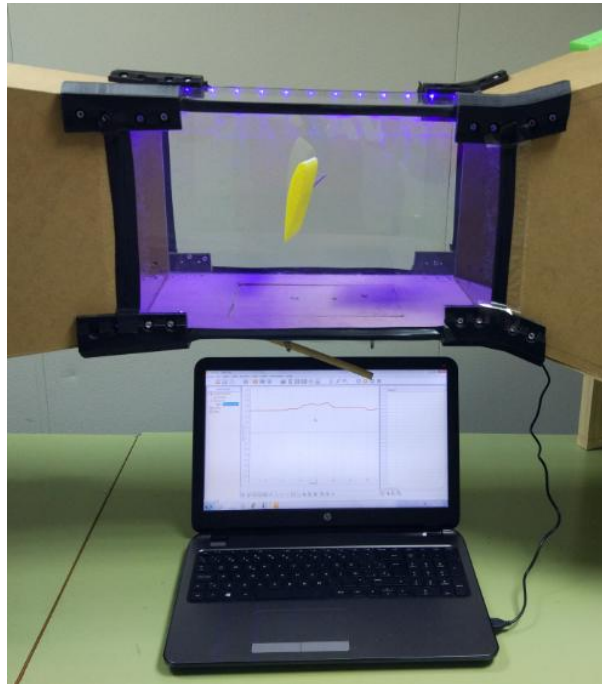
Il·lustració 44: Unió difusor-ZDT (II) SKP disponible electrònicament: [enllaç](#) (Font: Pròpia)



Il·lustració 45: Unió col·lector-ZDT; 12cm llarg; 1cm gruix; 4cm h; 108°; Ø4 (Font: Pròpia)



Il·lustració 46: Unió col·lector-ZDT (II) SKP
disponible electrònicament: [enllaç](#) (Font: Pròpia)



Il·lustració 47: Zona de test totalment acabada i mostra de com encaixen les peces angulars dissenyades expressament (Font: Pròpia)



Sistemes d'experimentació

Un cop dissenyat l'espai en el qual s'introdueixen els objectes a estudiar cal dissenyar els diferents sistemes que s'utilitzaran per poder experimentar. Els aspectes que s'han de poder estudiar són els següents:

- Velocitat del vent dins la ZDT.
- Forces de resistència aerodinàmica (En direcció horitzontal, eix X).
- Forces de sustentació (En direcció vertical, eix Y).
- Experimentació visual del comportament del vent interactuant amb sòlids.

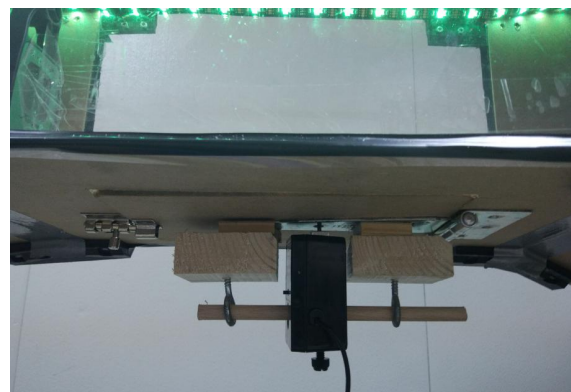
Per mesurar la velocitat del vent s'utilitza un anemòmetre portàtil. Aquest es col·loca a dins de la zona de test enganxat amb algun tipus d'adhesiu a les parets de plàstic. El propi aparell de mesura consta d'una pantalla que et mostra el valor, per tant, es podrà veure el valor de la velocitat des de fora.

Per mesurar qualsevol de les dues forces s'utilitza un sistema de sensors electrònics que funcionen per contacte. Per estudiar les forces horitzontals, el sensor es col·loca dins del túnel en direcció al flux d'aire. El sensor i l'objecte a estudiar són aguantats per un suport de càmera *GoPro* enganxat mitjançant una ventosa a la paret de plàstic de la ZDT.

Pel que fa a les forces verticals, es prefereix que el sensor sigui fora de la ZDT ja que si es trobés dins podria provocar turbulència o errors en la presa de mides. Les forces de sustentació ("forces verticals") són més complexes de mesurar que les horitzontals; per això, el sensor ha de ser l'exterior. S'ha dissenyat un petit sistema amb tacs de fusta i cargols per aguantar el sensor de força.



Il·lustració 48: Sistema de sensors de les forces horitzontals (Font: Pròpia)



Il·lustració 49: Sistema de sensors de les forces verticals (Font: Pròpia)



Referent a la recollida de dades, tant d'una força com de l'altra, el sensor l'únic que fa es prendre mides. Un cop preses, mitjançant un cable USB, les dades es transmeten a un aparell que interpreta el que rep. Posteriorment, les dades són enviades a un ordinador portàtil on apareixen a la pantalla els valors exactes de la força, juntament amb un gràfic on es mostra l'evolució d'aquests en temps real.

Finalment, a la zona de test també es pot experimentar mitjançant la visualització. L'inconvenient en l'estudi de l'aire és que és un gas transparent i, per tant, no es veu. S'utilitza fum d'algun gas que sí que sigui visible per poder observar el comportament. Per potenciar la visualització d'aquest flux de fum s'instal·la, a la part superior de la ZDT, una tira de leds que il·lumina la zona per on passa el fum. Aquesta tira de leds s'alimenta mitjançant un cable USB amb el portàtil.



Il·lustració 50: Il·luminació de la zona de test per visualitzar el fum (Font: Pròpia)

Sensor per la mesura de forces

El sensor que ens ha proporcionat l'INS és el sensor de força de dos rangs (*Dual-Range Force Sensor*) de la companyia Vernier amb el codi d'ordre DFS-BTA. És un sensor de propòsit general per al mesurament de les forces d'empenyiment i d'estirament. Dos rangs permeten mesurar forces tan petites com de 0,01 newtons ($\pm 10N$) i tan grans com 50 newtons ($\pm 50N$).

Els sensors són aparells que transformen una mesura física en una tensió elèctrica. L'ordinador no pot llegir directament la tensió elèctrica subministrada per un sensor, així que és necessari un aparell secundari que transformi aquesta tensió en un número binari, perquè l'ordinador, o portàtil en el nostre cas, sigui capaç de llegir-ho i emmagatzemar-ho. L'aparell electrònic que fa aquesta funció és la consola que fa d'analogicodigital (A/D). El senyal elèctric analògic és molt petit i variable que cal regular i amplificar, d'aquestes accions se n'encarrega la MultiLog que després el convertirà en un senyal digital. En obtenir el senyal digital, per visualitzar-lo fem servir el programari de MultiLab de la mateixa companyia.

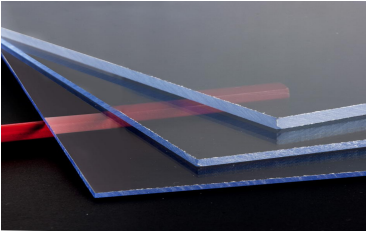


5. Materials i pressupost

Materials

En primer lloc, per poder realitzar la construcció de les tres grans parts del TDV es va decidir el material. Des d'un bon principi es tenia clar que el material pel difusor i el col·lector havia de ser resistent, rígid i llis. Es va triar la fusta, concretament aglomerat de fusta anomenat MDF o DM, per les seves propietats. MDF (*Medium Density Fibreboard*) és fàcil de tallar i perforar, per tant fàcil de tractar i a més a més, és barata. Per evitar que sigui una estructura molt pesada, s'ha decidit triar taulers d'un gruix de 3 mm.

Pel que fa la zona de test, el material havia de ser transparent ja que és la part per la qual es visualitzen les mostres. Hi ha molts tipus de vidres de plàstic a elegir: PVC, metacrilat o polimetilmetacrilat (PMMA), policarbonat (PC) i poliestirè (PS) entre altres. El termoplàstic que es va seleccionar era aquest últim destacat en la taula següent:

 <p>Il·lustració 51: Làmines de plàstic poliestirè (PS) (Font: Viquipèdia)</p>	PVC	Anti-inflamable
	PMMA	Transparència i qualitat òptica
	PC	Aïllant i molt resistent als impactes
	PS	No produeix estelles tallants en cas de trencament

El poliestirè va ser elegit per la lleugeresa i la resistència als cops. A més, no produeix estelles, pot serrar-se i tallar-se amb cúter. És un material que es pot treballar amb seguretat.

Un cop triats els materials principals, els altres, igual de importants, es van anar decidint segons les conveniències de la construcció.



<i>Material</i>	<i>Descripció</i>	<i>Unitats</i>	<i>Preu/Unitat (€)</i>	<i>Preu Total (€)</i>
MDF	Fullola de fusta de 3mm gruix	8	8	64
Fusta	Taulons de fusta per reforç de l'estructra	5	7	35
(HI)PS	Planxa de PS DIN A3 i 3mm gruix de MW	4	6,13	24,52
ABS	Plàstic impressora 3d	1	24	24
Ventilador	Extractor HCFB/4-560-H de S&P	1	882,32	882,32
Canyes	Pack de 500 canyes	4	2,585	10,34
Cola 500GRS	Cola ràpida blanca 500g per fusta CEYS	4	3,63	14,52
Cola 250GRS	Cola ràpida blanca 250g per fusta CEYS	3	2,6	7,8
Cargols Ø4	Pack cargols avellanats de Ø mixtos	4	3,6	14,4
T metàl·lica	Estructura metàl·lica en T per ventilador	2	30	60
Femelles	Pack de femelles de diferents Ø	2	3,6	7,2
Rodes	Rodes	4	5	20
Maneta	Manetes per al transport del CLT i DIF	2	2,5	5
Frontissa	Cerradura per la porta de ZDT	1	4,2	4,2
Barres	Barres metàl·liques roscades per la reixa laminador	10	0,8	8
Spray	Spray PintyPLUS vermell per pintar les palletes	1	2,4	2,4
Arandeles	Pack d'arandeles	1	3	3
Cinta americana	Cinta americana per ajuntar laminador amb CLT	1	2,8	2,8
Cinta negra	Cinta per assegurar que no hi hagin forats a ZDT	2	2,3	4,6
Cinta transparent	Cinta per assegurar que no hi hagin forats a ZDT	2	2	4
LED	Cinta de led 1m per la il·luminació de ZDT	1	5,4	5,4
Sensor Força	Dual-Range Force Sensor DFS-BTA de Vernier	1	149	149
MultiLogPro	Consola de registració de dades dels sensors	1	220	220
Regulador	Regulador de voltatge S&P REB-10	1	100	100

Preu Total(€)	1672,5
Preu Real(€)	409,78

Sempre s'ha tractat de buscar l'opció més econòmica tot i intentar trobar material de qualitat. Al cost no s'ha sumat el material que es va fer malbé o no es va saber aprofitar. Alguns dels materials no es van arribar a utilitzar i aquests tampoc s'han inclòs de la mateixa manera que l'electricitat utilitzada. En el pressupost es mostren dos preus: el teòric, on es mostra el que hauria costat el prototip si s'hagués hagut de comprar tot el material; i el real, el que realment ha acabat costant gràcies al material deixat i aconseguit.



EINES I PROGRAMARI

La llista que ve a continuació són totes les eines que s'han fet servir durant la construcció. Cap d'elles han sigut comprades, totes estaven disponibles a l'INS en el departament de tecnologia.

Eines

Impressora 3D	Tornavís pla
Trepant de sobretaula	Tornavís estrella
Trepant	Clau anglesa
Regle	Alicates
Estisores	Cargol de banc
Cúter	Llima
Serra elèctrica	Serjant
Serra d'arquet	Ulleres de protecció
Barrina	Anemòmetre


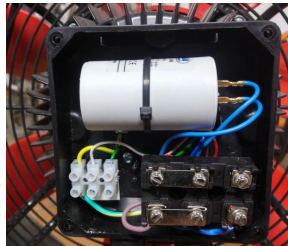

Durant el projecte s'ha fet servir molt el poder de les tecnologies, tant a l'hora d'elaborar plànols com en el disseny de peces, creació del logotip (de la part superior-dreta), recolliment de dades, càlculs, gràfics, recerca d'informació, etc. a continuació es llista el *software* utilitzat.

Aplicacions

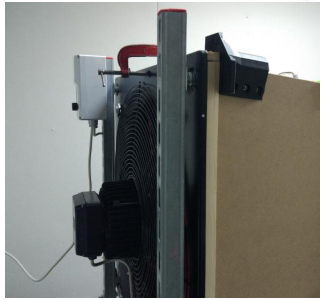
OpenOffice Writer	Layout	CamStasia Studio	WhatsApp
OpenOffice Calc	LibreCAD	PinnacleStudio	Instagram
MultiLab	Photoshop CC	Dropbox	PowerPoint
Sketchup	PicsArt	Google Drive	Google Chrome





6. Construcció

PROCÈS DE CONSTRUCCIÓ DEL TÚNEL DE VENT			
VENTILADOR			
Acció	Descripció	Temps	Imatges
Estructura	<p>Muntatge d'una estructura per aguantar el ventilador sobre el terra d'una manera estable. S'han construït dues estructures metàl·liques en forma de T invertida i s'han subjectat a les 4 cantonades del ventilador com es mostra en la imatge. També s'han afegit 4 rodes a cada extrem de la T per donar mobilitat a l'aparell.</p> <p>Il·lustració 52: Estructura del ventilador (Font: Pròpia)</p>	1:30'00"	
Connexió motor	<p>Connexió del motor del ventilador a un cable que es dirigirà cap al regulador. Cal tenir en compte la polaritat del motor ja que això farà variar si el ventilador succiona o bufa. En el túnel de vent ens interessa que succioni.</p> <p>Il·lustració 53: Connexió motor (Font: Pròpia)</p>	0:15'00"	
Regulador de voltatge	<p>Connexió del motor al regulador de voltatge mitjançant cablejat i configurant-lo de la manera adequada pel funcionament desitjat. Fixació d'aquest en l'estructura del ventilador. Caldrà afegir un altre cable que connecti el regulador al corrent. Des d'aquí s'alimentarà elèctricament tot el sistema.</p> <p>Il·lustració 54: Regulador de voltatge (Font: Pròpia)</p>	1:30'00"	






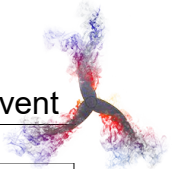
<p>Unió al túnel</p> <p>Per unir el ventilador amb la resta del túnel, perforació de 3 forats a cada banda del marc del ventilador amb un trepant amb una broca per perforar metall. Passar cargols, també amb el trepant, i unir l'aparell amb el difusor del túnel.</p> <p>Il·lustració 55: Unió del ventilador al túnel (Font: Pròpia)</p>	<p>0:20'00"</p>	
---	-----------------	---


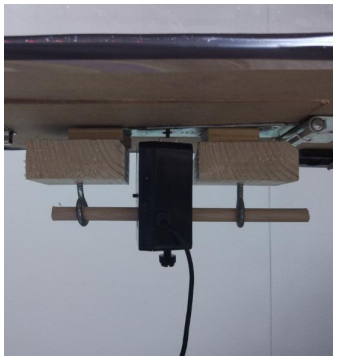
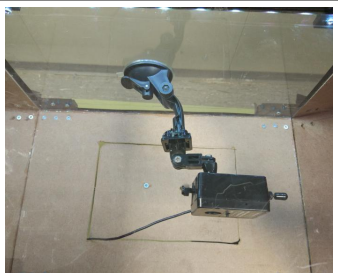

DIFUSOR, COL·LECTOR I LAMINADOR

Acció	Descripció	Temps	Imatges
<p>Marcar i foradar</p>	<p>Presca de mides de les fulloles tallades que faran de costats del túnel (tant del col·lector com del difusor) i marca amb llapis de tots els forats que cal fer per col·locar les peces que serviran per unir unes fulloles amb les altres. Foradar amb l'ajuda d'un trepant als llocs marcats.</p> <p>Il·lustració 56: Marcar i foradar (Font: Pròpia)</p>	<p>1:40'00"</p>	
<p>Muntar</p>	<p>Unió de les fulloles en forma de tronc de piràmide de base quadrada mitjançant les peces impreses en plàstic. Enganxar les peces a les fulloles mitjançant cargols avellanats per deixar una superfície plana a l'interior. Un cop les peces col·locades, muntar les fulloles amb la forma desitjada i cargolar. Acció a realitzar tant pel col·lector com pel difusor.</p> <p>Il·lustració 57: Muntar col·lector i difusor (Font: Pròpia)</p>	<p>3:00'00"</p>	
<p>Marc del laminador (part del col·lector)</p>	<p>Construcció d'un marc de fusta de la mida de la boca gran del col·lector mitjançant 4 trossos de fusta, cargols i angles de 90°. La profunditat del marc ha de ser de 6 cm.</p> <p>Il·lustració 58: Marc del laminador (Font: Pròpia)</p>	<p>0:40'00"</p>	
<p>Palletes del laminador</p>	<p>Tallar palletes de 25cm en 5 trossos de 5cm. Unir els trossets de palleta mitjançant cola blanca sobre el marc del laminador. Cal omplir tot el marc de palletes com es mostra en la imatge. En total s'han utilitzat ~1350 palletes. Així que, aproximadament, està format de 6.750 trossets de palleta.</p> <p>Il·lustració 59: Palletes del laminador (Font: Pròpia)</p>	<p>20:00'00"</p>	



Reforç del laminador	Es col·locaran 9 barres roscades creant una reixa de 4x4 àrees. Aquestes barres aniran d'una punta a l'altra del marc darrere les palletes al costat que va dins el túnel, tal com es mostra en la imatge. Per col·locar-les s'utilitzen femelles als extrems exteriors del marc. Il·lustració 60: Reforç del laminador (Font: Pròpia)	0:50'00"	
ZONA DE TEST			
Acció	Descripció	Temps	Imatges
Foradar i tallar	Tallar les làmines de plàstic poliestirè DIN A3 a la mida corresponent. Perforar als extrems de les làmines abans de cargolar directament amb el trepant per evitar trencaments del material. Aquest forats s'hauran de fer acord amb les peces que caldrà unir posteriorment. Repetir el procediment en 3 làmines de plàstic. Il·lustració 61: Foradar i tallar les làmines (Font: Pròpia)	1:30'00"	
Unió de làmines	Unir les làmines de plàstic les unes amb les altres en angles de 90° (en forma de prisma de base quadrada sense una cara, com es mostra en la imatge). Realitzar-ho mitjançant peces de plàstic impreses i cargols unides a aquestes. Aquestes peces tenen l'angle necessari per, posteriorment, poder unir aquesta zona amb la resta del túnel.	0:20'00"	
Base de la ZDT	Tallar la fullola de fusta DIN A3 a les mateixes mides que les làmines de plàstic. Perforar, també, per on s'haurà d'agafar amb les peces que uniran la fullola que fa de base amb l'estructura de plàstic anterior. Il·lustració 63: Base de la ZDT (Font: Pròpia)	0:20'00"	
Porta de la ZDT	Tallar a la fullola una àrea rectangular semblant a la de la base però inferior que servirà de porta per poder introduir objectes a la ZDT. Un cop tallada aquesta secció, encollar-hi un pestell i una frontissa a la part exterior del túnel tal com es mostra en la	0:40'00"	



	<p>imatge. Un cop la porta estigui feta, ja es pot unir la base amb l'estructura de plàstic amb la ZDT.</p> <p>Il·lustració 64: Porta de la ZDT (Font: Pròpia)</p>		
<p>Sistema de sensors exterior</p>	<p>Foradar la fullola on hi hagi un dels forats que té la frontissa. Fer el forat de la mida del cargol del sensor. Tallar dos trossos de fusta de forma quadrada com els mostrats en la imatge i encolar-los a la porta. Cargolar un cargol com el de la imatge. Col·locar un pal de fusta de 8mm de diàmetre per dins el sensor i penjar-lo als dos cargols del sistema.</p> <p>Il·lustració 65: Sistema de sensors exteriors (Font: Pròpia)</p>	<p>1:00'00"</p>	
<p>Sistema de sensors interior</p>	<p>Utilització d'un suport de càmera per aguantar el sensor dins el túnel. Col·locar el cargol del sensor en direcció al col·lector i fer sortir el cable de dins la ZDT per un petit forat fet a un extrem de la porta.</p> <p>Il·lustració 66: Sistema de sensors interiors (Font: Pròpia)</p>	<p>0:10'00"</p>	
<p>Il·luminació</p>	<p>Col·locar una tira de leds dins la ZDT i part del col·lector i difusor. Cinta de leds adhesiva amb la qual no cal utilitzar cola. Foradar una petita part de la paret del col·lector per poder fer sortir el cable d'alimentació de la tira.</p> <p>Il·lustració 67: Il·luminació (Font: Pròpia)</p>	<p>0:15'00"</p>	



SUPORTS, REFORÇOS I UNIONS			
Acció	Descripció	Temps	Imatges
Reforç del difusor i del col·lector	<p>Construcció d'un marc de fusta que envolta el col·lector i dos que envolten el difusor: Presa de mides perquè el marc encaixi perfectament amb la forma de tronc de piràmide que tenen les parts del túnel. Tallar els taulells de fusta de 2,5cm d'ample a les mides indicades. Construir el marc directament sobre el túnel cargolant-lo sobre aquest mitjançant un trepant.</p> <p>Il·lustració 68: Reforç difusor i col·lector (Font: Pròpia)</p>	5:00'00"	
Suport del difusor i del col·lector.	<p>Construcció de les potes del túnel. Les potes es col·loquen al marc de fusta construït anteriorment i estan fetes del mateix tipus de llistó. Presa de mides perquè siguin totes igual de llargues i col·locació d'aquestes als marcs amb cargols mitjançant un trepant. Se'n col·loquen als tres marcs esmentats a l'apartat anterior i al marc de les palletes. En total hi ha 8 potes.</p> <p>Il·lustració 69: Suport difusor col·lector (Font: Pròpia)</p>	2:30'00"	
Unió del ventilador amb el difusor	<p>Muntatge d'un marc de fusta a la boca gran del difusor, on s'ha d'unir amb el ventilador. El marc ha d'encaixar perfectament dins el ventilador. El marc es munta com els anteriors, cargolant-hi els cargols directament sobre el túnel. Un cop el marc ha estat col·locat, passar cargols pels forats fets al ventilador (explicat anteriorment) i enganxar-ho amb el marc. Com es mostra en la imatge, queda perfectament unit.</p> <p>Il·lustració 70: Unió ventilador-difusor (Font: Pròpia)</p>	1:20'00"	
Unió difusor-ZDT i ZDT-col·lector	<p>Unió de la part central del túnel: el col·lector i el difusor amb la zona de test (cada un pel seu cantó). Per unir-los s'utilitzen les mateixes peces que ja hi ha col·locades a la ZDT i que tenen l'angle ideal per a cada zona. Es forada i cargola la fusta on encaixi amb els forats de les peces.</p> <p>Il·lustració 71: Unió ZDT col·lector/difusor (Font: Pròpia)</p>	2:20'00"	



<p>Unió del col·lector amb el laminador.</p>	<p>Unió del col·lector amb el laminador un cop ja està muntat del tot. Per poder unir-ho s'hauran d'afegir unes peces de fusta a la part exterior de la boca gran del difusor que, amb cargols i mitjançant un trepant, s'uniran amb el marc. Acabar d'unir mitjançant cinta americana a causa de la dificultat de treballar amb fusta en certs angles.</p> <p>Il·lustració 72: Unió col·lector-laminador (Font: Pròpia)</p>	<p>1:20'00"</p>	
<p>Tapar orificis</p>	<p>Cal tapar totes les unions que s'han dut a terme per evitar fuites d'aire. S'utilitza un material o un altre dependent de la zona a cobrir (cola, cinta, silicona, etc.).</p> <p>Il·lustració 73: Tapar orificis (Font: Pròpia)</p>	<p>2:30'00"</p>	
<p>Ordinador</p>	<p>Col·locar un ordinador portàtil proper al túnel de vent al qual es connecta la tira de leds que s'alimenta mitjançant un cable USB. El sensor de forces va connectat amb un aparell anomenat 'MultiLog' i, mitjançant un altre USB, connectat al portàtil per poder passar la informació.</p> <p>Il·lustració 74: Ordinador i MultiLog (Font: Pròpia)</p>	<p>0:05'00"</p>	

PROTOTIP DE TÚNEL DE VENT ACABAT



Il·lustració 75: Prototip acabat (Font: Pròpia)



7. Funcionament del túnel

Quan la construcció del túnel de vent ha finalitzat, cal utilitzar el túnel per poder experimentar. En aquest apartat s'explica com utilitzar el túnel i quines característiques té el resultat final.

7.1 Utilització de l'eina

El túnel de vent construït està pensat per ser utilitzat per dues persones. Tot i així, una sola persona també el podria fer servir sense inconvenient. El funcionament és molt senzill.

Hi ha dues parts principals a controlar en el TDV: el ventilador i la zona de test. Pel que fa al ventilador, consta d'un regulador de voltatge des d'on es pot modificar el seu comportament.

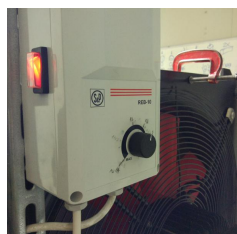
Primerament, cal endollar el cable a la xarxa elèctrica, qualsevol endoll corrent (220V) serveix. Un cop endollat, es prem l'interruptor d'ON/OFF i el ventilador s'engega movent les seves aspes a màxima velocitat durant 10 segons. Un cop ha passat aquest temps, les aspes del ventilador comencen a girar a la velocitat indicada en el regulador. A partir de llavors, la velocitat és totalment controlable des del punt on hi ha el regulador.

Pel que fa a la zona de test, les accions a dur-hi a terme dependran de l'experiment. Generalment, però, s'està treballant amb l'equip de sensors. Per utilitzar-lo, es col·loca un portàtil a l'espai que hi ha sota la ZDT. També cal engegar la consola MultiLog, en aquesta es transmeten les dades i la consola és l'encarregada de transmetre-les a l'ordinador.

Així doncs, per prendre dades es col·loca la mostra dins el túnel enganxada d'una manera o una altra depenent de les formes que tingui. És important destacar que la mostra a experimentar ha d'estar fixada dins el túnel, l'objecte no ha de moure's. Un cop el cos ha estat fixat, senzillament es clica START RECORDING a l'aplicació per ordinador de l'equip de sensors i tot el sistema es posa a recollir dades. L'aplicació permet escollir les escales en que es vol agafar les forces, les unitats i el cabal (dades/temps) que se'n recull.



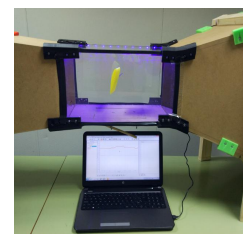
1. Endollar a la xarxa



2. Encendre i regular la velocitat



3. Col·locar l'objecte dins la ZDT



4. Prendre dades amb l'ordinador

Il·lustració 76: Passos a seguir per experimentar amb el TDV (Font: Pròpia)



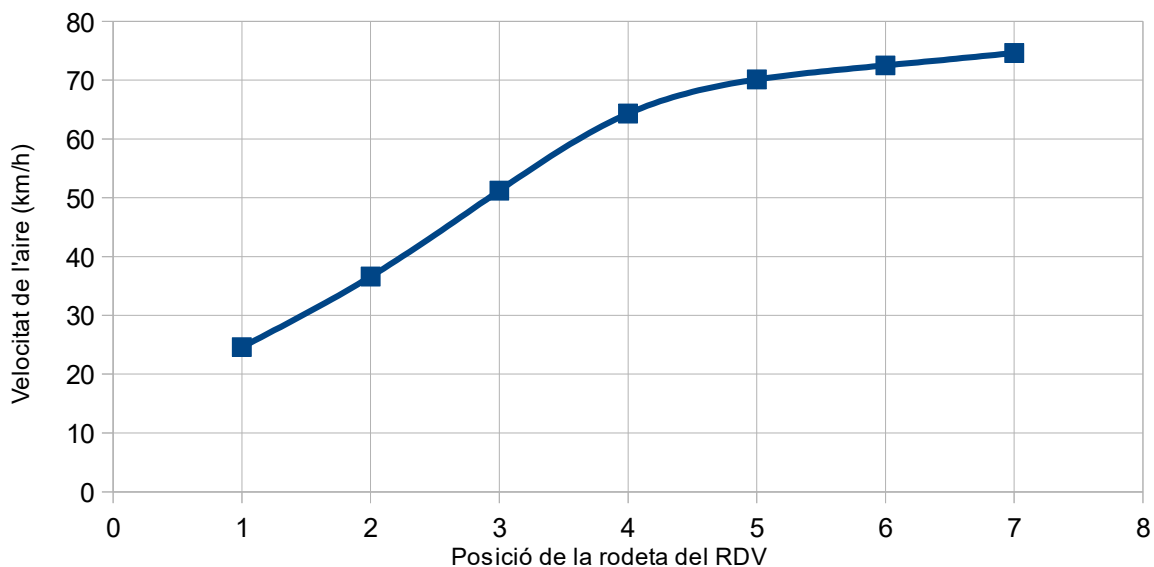
7.2 Dades del prototip

El valor més important en els túnels de vent és la velocitat que pot assolir l'aire dins seu i el tipus de flux d'aire: l'aire ha d'arribar laminat.

Velocitat

La velocitat més important a tenir en compte dins el túnel és la que hi ha a la ZDT. Aquesta velocitat es controla amb el regulador de voltatge del ventilador. La velocitat mínima dins la ZDT és de **24,6km/h** mentre que la màxima és de **74,6km/h**. La velocitat mínima del ventilador no és 0 perquè el regulador no permet donar menys de 80V al ventilador ja que un voltatge tan baix podria danyar el motor del ventilador. En la següent gràfica es mostra les velocitats a què va l'aire segons la posició del regulador. Cal tenir en compte que el regulador no té posicions fixes: es controla a partir d'una peça circular que pot estar en qualsevol posició dins el seu angle de gir. Per tant, la posició 1 del gràfic és la mínima, la 4 la central i la 7 la màxima. Els altres són valors entremetjos de la posició.

Velocitat de l'aire a la ZDT segons la posició del RDV



Il·lustració 77: Gràfic velocitat de l'aire – Posició RDF (Font: Pròpia)

Com es pot observar en el gràfic, l'augment de velocitat dins la zona de test (ZDT) només és proporcional fins a la posició central de la peça del regulador de voltatge (RDV). A partir de llavors, tot i l'augment de voltatge, la velocitat creix molt més lentament.



Nombre de Reynolds

El nombre de Reynolds és el nombre que determina com és el flux de l'aire. És a dir, si és laminar o turbulent. L'objectiu d'un túnel de vent és que l'aire sigui tan laminar com sigui possible ja que així l'experimentació és més realista. Per aconseguir laminar l'aire d'aquest prototip de TDV s'ha construït un laminador.

Comprovar el nombre de Reynolds numèricament és bastant complicat i requereix un nivell de matemàtiques i física massa alt. Tot i així, es pot comprovar fàcilment si el flux d'aire és turbulent o laminar visualment. En els diferents vídeos que hi haurà penjats sobre el projecte a Youtube, s'apreciarà el flux laminar. L'enllaç del canal de la plataforma és aquest:

<https://www.youtube.com/channel/UCtZAc7zLhh7C2i9O4ZZoD8w>



8. Experimentació

L'experimentació feta en aquest apartat ha estat la demostració de la funcionalitat del túnel de vent. En les tres pràctiques que s'han realitzat s'ha fet servir el prototip construït amb èxit.

En les següents pàgines s'han redactat les següents pràctiques:

1. El coeficient aerodinàmic en cossos geomètrics.
2. L'aerodinàmica en objectes quotidians.
3. Com volen els avions?

Les dues primeres pràctiques són experiments on l'objectiu principal és la recol·lecció de dades de força amb un valor concret per poder comparar, posteriorment, un cos estudiat amb un altre. La tercera, en canvi, consta d'una demostració teòrica i visual de com volen els avions.



Pràctica 1: El coeficient aerodinàmic en cossos geomètrics

Introducció. La primera pràctica realitzada en el túnel de vent acabat ha consistit en trobar el c_a (coeficient aerodinàmic) de diferents cossos geomètrics. Aquesta pràctica és una demostració de la capacitat del túnel de vent construït d'agafar dades numèriques útils i vàlides.

La pràctica consisteix a col·locar 9 cossos geomètrics diferents i observar com influeix la forma dels cossos en la resistència que oposa l'aire al moviment.

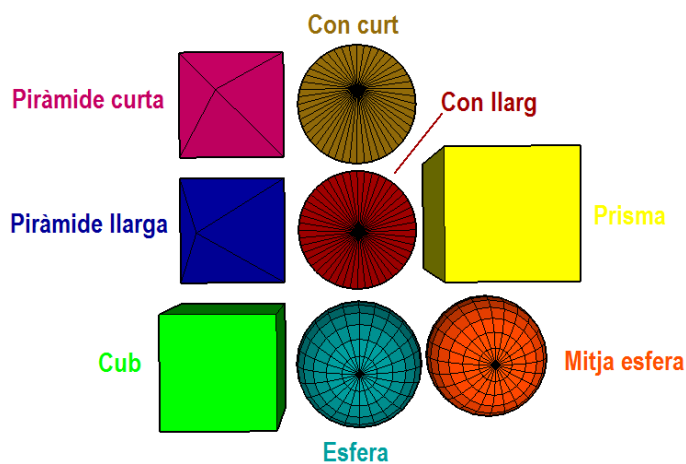
Recerca d'informació. En aquesta pràctica s'estudia la resistència del vent respecte el moviment com a força aerodinàmica. Hi ha molts factors que influeixen sobre aquesta força que han estat explicats anteriorment. En aquest cas, s'estudiarà el coeficient aerodinàmic dels cossos.

Aquest coeficient és un nombre que ve determinat per la força que oposa l'aire a l'objecte en relació a la forma que té. Com més baix sigui aquest coeficient, més "aerodinàmic" es considera el cos. Com que fa referència a la forma, i costa molt de matematitzar, se sol trobar experimentalment com es farà en aquesta pràctica.

Partint de la fórmula que determina la força de resistència aerodinàmica (F_{RA}), es trobarà aquesta experimentalment i, posteriorment, es trobarà el coeficient aerodinàmic (c_a) aïllant-lo.

$$F_{RA} = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot c_a \cdot A_f \cdot \rho \quad \blacktriangleright \quad c_a = \frac{F_{RA}}{\frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A_f}$$

Per obtenir dades comparatives entre uns cossos i altres, l'única variable en l'obtenció de la força serà la velocitat relativa (v). Així doncs, l'àrea frontal (A_f) de tots el cossos és la mateixa, i la densitat de l'aire (ρ) també és constant ja que s'ha realitzat l'experiment en el mateix espai i temps.



Àrees frontals d'impacte de 25cm²

Il·lustració 78: Cossos geomètrics vistos des d'on impacte el flux de l'aire (Font: Pròpia)

Cossos geomètrics utilitzats:

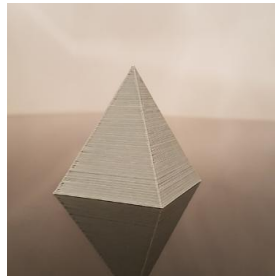
- Cub
- Prisma de base quadrada
- Piràmide de base quadrada curta (h=5cm)
- Piràmide de base quadrada llarga (h=10cm)
- Esfera
- Semi-esfera
- Con curt (h=5cm)
- Con llarg (h=10cm)



Desenvolupament de l'experiment. Primerament, cal dissenyar els cossos perquè l'àrea frontal d'impacte sigui en tots de 25cm^2 . Per tant, les bases dels cossos angulars fan totes 5×5 mentre que les bases dels cossos rodons fan $2,82\text{cm}$ de radi. Un cop dissenyades, han estat impreses en 3D.



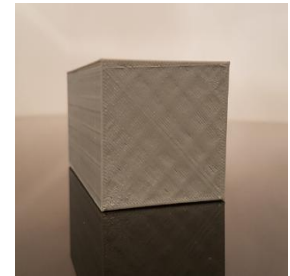
Piràmide alta de base quadrada



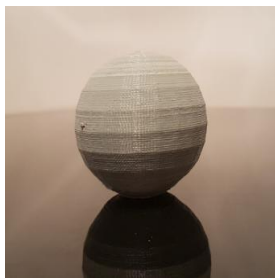
Piràmide baixa de base quadrada



Cub



Prisma de base quadrada



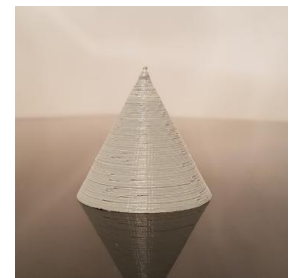
Esfera



Mitja esfera



Con alt



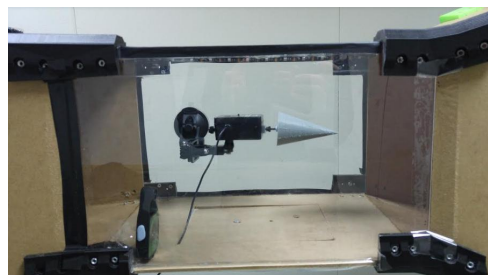
Con baix

Il·lustració 79: Cossos geomètrics impresos en 3D (Font: Pròpia)

S'han col·locat una a una dins la zona de test del TDV i s'ha mesurat la F_{RA} diferents vegades. S'ha anat variant la velocitat relativa agafant dades en: $3,7\text{m/s}$ (velocitat mínima del TDV), 6m/s , 8m/s , 10m/s , 12m/s i $13,7\text{m/s}$ (velocitat màxima del TDV).

Resultats obtinguts i raonaments

Els resultats obtinguts mostren un ascens de la força de resistència aerodinàmica a mesura que augmenta la velocitat en tots els cossos. A velocitats baixes tots els cossos experimenten forces molt semblants, en canvi, a les velocitats més altes s'aprecia una diferència clara entre els cossos més i menys aerodinàmics.

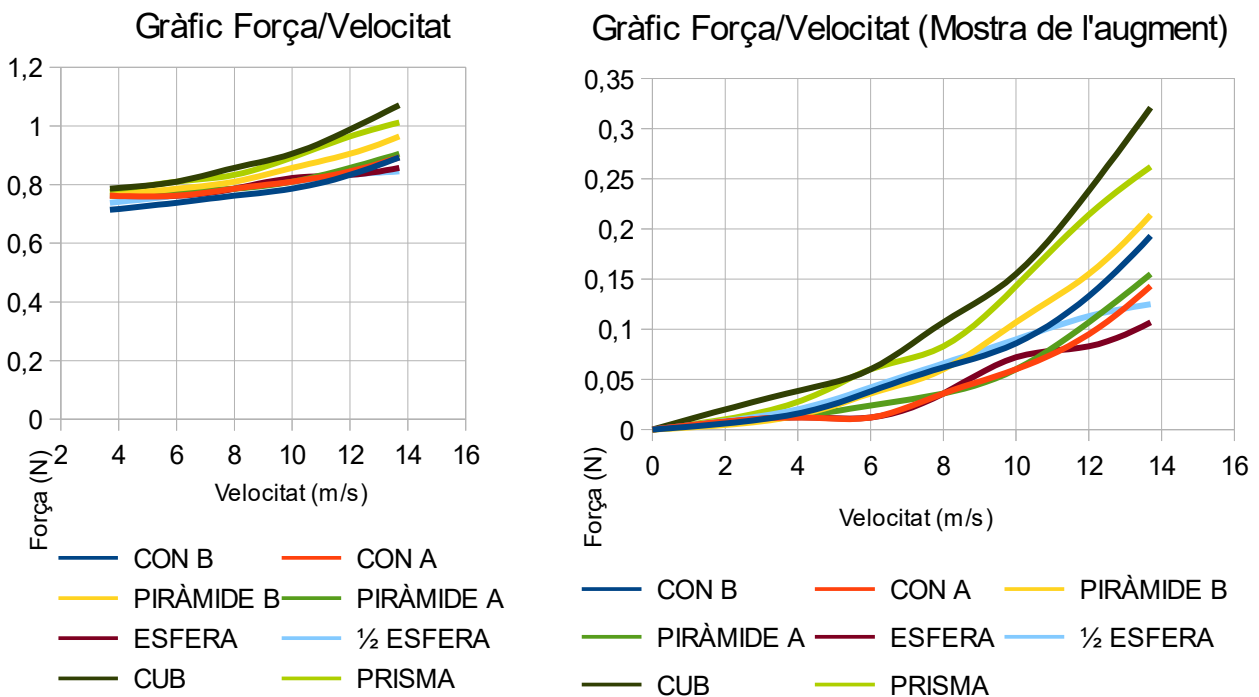


Il·lustració 80: Col·locació de l'objecte dins la ZDT (Font: Pròpia)



Velocitat vent (m/s)	Força de resistència aerodinàmica (N)			
	CON B	CON A	PIRÀMIDE B	PIRÀMIDE A
3,7	0,714	0,762	0,762	0,762
6	0,738	0,762	0,786	0,774
8	0,762	0,786	0,81	0,786
10	0,786	0,81	0,857	0,81
12	0,833	0,845	0,905	0,857
13,7	0,893	0,893	0,964	0,905
Velocitat vent (m/s)	ESFERA	½ ESFERA	CUB	PRISMA
	3,7	0,762	0,738	0,786
6	0,762	0,762	0,81	0,81
8	0,786	0,786	0,857	0,833
10	0,822	0,81	0,905	0,893
12	0,833	0,833	0,988	0,964
13,7	0,857	0,845	1,071	1,012

Tot i així, per les condicions del túnel, aquestes dades no han estat agafades de forma totalment correcta a causa de la col·locació de l'objecte en el sensor. A una velocitat de 0 m/s la força hauria de ser 0 i, observant el creixement que tenen aquestes dades a 0m/s la força que marcaria el sensor seria d'uns 0,7N (a més, ha estat comprovat que és així). Això ha estat degut al fet que en repenjar el cos al sensor, aquest ha detectat, també, la força del pes i l'ha sumat a la F_{RA} . Tot i així, el que sí que és correcte és el creixement experimentat. Per tant, com que el pes i la F_{RA} actuen en direccions diferents podem restar el pes a la taula de valors i fixar-nos únicament, ara sí, en les dades de la F_{RA} corregides. A sota, podem observar els dos gràfics:

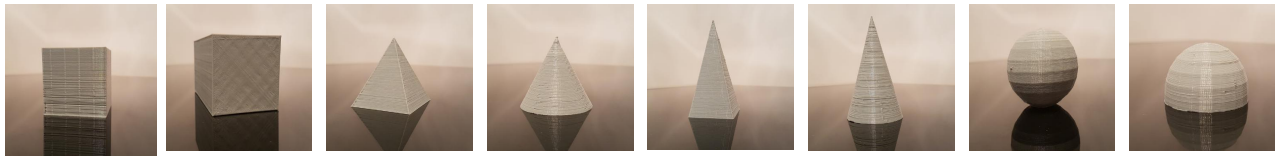


Il·lustració 81: Gràfics Força/Velocitat de l'aire (Font: Pròpia)

El gràfic de l'esquerra mostra les dades obtingudes reals. El gràfic de la dreta mostra les dades corregides i útils.



Els resultats d'aquest experiment, tot i no ser molt bons pel que fa al valor de les dades, són perfectament utilitzables per establir una primera comparativa dels coeficients aerodinàmics. En la següent cadena, es mostren les figures ordenades de més a menys valor del coeficient aerodinàmic.



CUB > **PRISMA** > **PIR. B.** > **CON B.** > **PIR. A.** > **CON A.** > **ESFERA** > **E^{1/2} ESF.**
1,05 **0,82** **0,59** **0,51** **>0,59** **>0,51** **0,47** **0,42**

Il·lustració 82: Comparativa de coeficients aerodinàmics dels cossos geomètrics (Font: Pròpia)

A sota de cada nom, hi ha col·locat el coeficient aerodinàmic real de cada objecte. Així que, exceptuant l'esfera i la mitja esfera que haurien d'estar invertides, la comparació és molt bona.

Pel que fa a l'obtenció numèrica de coeficients, s'ha calculat el c_a de cada cos amb les dades de força obtingudes. Aïllant el c_a de la fórmula de la F_{RA} s'han obtingut els següents resultats:

COS	Coefficient calculat	Coefficient real	Error relatiu
CUB	0,98	1,05	6,60%
PRISMA	0,82	0,82	0,00%
PIRÀMIDE BAIXA	0,69	0,59	14,50%
CON BAIX	0,62	0,51	17,70%
PIRÀMIDE ALTA	0,49	>0,59	Baix
CON ALT	0,45	>0,51	Baix
½ ESFERA	0,37	0,42	11,90%
ESFERA	0,33	0,47	29,80%

Pel que fa als resultats numèrics, la majoria de dades tenen un valor bastant exacte i proper al real. La mitjana d'error relatiu és, aproximadament, d'un 10%. En el càlcul del coeficient aerodinàmic hi intervenen moltes variables i, per tant, és molt fàcil cometre un error relatiu força gran.

Conclusions. Un objecte en moviment oposarà més o menys resistència a l'aire que un altre objecte de les mateixes característiques segons la forma que tingui. La forma més aerodinàmica és la de semiesfera mentre que la que oposa més fricció en moure's a través de l'aire és el cub. Concretament, els cossos aerodinàmics ordenats de menys a més aerodinàmics són: el cub, el prisma, la piràmide baixa, el con baix, la piràmide alta, el con alt, l'esfera i la mitja esfera.



Pràctica 2: L'aerodinàmica en objectes quotidians

Introducció. La influència de les forces aerodinàmiques és molt present en la vida quotidiana. De fet, aquestes forces apareixen en qualsevol moviment, per petit que sigui, realitzat dins l'atmosfera. En aquesta pràctica s'estudiaran dos tipus d'objectes en els quals aquestes forces aerodinàmiques tenen un gran efecte gràcies a la seva funció: les pilotes i els automòbils.

Les pilotes són elements presents en molts esports i, en la majoria, quan està en joc, la bola es mou a través de l'aire. Per tant, el comportament de la pilota amb l'aire serà important a l'hora de ser dissenyada. Pel que fa als vehicles, cada dia es fan més proves per millorar-hi la forma aerodinàmica. L'objectiu d'aquests estudis és reduir la força de resistència aerodinàmica que provoca una fricció i disminueix el rendiment de l'automòbil.

Recerca d'informació i hipòtesis. Partint de la informació que s'ha trobat en la pràctica anterior, en aquesta pràctica s'estudiarà les forces de resistència que oposa l'aire al moviment dels objectes. Tot i així, la pràctica 1 estava preparada perquè els paràmetres constants dels objectes (àrea frontal, material, etc.) fossin iguals. En aquest cas, l'experimentació tendirà més a la comparació entre els diferents automòbils i pilotes, amb les característiques pròpies de cada cos particular, que als resultats numèrics concrets.



De goma

Tennis

Indiana



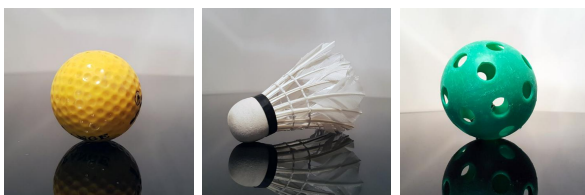
Avió



Camió



Cotxe 1



Golf

Bàdminton

Foradada



4x4



Cotxe 2

Il·lustració 83: Pilotes de diferents tipus (Font: Pròpia)

Il·lustració 84: Vehicles de juguina de diferents tipus (Font: Pròpia)

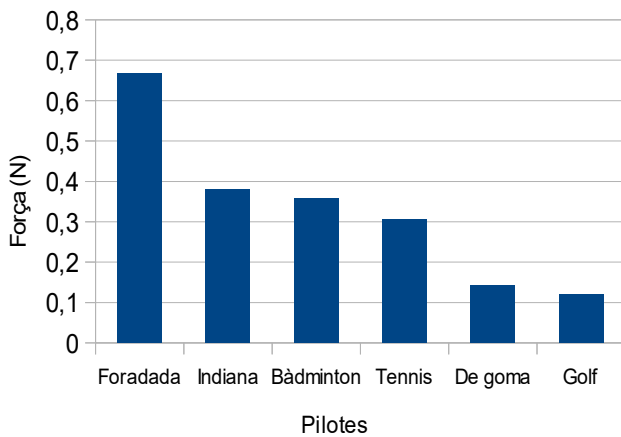
Desenvolupament de l'experiment. Aquesta vegada, per dur a terme l'experiment, es col·locaran els objectes dins del túnel i s'estudiarà la força de resistència aerodinàmica que experimenten només a màxima velocitat (13,7m/s o 49,3km/h). Es valorarà només la velocitat més alta ja que, com ha estat esmentat anteriorment, la F_{RA} a termes pràctics només es valora en altes velocitats. A continuació apareixen els resultats obtinguts:



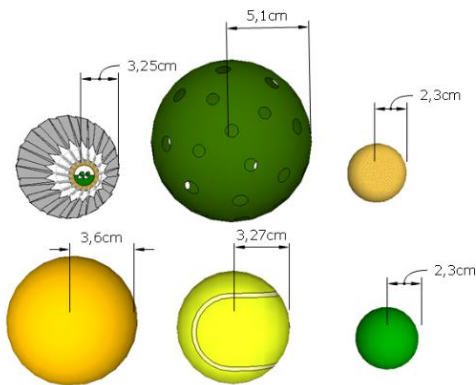
Pilota	Força (N)	Pilota	Força (N)	Vehicle	Força (N)	Vehicle	Força (N)
Indiana	0,381	Golf	0,119	Avió	0,088	Cotxe 2	0,138
Bàdminton	0,357	De goma	0,143	Camió	0,100	4x4	0,364
Tennis	0,305	Foradada	0,667	Cotxe 1	0,151		

Càlculs i raonaments.

Comparativa en les forces de RA de les pilotes



Il·lustració 85: Gràfic comparatiu de la força que rep cada pilota (Font: Pròpia)



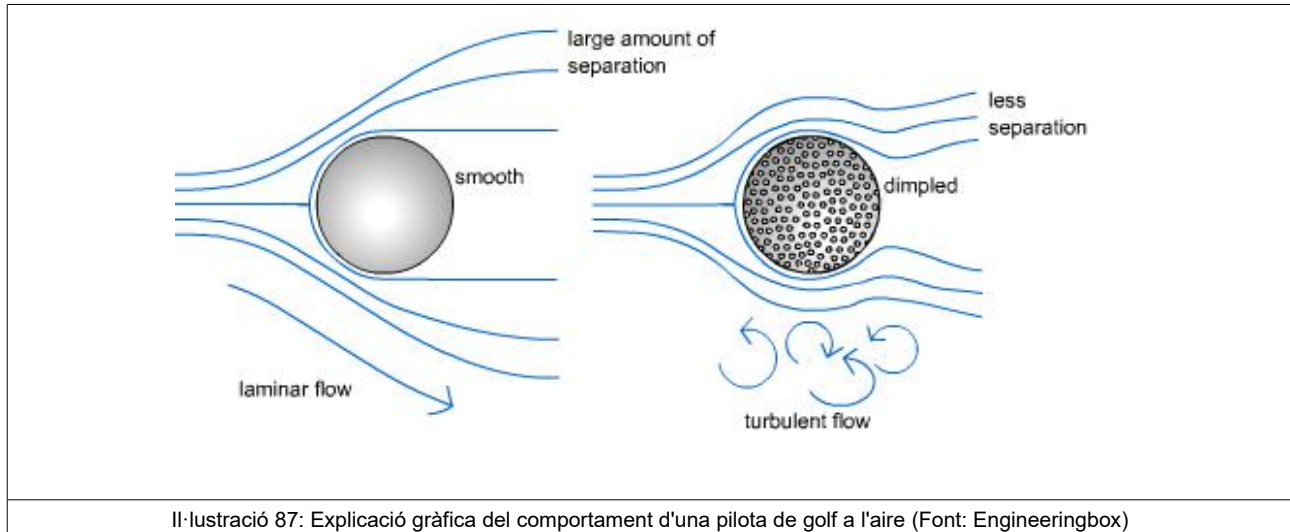
Il·lustració 86: Esquema comparatiu de les mides de les pilotes (Font: Pròpia)

Pel que fa a les pilotes, la comparativa s'ha pogut dur a terme directament a les forces, ja que tot i que tenen paràmetres diferents, són les característiques reals de joc (no han estat reduïdes a escala). Al gràfic de la dreta es pot observar, clarament, que la pilota menys aerodinàmica és la foradada mentre que les dues més aerodinàmiques són la de goma i la de golf. Pel que s'observa, el valor que més pes ha tingut en aquesta comparativa és el de l'àrea frontal. Com es pot observar en la imatge de sota el gràfic, les pilotes amb menys àrea han sigut les més aerodinàmiques i viceversa. En la imatge es mostra (d'esquerra a dreta): el volant de bàdminton, la pilota foradada, la pilota de golf, la indiana (vista frontalment), la pilota de tennis i la pilota de goma.

Dins de l'apartat de pilotes, cal fer una menció especial a la pilota de golf (la que ha mostrat una menor força de RA). Aquest tipus de pilotes aprofiten completament les forces aerodinàmiques. El fet que fa que tots els objectes es frenin en estar en moviment és la zona que deixen sense aire darrere seu, anomenada zona de depressió. Quan la pilota es colpejada i dur a terme el seu recorregut per l'aire, els forats o els alvèols redueixen la resistència a la pilota. Això s'aconsegueix perquè es formen uns petits remolins (turbulències) dins aquests forats, i aquests remolins el que



fan és reduir la zona de depressió. A més els forats, «inspiren» l'aire cap a la part superior de la seva superfície, produint una diferència de pressió que fa que la pilota es mantingui més temps en l'aire.



Pel que fa als vehicles, amb els quals no es pot experimentar en l'original per motius obvis, les forces aerodinàmiques sense contrastar no són útils. No es pot fer una comparativa de forces si cada força ha estat calculada en una reducció a escala diferent. Per tant, en aquesta part de la pràctica, es compararan els diferents coeficients aerodinàmics obtinguts realitzant els passos de la pràctica anterior:



Il·lustració 88: Comparativa dels c_a dels diferents vehicles (Font: Pròpia)

0,84 > 0,64 > 0,59 > 0,52

En ser vehicles de joguina no s'ha pogut trobar el coeficient real a internet. Tot i així, basant-se en la forma que tenen els vehicles i el vist fins ara, sembla ser una bona comparació. L'avió no ha estat inclòs en la comparació perquè no s'ha pogut trobar correctament el seu coeficient per culpa dels problemes en l'experimentació.

Conclusions. Pel que fa als resultats dels experiments, les mostres obtingudes en l'apartat de les pilotes han sigut força bones i encertades. El fet d'experimentar amb l'objecte real i no amb una maqueta dóna una visió més realista del comportament que tindria en un espai obert. Per tant, en aquesta part han sigut més importants les dades de força absoluta que no la comparació relativa que s'obté amb els coeficients.



L'experiment dels vehicles, en tractar-se de maquetes i reduccions a escales diferents, no ha estat realitzat tan correctament. De fet, una de les dades (la de l'avió) ha hagut de ser eliminada dels resultats perquè era totalment incorrecta. Tot i així, la comparativa final dels quatre vehicles terrestres sembla prou realista.

En conclusió, el túnel de vent construït pot prendre dades de qualsevol objecte que es pugui col·locar dins la zona de test. Tot i així, les pràctiques preparades on tots els paràmetres han estat creats perquè siguin perfectes (com en la primera) són molt més precises que les pràctiques d'objectes "reals" (com en la segona).



Pràctica 3: Com volen els avions?

Introducció. En aquesta pràctica s'estudiarà com s'ho fan els avions per sostenir-se en l'aire. Tot i que la pregunta sobre com volen els avions sembla que hagi de fer temps que està resposta gràcies al gran avenç de l'aeronàutica en els últims anys, no és així. Evidentment, els enginyers encarregats de dissenyar els avions saben quins són els factors que generen la força que sosté els avions en l'aire. Des del punt de vista de la física, però, no està tan clar.

L'objectiu d'aquesta pràctica és trobar els factors principals que ajuden a crear la força de sustentació que aguanta l'avió en l'aire i visualitzar-ho dins el túnel de vent construït.

Recerca d'informació. Després de realitzar una gran recerca a les webs qualificades d'internet i a llibres de física, s'arriba a la conclusió que la força de sustentació generada es pot explicar a partir de dues teories. La primera teoria defensa que els avions volen perquè la diferència de velocitats a dalt i a baix de l'ala provoca una pressió superior a la part inferior de l'ala que empeny l'avió cap amunt, aquesta teoria es justifica amb l'equació de Bernoulli. La segona teoria, defensa que quan les partícules d'aire impacten l'ala en cert angle són empeses cap avall, aquesta "empenta" provoca una força de reacció que, a l'hora, empeny l'avió amunt. Aquesta darrera teoria està basada en la tercera llei de Newton.

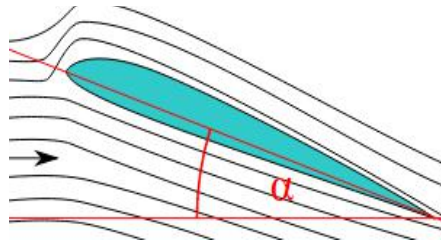
Precisant una mica més les parts més correctes de cada teoria s'arriba a la conclusió que els factors que afecten la sustentació (concretant en el cas dels avions) són els següents:

Velocitat relativa aire-cos:	La velocitat a què es mogui el cos a través de l'aire serà determinant a l'hora de generar sustentació. La sustentació és genera perpendicularment a la direcció de la trajectòria.
Densitat de l'aire:	La densitat de l'aire és directament proporcional a la força de sustentació
Relació velocitat superior-inferior:	L'aire es mou més ràpid per sobre l'ala que per sota. Per tant, segons el principi de Bernoulli, la pressió inferior serà més alta que la superior provocant una força cap amunt
Forma del cos:	La forma del cos és un dels principals elements a tenir en compte. Com més superfície tingui més sustentació generada, sempre que el pla d'aquesta superfície sigui paral·lel al flux d'aire. Les formes de les ales ajuden a que la velocitat de sobre sigui inferior a la de sota d'aquestes.



Angle d'atac:

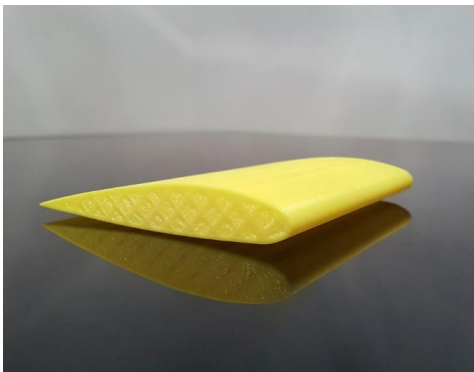
L'angle d'atac és l'angle del perfil de l'ala respecte la trajectòria d'un avió. Com més augmenta aquest angle, la velocitat de l'aire per sobre l'ala augmenta i, per tant, la pressió disminueix creant més sustentació. Aquest augment d'angle, però, és limitat, a partir de certa inclinació la sustentació decau. Aproximadament, l'angle que ofereix la màxima sustentació és de 15°



Il·lustració 89: Angle d'atac d'una ala (Font: Viquipèdia)

Desenvolupament pràctic. El desenvolupament d'aquesta pràctica no tindrà com a objectiu aconseguir dades quantitatives sinó valoratives. Per dur a terme aquesta pràctica s'han realitzat dos experiments que han estat gravats en vídeo i penjats a Youtube.

Per realitzar la pràctica s'ha imprès un perfil d'ala amb la impressora 3D.



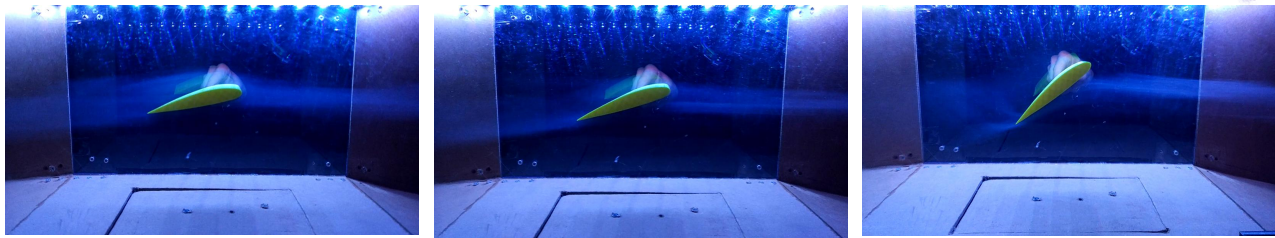
Aquest disseny d'ala ha estat descarregat d'internet. Concretament, és el model NACA 2145. Com es pot observar, la part superior de l'ala és corbada i té més superfície que la part de sota, que és plana. Aquesta ala serà amb la qual s'experimentarà dins el túnel de vent per crear els dos vídeos.

Il·lustració 90: Perfil d'ala imprès en 3D (Font: Pròpia)

Els vídeos d'aquesta pràctica es troben al canal de Youtube: Wind Tunnel Project al qual podeu accedir des d'aquest enllaç: <https://www.youtube.com/channel/UCtZAc7zLhh7C2i9O4ZZoD8w>

Dins del canal entre d'altres podreu veure els vídeos d'aquesta pràctica:

Vídeo 1 (NACA's 2145 airflow visualization): Mostra el perfil d'ala dins el túnel de vent. Al seu voltant s'observa el flux d'aire que el travessa gràcies al fum. En aquest vídeo s'estudia l'angle d'atac. Per angles d'atac baixos (de 0 a 15°) el fum que es mou a través de l'aire duu un flux laminar (uniforme). Quan l'angle segueix augmentant, es perd la sustentació ja que l'aire deixa de rodejar l'ala en flux laminar per començar a fer-ho de forma turbulent.



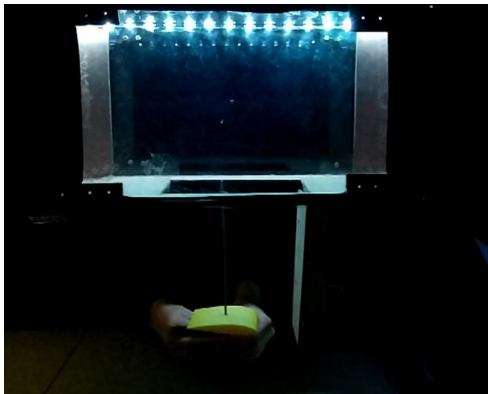
Angle d'atac a 10°
(Sustentació)

Angle d'atac a 20°
(Pèrdua de sustentació)

Angle d'atac a 45°
(Sustentació nul·la)

Il·lustració 91: Sustentació segons l'angle d'atac (Imatges del vídeo) (Font: Pròpia)

Vídeo 2 (A quick demonstration of Lift (Force)): Mostra el perfil d'ala travessat verticalment per una barra. Quan l'ala és fora del túnel cau per la força que fa el seu pes. En canvi, s'observa clarament que quan entra dins la zona de test, on la velocitat de l'aire és de 10m/s, l'ala puja fins dalt de tot de la barra. Aquest és un exemple claríssim de la força de sustentació.



Quan l'ala es troba fora el TDV, cau a la part baixa de la barra que la travessa.



Quan l'ala es troba dins el TDV en contacte amb la velocitat de l'aire, puja ràpidament a la part superior de la barra

Il·lustració 92: Sustentació segons l'existència de velocitat (Imatges del vídeo) (Font: Pròpia)

Conclusions. Pel que fa als experiments dels vídeos, s'ha demostrat que l'angle d'atac és molt important en la sustentació però que només es pot modificar fins a cert punt. Si és molt abrupte, la sustentació es perd. També s'ha vist que la velocitat relativa aire-cos és totalment necessària per crear la sustentació. Tot i que aquesta força a primera vista pot semblar dèbil, l'acceleració amb què puja el perfil d'ala en interactuar amb el vent és molt alta i, per tant, queda demostrat que pot aguantar més força de la que s'imagina.

A part, d'aquest parell de demostracions al canal del projecte es pot visualitzar altres exemples sobre com actuen les forces aerodinàmiques sobre cossos gravats i realitzats, també, en aquest prototip de túnel de vent.



9. Conclusions i valoracions

Aquest projecte ha tingut una duració de 8 mesos de treball i un total d'unes 400 hores dedicades entre els dos. Tot i haver estat un treball complex i llarg, s'està orgullós dels resultats obtinguts.

Pel que fa als objectius, s'ha aconseguit complir-los gairebé tots. L'objectiu principal del TDR era construir un túnel de vent en el qual poder experimentar i s'ha aconseguit clarament. Un dels objectius complerts a remarcar és la possibilitat de poder extreure dades numèriques de l'experimentació. Des d'un principi es veia molt complicat poder aconseguir una eina que realment pugues oferir dades útils per ser treballades posteriorment però finalment ha estat així.

Com en qualsevol treball, es podrien millorar certs aspectes del resultat final que no s'han pogut realitzar per la falta de pressupost, tecnologia o temps. Entre altres, els principals serien els següents:

- Regulació de la velocitat electrònicament: poder controlar la velocitat de l'aire des de l'ordinador. Aquest aspecte no ha estat possible, ja que el motor, al ser monofàsic, no permet aquest tipus de regulació.
- Millor sistema d'experimentació: La zona d'experimentació no té cap plataforma fixa sobre la qual repenjar els objectes i cada cop que es vol fer un experiment se n'ha d'improvisar una, cosa que suposa una pèrdua de temps. Aquesta millora també es notaria en la qualitat de les dades recollides.
- Control total d'una sola persona: El túnel, a causa de les dimensions, està pensat per ser utilitzat entre dues persones. L'ideal seria poder controlar-lo tot des d'un ordinador sense haver d'aixecar-se de la cadira. Dur a terme aquest tipus de monitorització implicaria invertir molt més temps i pressupost en el projecte.

Tot i així, cal repetir que s'està orgullós del resultat final, ja que era el que s'esperava des d'un principi. El fet de poder convertir en realitat una idea és molt satisfactori.

Com a valoració personal per part dels dos, aquest treball ens ha aportat una gran quantitat de coneixements tecnològics i físics. Tot i que hem treballat moltes hores, creiem que el resultat compensa el temps invertit. L'aportació principal d'aquest treball de recerca ha sigut aprendre a treballar de forma autònoma en un treball molt llarg. Per tant, l'organització ha sigut clau tant a l'hora de construir com a l'hora de redactar el projecte.



Finalment, com en tot projecte tecnològic original, és molt important compartir els coneixements obtinguts i les experiències del projecte amb el públic general perquè qui vulgui pugui beneficiar-se del treball que hem dut a terme i, així, ser útil. Per tant, per difondre aquest treball s'ha creat un compte d'Instagram (@windtunnelins) i un compte a YouTube (Wind Tunnel Project), dues de les xarxes socials més utilitzades mundialment, en els quals s'ha publicat parts del treball en anglès.

Enllaç al canal dels vídeos: <https://www.youtube.com/channel/UCtZAc7zLhh7C2i9O4ZZoD8w>



10. Bibliografia i webgrafia

A continuació es mostren els recursos utilitzats:

- «*Whirling Arms an the first wind tunnels*» (NASA) [grc.nasa.gov]
- «*Wind Tunnel History*» (Wikipedia) [wikipedia.org]
- «*Sir George Cayley – Making aviation practical*» (Century of flight) [century-of-flight.net]
- «*History of Wind Tunnels*» (NASA) [awt.grc.nasa.gov]
- «*This Wind Tunnel Tested Everything from WWII Fighters to Moon Rockets*» (Gizmodo)
- «*Túnel aerodinámico*» (Ecured) [ecured.cu]
- «*Wind Tunnel*» (Formula1 dictionary) [formula1-dictionary.net]
- «*NASA's Wind Tunnels*» (NASA) [nasa.gov]
- «*Fluid Flow Analysis*» Nelton Koo Chwee Yang, 2012.
- «*Open Return Wind Tunnel*» (NASA) [grc.nasa.gov]
- «*Wind-Tunnel Modeling of Flow*» F.H.Chaudhry & J.E.Cermak
- «*Experimental Aerodynamics*» G.Dimitriadis
- «*Reynolds Number*» (The Engineering ToolBox) [engineeringtoolbox.com]
- «*VENTILADORES HELICOIDALES*» (Soler&Palau) [solerpalau.es]
- «*Cómo elegir vidrio plástico*» (Leroy Merlin) [leroymerlin.es]
- «*Aerodynamics for Engineering Students*» Edward Lewis Houghton