

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi experimental i simulació de les pèrdues de càrrega lineals i singulars d'un fluid incompressible.

MEMÒRIA

Autor: Sergi Urgell Gil
Director: Enric Trillas Gay
Convocatòria: Juny 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest document es presenta el resum del procés d'anàlisi d'un fluid, concretament aire, a través d'un sistema de tubs. Aquest sistema es tracta del Plafó de Catalana de gas utilitzat a les pràctiques de l'assignatura de Mecànica de Fluids del grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials cursat a la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

Aquest sistema facilita l'estudi de les pèrdues de càrrega de l'aire que circula pels tubs. Es tracta d'un flux incompressible ja que és l'estudiat al grau, del qual s'estudien les pèrdues de càrrega lineals i singulars.

En primer lloc es recopila una base teòrica que permetrà entendre la dinàmica de fluids. Així doncs, es podrà comprendre el comportament que adquireix l'aire que circula pel sistema, és a dir, la seva turbulència, incompressibilitat i les pèrdues de càrrega provinents de la rugositat dels tubs i altres factors que influeixen en el procés.

Seguidament, es procedeix a la simulació experimental, on s'extreuen les dades necessàries que al final del treball es comparen amb les extretes a través de la simulació. Per a això últim, caldrà saber les condicions de contorn, de quin tipus de fluid es tracta i el disseny del sistema mitjançant Solidworks.

Un cop coneguts aquests factors, es realitza la corresponent simulació fent ús de Ansys Fluent, on s'estudien les pèrdues de pressions teòriques que pateix l'aire junt amb el seu comportament a partir dels perfils de velocitats.

Finalment es comparen les dades experimentals i simulades per tal de veure quin error hi ha i esbrinar els possibles factors que hi influeixen en que s'hi produeixin diferències.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
1. INTRODUCCIÓ	4
1.1 Origen	4
1.2 Motivació	4
1.3 Objectiu y abast del projecte	5
2. DINÀMICA DE FLUIDS	6
2.1 Introducció	6
2.2 Número de Mach (Flux incompressible i compressible)	6
2.3 Número de Reynolds (Flux Laminar i turbulent)	8
2.3.1 Flux laminar per un conducte circular	10
2.3.2 Flux turbulent completament desenvolupat	13
2.4 Efecte de la rugositat	16
2.5 Pèrdues de càrrega	17
2.5.1 Pèrdues de càrrega lineals	17
2.5.2 Pèrdues de càrrega localitzades	19
3. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL	21
3.1 Introducció	21
3.2 Metodologia	21
3.3 Característiques instal·lació	22
3.3.1 Tubs	22
3.3.2 Ventilador	23
3.3.3 Colzes	24
3.4 Resultats experimentals	25
4. METODOLOGIA	28
4.1 Metodologia general	28
4.2 Plantejament de l'estudi	28
4.3 Descripció geomètrica	28
4.4 Mallat	29
4.5 Definició de les condicions de contorn i inicials	30
5. DISSENY DELS TUBS	31
5.1 Introducció	31

5.2 Disseny	31
5.3 Croquis.....	34
6. ANÀLISI AMB ANSYS FLUENT	37
6.1 Introducció	37
6.2 Fluxos en conductes	37
6.3 Condicions de contorn	38
6.4 Mallat	39
6.4.1 Mallat estructurat.....	39
6.4.2 Mallat no estructurat	39
6.5 Model de turbulència k- ϵ	40
6.5 Simulació	40
6.5.1 Tram Recte.....	40
6.5.2 Colze 180°	42
6.5.3 Colze 45°	43
6.5.4 Colze 90°	45
6.6 Resultats	47
6.6.1 Tram recte.....	47
6.6.2 Colzes	52
6.6.1.1 Colze 180°	52
6.6.1.2 Colze 45°	56
6.6.1.3 Colze 90°	60
6.6.3 Resultats experimentals i simulats	63
7. PRESSUPOST	65
8. IMPACTE AMBIENTAL DEL PROJECTE	66
9. DESENVOLUPAMENT DEL TREBALL	67
CONCLUSIONS	68
FUTURES LÍNIES DE TREBALL.	70
BIBLIOGRAFIA	71
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTÀRIA	73

1. Introducció

1.1 Origen

La idea principal del Treball de Fi de Grau era l'estudi mitjançant la Dinàmica de Fluids Computacional (CFD) d'un fluid circulant per una canonada. Per tal de realitzar-ho, en primer lloc es va realitzar l'estudi del flux del gas natural comprimit des del dipòsit fins als injectors dels cotxes que funcionen amb motors Dual-Fuel, és a dir, dièsel combinat amb Gas Natural. Aquesta tecnologia beneficiava a la reducció de consum de dièsel i com a conseqüència la reducció d'emissions, sent així una tecnologia favorable al medi ambient. Així doncs, es va pensar en aquest tema degut a la seva importància en els últims anys mentre s'acaba de treballar en els vehicles híbrids i elèctrics.

Finalment, després de dedicar-hi hores d'estudi, com a conseqüència de que les característiques del gas donaven lloc a un gas compressible, es va decidir no avançar en per aquest camí ja que tot i intentar assimilar els coneixements necessaris, al grau no s'ha cursat l'estudi d'un gas compressible i per tant, era una idea arriscada de desenvolupar.

Així doncs, la temàtica final d'aquesta treball és l'estudi de les canonades de la pràctica de laboratori de l'assignatura de Mecànica de Fluids de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB). Ja que es volia seguir amb la idea de l'estudi d'un fluid a través d'una canonada mitjançant el CFD i sabent que l'estudi del gas natural comprimit als vehicles no era possible.

1.2 Motivació

Com s'ha dit anteriorment la motivació del treball de fi de grau és l'estudi mitjançant CFD d'un fluid a través d'una canonada. D'aquesta manera es vol millorar els coneixements de Ansys. Concretament Ansys Fluent, del qual es van adquirir coneixements a l'assignatura de Mecànica de Fluids tot i que no els necessaris per a l'estudi que es vol fer.

Aquest desig d'adquirir coneixements de les eines per a realitzar simulacions i estudis és degut a voler encara la meva carrera professional en aquest àmbit. Per tant aquesta és una bona manera d'introduir-me en el món de de l'anàlisi de sistemes mitjançant softwares.

1.3 Objectiu y abast del projecte

El projecte tindrà com a objectiu fer un estudi del fluid a través de les canonades disponibles al laboratori de la universitat ETSEIB. El fluid que s'estudia és aire a una certa velocitat d'entrada coneguda que circula a través d'uns conductes de coure i té una secció també donada.

En primer lloc, amb aquest estudi es pretén poder donar una eina de treball als futurs alumnes de l'assignatura, on podran veure que els valors obtinguts experimentalment es poden obtenir també mitjançant l'estudi CFD. Així podran comparar els seus resultats i determinar si són correctes i raonables.

En segon lloc, es podrà observar si l'estat del sistema instal·lat al laboratori es troba en bones condicions o si es dona el cas contrari, es buscarà els possibles punts on pugui estar deteriorat o on el funcionament no sigui correcte.

Així doncs, el treball consistirà en l'estudi experimental del comportament del fluid a través del conducte i la seva corresponent simulació numèrica CFD. Es dissenyaran els diferents recorreguts dels tubs del sistema amb Solidworks i es compararan els resultats experimentals i els obtinguts a través de les simulacions. Seguidament es farà un estudi dels costos i de l'impacte medi ambiental que pugui produir. Finalment s'extrauran conclusions dels càlculs realitzats i dels recorreguts dissenyats.

L'abast del projecte queda limitat pels coneixements sobre fluids obtinguts al grau. D'aquesta manera, com s'ha dit al primer punt, l'estudi es limitarà a l'aire que flueix a través del sistema instal·lat al laboratori, ja que es comporta com un fluid incompressible i en canvi no es podrà estudiar el comportament del gas natural degut a la seva compressibilitat. La idea inicial del projecte es deixarà per al treball de fi de màster on ja s'haurà realitzat l'assignatura de fluids en la qual s'assoliran els coneixements necessaris per poder treballar amb gasos compressibles.

2. Dinàmica de Fluids

2.1 Introducció

La dinàmica de fluids s'encarrega de l'estudi dels fluids en moviment i es tracta d'una de les branques més complexes de la mecànica. Això és degut a que tot i que cada fluid compleix les lleis del moviment de Newton, les equacions que segueixen poden arribar a ser realment complexes depenent de les característiques del fluid. És per això que en molts casos es representa el comportament del fluid amb models més senzills que permeten l'anàlisi d'aquest més detallat.

En el cas d'aquest treball de fi de grau, com es veurà més endavant, es tractarà amb un fluid incompressible. Això farà que les equacions del fluid siguin molt més senzilles que en el cas d'un compressible.

La hipòtesi d'incompressibilitat és vàlida per a fluids on la seva velocitat local és baixa o el gradient de pressions és petit. En general, aquesta hipòtesi d'incompressibilitat s'utilitza per fluids líquids però en el cas dels gasos és necessari el fet esmentat anteriorment.

La següent característica de fluid que es tractarà en aquest TFG serà la de estacionari. En primer lloc cal definir les línies de flux, les quals són la trajectòria descrita per un element de fluid en moviment. Un flux estacionari implica que cada element passa per un punt donat seguint la mateixa línia de flux que l'element que precedeix. També, en un flux estacionari, la velocitat en cada punt de l'espai roman constant en el temps, tot i que la velocitat d'una partícula pot variar al moure's d'un punt a un altre.

Finalment, les línies de corrent, que són les corbes la tangent de la qual en un punt qualsevol coincideix amb la direcció de la velocitat del fluid en aquest punt, en un flux estacionari coincideixen amb les línies de flux.

2.2 Número de Mach (Flux incompressible i compressible)

Per a l'estudi o anàlisi dels fluids compressibles, un dels paràmetres unidimensionals més important dels fluids és el número de Mach, M . Aquest, és l'indicador dels efectes de la compressibilitat que influeixen en un fluid.

Un flux es classifica com compressible o incompressible depenent de la variació de la densitat del fluid. Es diu que és incompressible quan la densitat d'aquest, no varia o es manté aproximadament constant. Generalment els líquids pateixen variacions molt petites per canvis grans de pressions i per tant en aquest cas es consideren que normalment són incompressibles. D'altra banda, els gasos són fluids altament compressibles ja que pateixen grans canvis en la seva densitat per a petites variacions de pressió.

El número de Mach també indica la relació existent entre les forces originades per la compressibilitat d'un fluid i les forces inercials. Generalment es tracta d'un terme utilitzat per tractar el moviment dels fluids sobre objectes. Finalment, també es pot plantejar com la relació entre la velocitat local del fluid i la velocitat del so, és a dir, segons l'equació 2.1:

$$M = \frac{V}{c} \quad (\text{Equació 2.1})$$

On:

v és la velocitat local.

c és la velocitat del so.

A partir del valor obtingut d'aquesta relació, el número de Mach ens indica amb quin tipus de fluid s'està treballant.

D'aquesta manera, es pot fer una primera divisió entre fluxos incompressibles i compressibles.

Els fluxos incompressibles són els que tenen un número de Mach petit respecte a la unitat. Considerant-se així incompressibles els fluids amb un número de Mach inferior o igual a 0,3 [1] ja que els efectes de compressibilitat es consideren negligibles.

Per part dels fluxos compressibles, aquests es poden dividir en 4 règims:

- **Subsònic:** el qual continua tenint un valor de Mach inferior a la unitat però superior al 0,3, concretament: $0,3 < M < 0,8$. Per tant, quedant fora del règim incompressible.
- **Transsònic:** on el número de Mach oscil·la al voltant de la unitat: $0,8 < M < 1,2$.
- **Supersònic:** on el número de Mach és superior a la unitat: $1,2 < M < 3$.
- **Hipersònic:** on el número de Mach és molt més gran que la unitat: $M > 3$.

El fluxos transsònics, són els que experimenten els dos règims, subsònic i supersònic. Per aquest motiu el seu càlcul s'ha de fer amb especial cura.

2.3 Número de Reynolds (Flux Laminar i turbulent)

Es poden trobar dos tipus de fluids, d'una banda amb comportaments suaus i ordenats, coneguts com a laminars i d'altra, caòtics, anomenats turbulents. Osborne Reynolds va ser l'encarregat de demostrar la diferència entre aquests dos tipus de fluxos. Va ser a partir d'un experiment on s'injectava un raig de colorant prim per un flux d'aigua a través d'un tub.

Es va observar que per a velocitats de flux baixes, el raig de tinta seguia una trajectòria homogènia i definida. Això indicava que s'havia traslladat en capes paral·leles, sense barrejar-se entre elles. A aquest tipus de comportament es va anomenar laminar.

D'altra banda, al incrementar la velocitat a partir un cert valor, s'observà que la tinta començava a tenir un comportament irregular per tota la secció transversal del tub. Aquest comportament era aleatori, tot el contrari al laminar. Es podien veure moviments del fluid perpendiculars a la direcció del flux. A aquest moviment se'l coneix com a turbulent.

Un altre factor que afecta al comportament dels fluxos és la viscositat. El flux laminar per exemple es troba en fluids molt viscosos que circulen per tubs de diàmetres petits.

Així doncs, es va demostrar que el fluid, a partir d'un cert valor crític fixe, passava de tenir un comportament laminar a turbulent.

Aquest valor, depèn de la geometria, la rugositat de la superfície, del tipus de fluid i la velocitat d'aquest, entre altres factors. És anomenat Reynolds i ve definit per la següent equació 2.2:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (\text{Equació 2.2})$$

On:

V: és la velocitat promig del fluid

D: és el diàmetre del tub

ν : és la viscositat cinemàtica del fluid

Amb tot això, i seguint amb l'explicació anterior, per a velocitats baixes, és a dir, número de Reynolds baix, concretament per a valors $Re < 1000$ [2], es correspondrà amb el flux laminar (figura 2.1), on poden aparèixer pertorbacions ocasionals que desapareixen ràpidament. Pel contrari, conforme s'augmenta el número de Reynolds, primerament es passarà per una etapa de transició on les fluctuacions aniran augmentant i desestabilitzant el flux laminar. I finalment, per a Re suficientment elevats ($Re > 10000$), les fluctuacions seran contínues i es correspondrà amb el flux turbulent (figura 2.2).

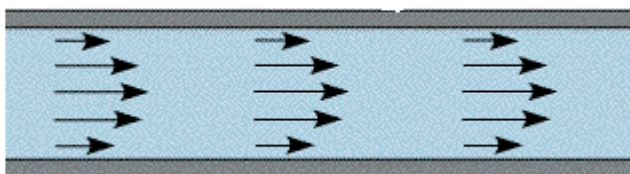


Figura 2.1. Comportament flux laminar.

[FONT: Elaboració pròpia a partir de [3].]

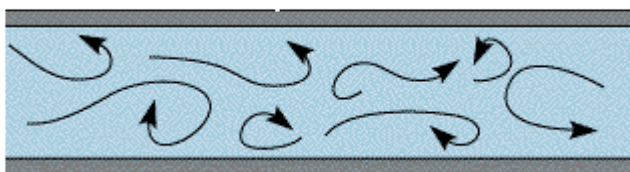


Figura 2.2. Comportament flux turbulent.

[FONT: Elaboració pròpia a partir de [4].]

Els fluxos turbulents es caracteritzen per les següents propietats:

- **Aleatorietat:** Els fluxos turbulents són caòtics, és a dir, irregulars i impredecibles.
- **No són lineals:** Aquest comportament fa que no sigui possible descriure'l amb les aproximacions lineals de l'equació de Navier-Stokes.
- **Dissipació:** Els fluxos turbulents necessiten una aportació d'energia constant per reposar les pèrdues viscoses. Altrament, la turbulència decauria ràpidament.
- **Tridimensionalitat:** Les partícules d'aquest tipus de fluxos experimenten moviments rotacionals i tridimensionals. Es caracteritzen per tenir fluctuacions grans de la vorticitat. Formant així estructures que es podrien identificar com a remolins. Sent aquests de diferents mides possibles, on els més grans contindran la major part de l'energia associada al fluid.

2.3.1 Flux laminar per un conducte circular

En el cas de números de Reynolds baixos, les partícules es desplacen amb trajectòries paral·leles, formant així en un conjunt de capes o làmines, d'aquí el nom de laminar. En aquest cas no es dona un barreja notable de les partícules del fluid.

La viscositat del fluid és la magnitud l'acció de la qual s'encarrega de negligir qualsevol tendència a que el fluid tingui un caràcter turbulent cosa que com s'ha dit, faria difícil caracteritzar el flux del fluid.

En el cas de les canonades, el perfil de velocitats del fluid va des de zero a les parets d'aquestes fins a un màxim a la línia central de la canonada, tal i com es pot observar a la figura 2.3.

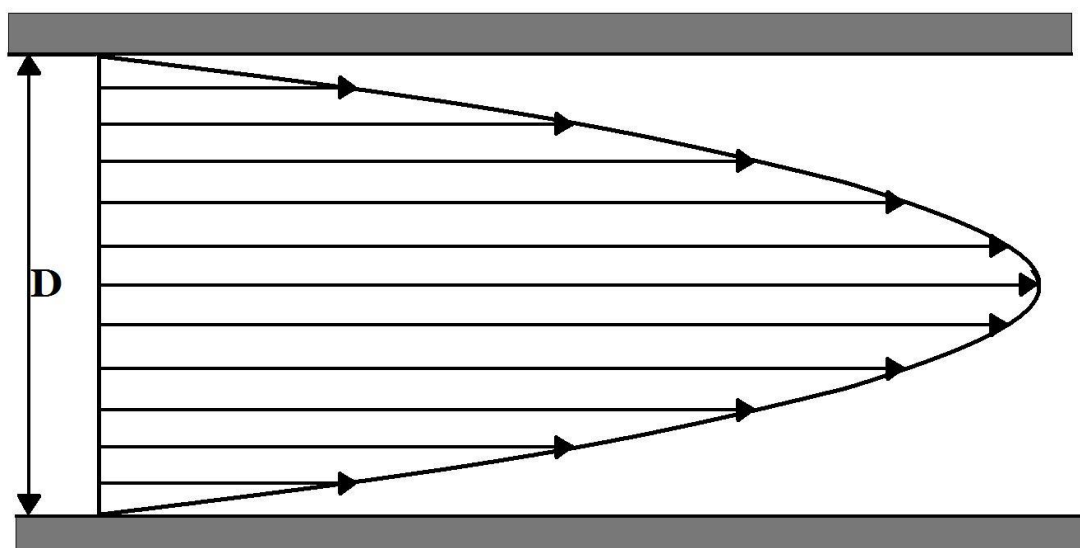


Figura 2.3. Perfil de velocitats flux laminar.

[FONT: Elaboració pròpia a partir de [5].]

Finalment, partint del perfil de velocitats en un conducte circular [6] es dedueix el coeficient de fricció λ . On primerament s'obté en funció de les tensions tangencials a la paret τ_w a partir del sumatori de forces com es pot veure a l'equació 2.3.

$$\Sigma F_x = \Delta p(\pi r_o^2) - \tau_w(2\pi r_o)L = 0 \quad (\text{Equació 2.3})$$

On:

ΣF_x = Sumatori de forces a l'eix horitzontal x.

Δp = Diferència de pressions.

L = Longitud del tub.

r_o = Radi del tub.

Quan $r = 0$ la tensió tallant τ_w s'anul·la. Quan $r = r_o$, la tensió sobre la paret coincideix amb el màxim de la tensió. La variació és lineal tal i com es pot observar a la figura 2.4, essent l'equació 2.3 vàlida tant per fluxos turbulents com laminars, ja que no s'ha imposat cap limitació respecte al tipus de flux.

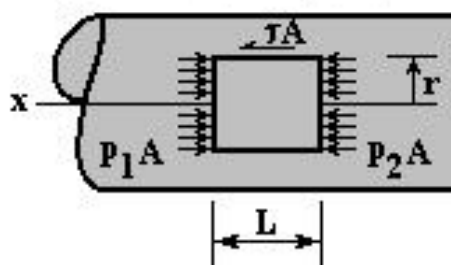


Figura 2.4. Diagrama de cos lliure d'un element diferencial.

[FONT: Elaboració pròpia a partir de [7].]

Com que $\frac{\Delta p}{\rho g}$ representa la pèrdua de càrrega h_f , s'obté l'equació 2.4.

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = h_f = \frac{2\tau_w L}{\rho g r_o} = \frac{4\tau_w L}{\rho g D} \quad \text{Equació 2.4}$$

La fórmula de Darcy-Weisbach és l'equació 2.5.

$$h_f = \lambda \frac{L V^2}{D 2g} \quad \text{Equació 2.5}$$

On si utilitzem les equacions 2.4 i 2.5, s'obté el coeficient de fricció en funció de les tensions tangencials (equació 2.6):

$$\lambda = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} \quad \text{Equació 2.6}$$

Amb això i com s'ha dit anteriorment, partint del perfil de velocitats (equació 2.7), es pot procedir a trobar el coeficient de fricció per a un flux laminar:

$$u = u_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad \text{Equació 2.7}$$

on:

$$u_{max} = \left(-\frac{dp}{dx} \right) \frac{R^2}{4\mu}$$

Seguidament, es desenvolupa el diferencial de pressions (equació 2.8) junt amb la fórmula del cabal (equació 2.9).

$$\left(-\frac{dp}{dx} \right) = \frac{\Delta p}{L} \quad \text{Equació 2.8}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{u_{max}}{2} = \frac{\Delta p}{L} \frac{R^2}{8\mu} \quad \text{Equació 2.9}$$

On:

Q = Cabal de flux.

A = Secció transversal per on circula el fluid.

μ = Viscositat absoluta.

En el cas del flux laminar la tensió tallant és l'equació 2.10.

$$\tau_w = \left| \mu \frac{du}{dr} \right|_{r=R} \quad \text{Equació 2.10}$$

I per tant resulta l'equació 2.11.

$$\tau_w = \frac{4\mu V}{R} = \frac{8\mu V}{D} \quad \text{Equació 2.11}$$

I finalment, junt amb l'equació de Darcy trobem el factor de fricció per un règim laminar, com es pot veure a l'equació 2.12.

$$\lambda = f_{lam} = \frac{8\tau_w lam}{\rho V^2} = \frac{64}{\frac{\rho V D}{\mu}} = \frac{64}{Re} \quad \text{Equació 2.12}$$

2.3.2 Flux turbulent completament desenvolupat

La majoria de fluxos que es troben a la pràctica a l'enginyeria són turbulents. Aquests fluxos són mecanismes complexos que estan dominats per fluctuacions i degut a això, tot i haver sigut investigats durant anys, encara no s'ha trobat una solució concreta per a aquest comportament. Per tant, s'ha de basar també amb el suport de d'experiments i correlacions empíriques.

Com s'ha esmentat anteriorment els fluxos turbulents es caracteritzen per fluctuacions aleatòries i ràpides que donen lloc a remolins. Aquests transporten massa, quantitat de moviment i energia. Això fa que augmenti la massa, la quantitat de moviment i la transferència de calor i així doncs, que donin lloc a valors més alts de coeficients de fricció.

A diferència del flux laminar, les expressions pel perfil de velocitat en fluxos turbulents es basen en l'anàlisi i en les mesures i tenen constants que es determinen experimentalment. El perfil de velocitats, per tant, és complex i s'hi distingeixen 3 regions les quals estan indicades a la figura 2.5.

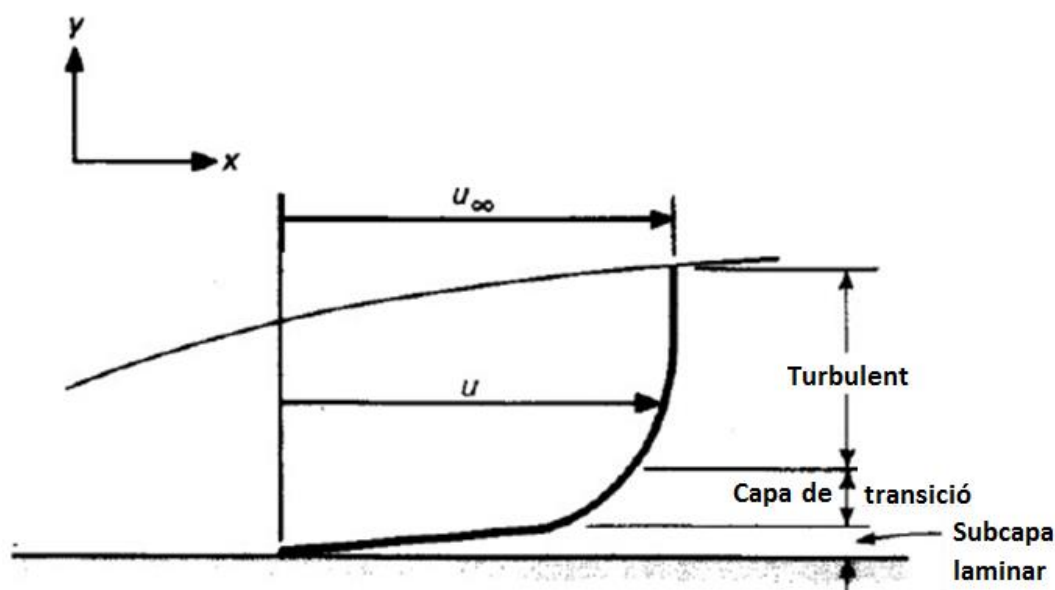


Figura 2.5. Perfil velocitats flux turbulent.

[FONT: Elaboració pròpia a partir de [8].]

- Regió interior: Esforços viscosos dominants.
- Regió exterior: Esforços turbulents dominants.
- Regió intermèdia: ambdós tipus són importants.

A la regió interior el fluid és essencialment laminar degut a que la paret amorteix qualsevol remolí que es formi. Així doncs, experimentalment s'ha demostrat que en aquesta capa, la qual suposa menys d'un 1% del diàmetre del tub, el perfil de velocitat és pràcticament lineal.

Per tant, el gradient de velocitat a la subcapa viscosa, roman quasi constant en $\frac{du}{dy} = \frac{u}{y}$ i l'esforç tallant del tall de la paret es pot expressar com l'equació 2.13:

$$\tau_w = \mu \frac{u}{y} = \rho \nu \frac{u}{y} \quad \text{Equació 2.13}$$

On y és la distància des de la paret ($y = R - r$ en tubs circulars). L'arrel quadrada de $\frac{\tau_w}{\rho}$ té dimensions de velocitat i per això s'ha de visualitzar com una velocitat fictícia anomenada velocitat de fricció u_* . Per tant si es substitueix aquesta relació a l'equació 2.13, el perfil de

velocitat per a la subcapa viscosa es pot expressar com l'equació 2.14:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{y u_*}{\nu} \quad \text{Equació 2.14}$$

A aquesta equació se la coneix com Llei de la paret.

A la regió intermèdia les dades experimentals per la velocitat es formen en línia recta si es grafiquen contra el logaritme de la distància des de la paret. Per tant l'anàlisi indica que la velocitat és proporcional al logaritme de la distància i així es pot expressar com l'equació 2.15:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y \cdot u_*}{\nu} + B \quad \text{Equació 2.15}$$

On k i B són constants trobades experimentalment, els seus valor són respectivament 0,4 i 5 aproximadament. Quedant així la següent equació per a la regió intermèdia (equació 2.16):

$$\frac{u}{u_*} = 2,5 \cdot \ln \frac{y \cdot u_*}{\nu} + 5 \quad \text{Equació 2.16}$$

Finalment a la regió exterior s'obté una bona aproximació si s'avalua la constant B de l'equació 2.15, imposant que la velocitat màxima es troba a la línia central del tub, on $r = 0$. En resum, al resoldre l'equació x amb aquesta imposició i fer que $y = R - r$ i $u = u_{m\grave{a}x}$, s'obté l'equació 2.17:

$$\frac{u_{m\grave{a}x} - u}{u_*} = 2,5 \cdot \ln \frac{R}{R - r} \quad \text{Equació 2.17}$$

On $u_{m\grave{a}x} - u$ és el desviament de la velocitat del valor de la línia central o defecte de velocitat i l'equació 2.17 s'anomena Llei de defecte de la velocitat.

2.4 Efecte de la rugositat

Totes les canonades presenten irregularitats de tots tipus, tant de formes com de mesures diferents. Al valor mig d'aquestes irregularitats se'l coneix com rugositat absoluta, la qual es pot definir com la variació mitja del radi intern de la canonada.

Aquest valor influeix de manera diferent segons la mida de la canonada. És a dir, per a canonades de diàmetre petit, la rugositat absoluta pot ser un aspecte important a tenir en compte. En canvi el mateix valor de rugositat absoluta per a diàmetres grans, pot produir efectes negligibles en les pèrdues de càrrega. És per aquest motiu que la rugositat a les canonades es caracteritza més adequadament per la rugositat relativa (equació 2.18), que correspon al quocient entre la rugositat absoluta i el diàmetre de la canonada.

$$K = \frac{\varepsilon}{D} \quad \text{Equació 2.18}$$

La rugositat absoluta dels diferents materials es va determinar gràcies als experiments de Nikuradse que consistien en produir una rugositat artificial en tub llisos (de vidre) a base d'enganxar àrids de diferents granulometries. És a dir, s'anava provocant una rugositat coneguda fins a aconseguir una pèrdua de càrrega igual a l'obtinguda a un tub comercial d'un material determinat i de les mateixes característiques.

Per dividir els tubs en llisos o no s'ha de mirar la rugositat e i la capa de paret viscosa:

- Si la rugositat $e < \delta_v$, aquesta no influeix en la fricció, per lo tant, es tracta d'un tub llis (figura 2.6 cas a).
- Si la rugositat $e > \delta_v$, aquesta sí que influeix en la fricció i per lo tant trobarem pèrdues degut a aquest fenomen (figura 2.6 cas b).

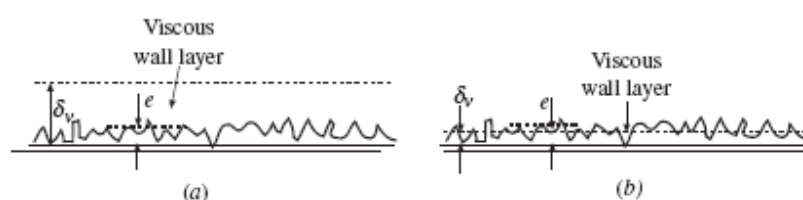


Figura 2.6. Tipus de rugositats.

[FONT: Elaboració pròpia a partir de [9].]

2.5 Pèrdues de càrrega

Les pèrdues de càrrega en un tub venen donades pel fregament entre les partícules del fluid i el que aquestes tenen amb les seves parets internes. Es defineixen com la pèrdua de pressió al llarg del recorregut d'una canonada en aquest cas.

Es poden trobar diferents tipus de pèrdues, com poden ser les lineals, accidentals o localitzades o degudes a circumstàncies especials.

2.5.1 Pèrdues de càrrega lineals

Com s'ha dit, els fluids tenen una viscositat la qual provoca un fregament entre les pròpies partícules i també amb les parets del tub. Aquest fregament s'ha de superar amb una despesa d'energia, o en altres paraules, aquest fregament genera les pèrdues de càrrega.

Al llarg de la història s'han anat esbrinant diferents mètodes per poder realitzar el càlcul d'aquestes pèrdues. Tots però, partint del mètode de Darcy-Weisbach. Aquests, van ser els encarregats de trobar l'equació que definiria les pèrdues de càrrega lineals a partir de diferents paràmetres coneguts (equació 2.19).

$$h_l = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Equació 2.19}$$

Un d'ells però, era el coeficient de fricció f . El problema d'aquest factor era trobar el seu valor, ja que depenia del número de Reynolds i del coeficient de rugositat. D'aquesta manera s'han anat trobant, com s'ha dit anteriorment, diferents mètodes per al seu càlcul:

- Blasius (1911). Aquest mètode, només vàlid per a valors de Reynolds entre 3.000 i 100.000, proposava un factor f en funció únicament del número de Reynolds i no dependent de la rugositat, és a dir, vàlid per tubs llisos (equació 2.20).

$$f = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad \text{Equació 2.20}$$

- Prandtl i Von-Karman (1930). Van ampliar el rang vàlid anterior (equació 2.21).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad \text{Equació 2.21}$$

- Nikuradse (1933). Va trobar una equació vàlida per a tubs rugosos (equació 2.22)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} \quad \text{Equació 2.22}$$

- Colebrook-White (1939). Van trobar el mètode que fos vàlid per tot tipus de fluxos i rugositats partir de les equacions anteriors. Es tracta del mètode més exacte però presenta l'inconvenient de que requereix iteracions per a trobar el valor del factor f (equació 2.23).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} \right) + \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \right] \quad \text{Equació 2.23}$$

- Moody (1944). Finalment va ser l'encarregat de facilitar la feina amb l'expressió de Colebrook-White a partir d'un diagrama (figura 2.7) on a partir del Reynolds i la rugositat, es podia trobar el factor de fricció f .

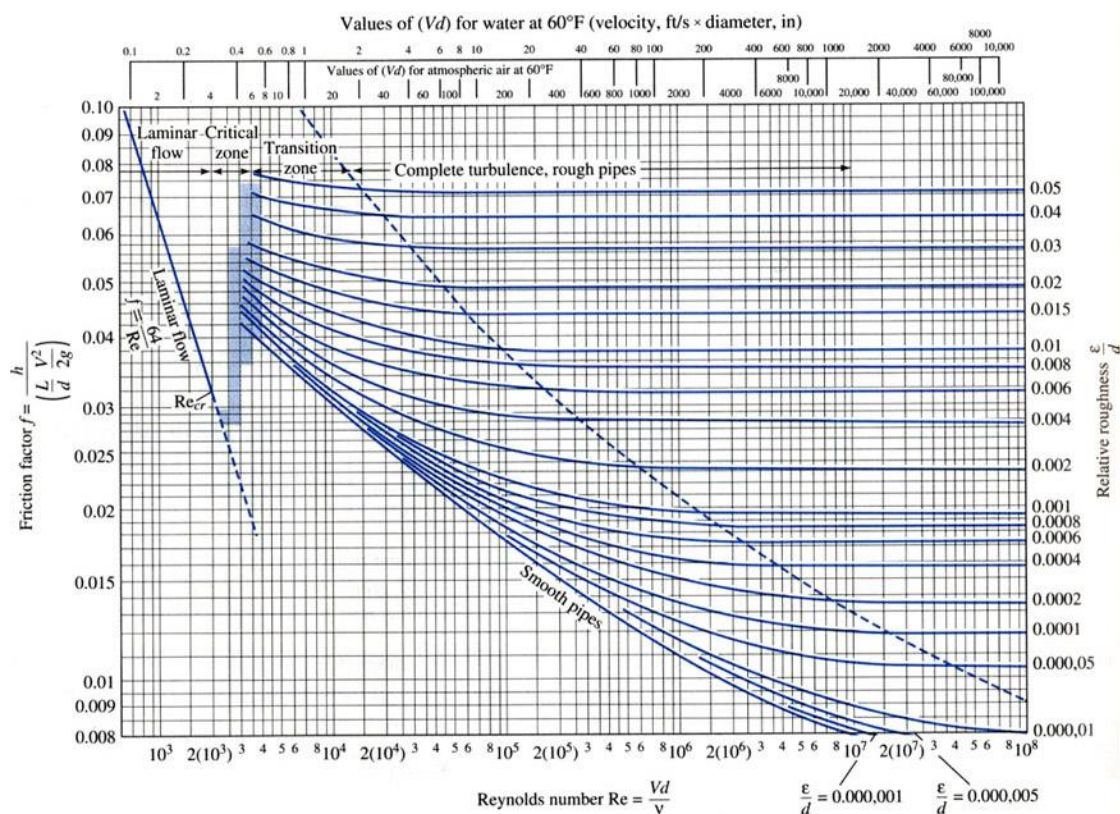


Figura 2.7. Diagrama de Moody.

[FONT: Elaboració pròpia a partir de [10].]

2.5.2 Pèrdues de càrrega localitzades

Els fluids en un sistema de tubs generalment acostumen a passar a través de diferents obstacles com poden ser unions, vàlvules, colzes, ramificacions, entrades, sortides, eixamplaments o contraccions, a part dels trams rectes.

Aquests components fan que el flux del fluid pateixi pèrdues addicionals a les lineals. En sistemes on els tubs són llargs, aquestes pèrdues acostumen a ser menors a les ocasionades per la fricció. Els fabricants són els encarregats de determinar aquestes pèrdues dels accessoris mitjançant experiments.

Així doncs, les pèrdues de càrrega localitzades s'expressen en termes del coeficient de pèrdua K_L , també conegut com a coeficient de resistència. Aquest es defineix com (equació 2.24):

$$K_L = h_{local} \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Equació 2.24}$$

On:

h_{local} = Pèrdues de càrrega ocasionades pels accessoris.

v = Velocitat del fluid.

En el cas del Plafó de Catalana de Gas, només trobem accessoris de canvis de direcció, sense canvis en el diàmetre. Aquestes seccions són conegudes com colzes o flexions. Aquestes pèrdues es deuen a la separació del flux en el costat interior de la corba i als fluxos arremolinats que es provoquen per diferents longituds de trajectòria. Degut a aquests fets, es poden reduir les pèrdues ocasionades als colzes facilitant la trajectòria del flux, és a dir, fent servir colzes circulars en comptes d'acantonats. Però això vindrà limitat per l'espai disponibles a les instal·lacions.

Aquestes pèrdues de càrrega localitzades no inclouen les pèrdues per fricció. Aquestes s'hauran de calcular com als tubs rectes, prenent com a mesura de longitud, la línia central de la corba.

3. Procediment experimental

3.1 Introducció

La pràctica 2 de laboratori de Dinàmica de fluids consisteix en calcular les pèrdues de càrrega a través dels tubs instal·lats al Plafó de Catalana de Gas.

Es tracta d'una instal·lació antiga (figura 3.1) per on circula aire a una certa velocitat impulsat per un ventilador radial. Les canonades han estat adaptades per a facilitar el càlcul de les pèrdues de càrrega en 4 trams diferents. Es tracta d'un tram recte i tres colzes de diferents angles (45° , 90° i 180°).

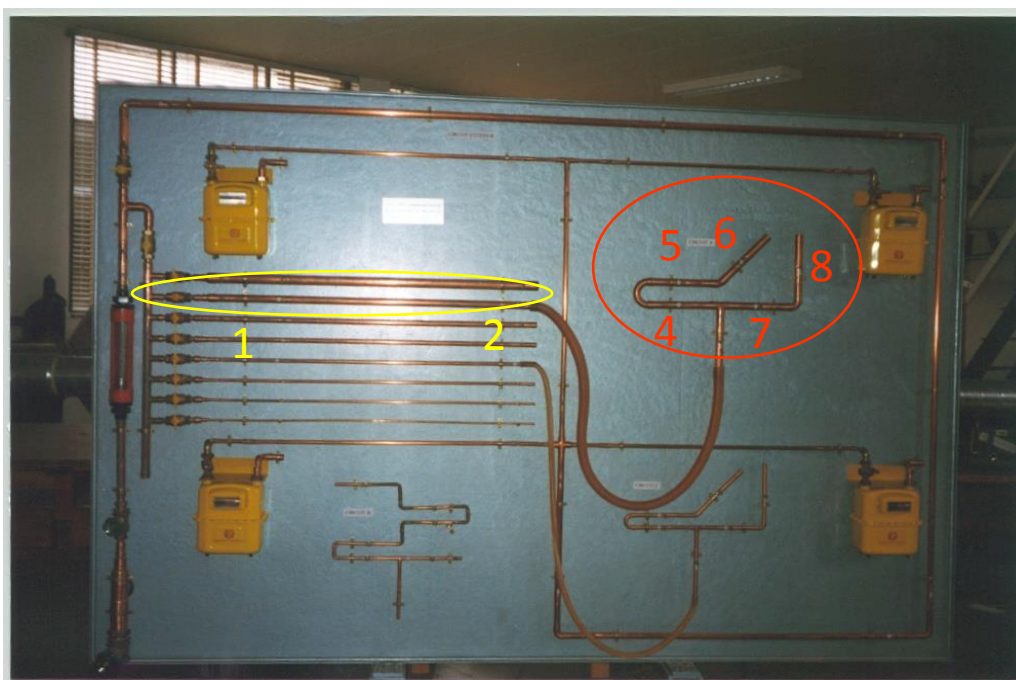


Figura 3.1. Plafó de Catalana de Gas.

[FONT: Elaboració pròpia]

3.2 Metodologia

En primer lloc, s'ha de calibrar l'aparell de mesura amb el que es podran obtenir les pèrdues de càrrega, el qual es tracta d'un micromanòmetre diferencial de columna inclinada. Un cop calibrat es procedeix a encendre el ventilador radial que proporcionarà un flux d'aire

a velocitat constant. Aquesta velocitat es mesurarà amb un rotòmetre que al observar-lo es pot veure que la velocitat que indica no es constant, sinó que el valor que marca oscil·la en una diferència de $\pm 0,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.

Després d'apuntar la velocitat a la que circula l'aire es procedeix a extreure les dades de les pèrdues de càrrega. Per a això la instal·lació, com s'ha dit, ha estat adaptada per facilitar aquest procediment. D'aquesta manera en cada tram a mesurar trobem unes sortides d'aire, per on s'ha intentat que surti el mínim fluid possible per a que les mesures siguin més exactes. A aquestes sortides se li acoblen els tubs del micromanòmetre i aquest ens indica la diferència entre les pressions de cadascun dels dos punts.

Aquest procediment s'ha de repetir per a cadascun dels trams a mesurar. Tot i així, els punts 4, 5, 6, 7 i 8, com es pot veure a la figura 3.1, es divideixen en dos trams. Això fa que per al càlcul de les pèrdues entre els punts 4 i 5 i entre els punts 5 i 6, s'hagi de tapar el tram dels punts 7 i 8 i fer una nova mesura de la velocitat indicada al rotòmetre.

El mateix procediment s'ha de fer per prendre les mesures dels punts 7 i 8, és a dir, tapant l'altra branca.

3.3 Característiques instal·lació

3.3.1 Tubos

Els tubs de la instal·lació del laboratori de Dinàmica de Fluids estan fabricats de coure. Les característiques d'aquest material fan que sigui apropiat per a instal·lacions d'aigua o gasos. Entre les avantatges tècniques es troba que són tubs que faciliten i alleugeren la col·locació i la preparació de les instal·lacions.

Es tracta d'un metall que té propietats importants com que és dúctil, mal·leable i té una bona conductivitat de la calor i l'electricitat. A més, es tracta d'una material que no pateix alteracions al estar en contacte amb gasos o aire sec. D'altra banda, davant la humitat, és un material que s'oxida per impedir atacs d'aquesta. Tanmateix, també ofereixen una gran resistència a la corrosió.

En quant a la part que més afecta a aquest treball, els tubs de coure tenen unes baixes pèrdues de càrrega. Això és degut a que la superfície interna de les parets dels tubs de

coure són bastant llises. I això es pot afirmar gràcies al coeficient esmentat anteriorment, ϵ , és a dir, la rugositat absoluta. D'aquesta manera, com s'ha dit, el vidre es considera llis i per tant té una rugositat absoluta molt propera a 0. En canvi, un tub de coure té una rugositat de 0,0015 [11], la qual és propera a zero i determina que aquest material és bastant llis. De totes formes, al tractar-se de tubs antics aquest valor segurament es veurà afectat i això influirà en els resultats obtinguts experimentalment.

3.3.2 Ventilador

L'element encarregat de subministrar aire al circuit és un ventilador radial. Es tracta d'un dispositiu alimentat per un motor elèctric que fa girar un impulsor. Aquest fa que l'aire es posi en moviment, el qual s'aspira des de l'entrada del ventilador i s'expulsa a 90° respecte la direcció inicial per la sortida del ventilador. És a dir, la toma d'entrada és ubicada de forma perpendicular a la sortida, tal i com es pot veure a la figura 3.2.



Figura 3.2. Ventilador radial.




[FONT: Elaboració pròpia a partir de [12].]

Un ús freqüent dels ventiladors radials es troba a les torres de refrigeració.

3.3.3 Colzes

Com s'ha esmentat amb anterioritat, es poden trobar dos tipus de pèrdues de càrrega, les lineals i les singulars. El factor K del que s'ha parlat anteriorment depèn, en el cas de la instal·lació treballada, dels angles dels colzes.

D'aquesta manera, es poden trobar tres valors teòrics diferents. Un pel colze de 45° (figura 3.3), un pel de 90° (figura 3.4) i un pel de 180° (figura 3.5). Aquests valors es poden veure a la taula 3.1.

Colze	Angle	K_L
 <p>Figura 3.3. Colze 45°. [FONT: Elaboració pròpia a partir de [13].]</p>	45°	0,4
 <p>Figura 3.4. Colze 90°. [FONT: Elaboració pròpia a partir de [14].]</p>	90°	0,9
 <p>Figura 3.5. Colze 180°. [FONT: Elaboració pròpia a partir de [15].]</p>	180°	1,5

Taula 3.1. Valors de K_L per cadascun dels colzes.

Tot i així, aquests valors de K_L no són fixes. Segons el fabricant o la publicació, aquest valor

variarà. Això pot ser un inconvenient a l'hora de buscar les pèrdues de càrrega locals. Per exemple en el cas del colze de 180° s'ha trobat un valor de K_L que realment oscil·la entre 1 i 1,5, depenent del radi de curvatura d'aquest. És per aquest motiu que s'han d'agafar uns valors K_L com a referència, els quals seran correctes sempre i quan estiguin dins d'un rang raonable. En el cas comentat, pel radi de curvatura del colze estudiat es considerarà un valor al voltant de $K_L = 1$.

3.4 Resultats experimentals

Un cop aplicada la metodologia anterior i haver pres les corresponents mesures, es van obtenir els resultats que es poden observar a les taules 3.2 i 3.3.

Tram recte	ΔP	$\frac{\Delta P}{\gamma}$	Δh	Cabal	Àrea	Velocitat	Factor de fricció f
Valor	65	5,527	0	$5,556 \cdot 10^{-3}$	$5,31 \cdot 10^{-4}$	10,4633	0,0322
Unitats	Pa	m. c. aire	m	$\frac{m^3}{s}$	m^2	$\frac{m}{s}$	—

Taula 3.2. Resultats obtinguts pel tram recte.

Colze	ΔP	$\frac{\Delta P}{\gamma}$	Δh	Velocitat	Δh_{total}	$\Delta h_{lineals}$	Δh_{locals}	K_L
180°	75	6,377	0,08	9,94	6,457	1,247	5,210	1,0347
45°	45	3,826	0,09	9,94	3,916	1,247	2,669	0,53
90°	70	5,952	0,145	9,94	6,097	1,247	4,850	0,96311
Unitats	Pa	m. c. aire	m	$\frac{m}{s}$	m. c. aire	m. c. aire	m. c. aire	—

Taula 3.3. Resultats obtinguts per a cadascun dels colzes.

Primerament, la primera característica que es pot verificar és el caràcter de compressibilitat del flux. Per a això, s'ha de calcular el número de Mach amb la velocitat obtinguda pel ventilador. D'aquesta manera, utilitzant l'equació 2.1 esmentada a la pàgina 6 es pot veure que:

$$M = \frac{10,4633}{343,2} = 0,0305$$

$$M = \frac{9,94}{343,2} = 0,029$$

Per tant, els valors obtinguts són molt menors a 0,3, fet que dona lloc a que es pugui afirmar que el flux té un comportament incompressible.

D'aquests resultats se'n poden extreure diverses primeres conclusions sobre la seva exactitud. Per començar, en el cas del tram recte s'ha obtingut un factor de fricció f de 0,0322. Si amb les dades obtingudes s'analitza el diagrama de Moody es pot veure els següents resultats:

$$\frac{\varepsilon}{D} = 7,1429 \cdot 10^{-5}$$

Per una velocitat de 10,4633 m/s :

$$Re = 12126,34$$

Per una velocitat de 9,94 m/s :

$$Re = 11519,87$$

Aquests dos valors permeten llegir el diagrama de Moody, d'on s'obté un factor de fricció aproximat de 0,03. Més endavant, amb la simulació de Ansys es compararan les pèrdues en un anàlisi teòric.

Simultàniament també es pot confirmar que es treballa amb un flux turbulent, fet a tenir en compte posteriorment a la simulació.

En el cas dels colzes, la primera observació s'obre l'estat dels tubs i l'exactitud dels resultats experimentals vindrà donat pels valors de K_L . Com es pot veure, pel colze de 180° s'ha

obtingut una $K_L = 1,0347$, mentre que el valor teòric està en $K_L = 1,5$. En aquest cas s'haurà de mirar amb detall el cas de simulació teòrica, ja que són dispars. En canvi, pels casos del colze de 45° ($K_L = 0,53$) i el de 90° ($K_L = 0,96311$), es pot observar que són similars als valors teòrics, $K_L = 0,4$ i $K_L = 0,9$ respectivament.

Seguidament es procedeix a la simulació mitjançant Ansys Fluent per corroborar si aquests resultats experimentals són correctes o presenten defectes.

4. Metodologia

4.1 Metodologia general

Per a complir l'objectiu de realitzar la simulació de flux a través de la canonada, cal fer ús no només d'un software capaç de d'utilitzar l'anàlisi de dinàmica de fluids computacional, en aquest cas ANSYS Fluent, sinó que primerament s'haurà de dissenyar l'objecte a estudiar i per a això es farà ús de softwares CAD, és a dir, assistents per al disseny per ordinador. Per a aquesta part del treball, s'ha pogut triar entre el software Catia o Solidworks, on s'ha optat finalment per aquest últim degut a que és el que més s'ha utilitzat durant el grau i es tenia major domini, tot i que l'objecte a dissenyar era senzill.

4.2 Plantejament de l'estudi

Per abordar correctament el problema plantejat, primerament s'han de definir clarament els objectius als quals es vol arribar. Aquest pas és el més important, on es sabrà quina orientació tindrà l'estudi, definint així les condicions de frontera, les condicions inicials i les condicions operacionals. Així doncs, és crucial que les dades anteriors vinguin de fonts fiables i es puguin contrastar.

4.3 Descripció geomètrica

Com s'ha dit anteriorment, aquesta part del treball requereix de l'ús de sistemes CAD, dels quals podem trobar Solidworks, Catia o bé, el Workbench de ANSYS proporciona un conjunt d'operacions per al disseny del model a representar. Aquest Workbench compta, al igual que altres sistemes CAD, amb modeladors 3D i 2D. On primerament es faran els esborranys en 2D per seguidament realitzar a partir de d'operacions booleanes el modelament en 3D. Tot i el fet de ser un modelador senzill, finalment s'ha optat per Solidworks per estar més familiaritzat amb els seu ús i així poder fer els canvis pertinents més ràpidament.

4.4 Mallat

Un cop definida i creada la geometria del model a estudiar, caldrà generar un mètode de control per al seu estudi. Així doncs, ANSYS proporciona el Meshing, o el que es el mateix, el paquet que permet la discretització de la geometria a estudiar, creant un mallat segons l'opció que es triï: Sweep, Tetraedres, Hexa Dominant i Automàtic.

- **Sweep:** Aquest mètode només s'utilitza si el sòlid a escombrar no és buit. El seu avantatge és que es tracte del mallat que menys elements i nodes utilitza i per tant el temps de càlcul es redueix. Utilitza hexaedres per a formar el mallat.
- **Tetraedres:** És l'únic mètode que no deforma el domini. Com el seu nom indica, aquest mallat està format per tetraedres que escombren el domini.
- **Hexa Dominant:** Aquest mallat està format per hexaedres majoritàriament. Tot i així, es poden trobar tetraedres formant part d'aquest mallat. Això dona lloc a que s'assembli a un mallat tipus automàtic on la principal diferència és que en el cas Hexa Dominant, un altre cop com el nom indica, el tipus d'element majoritari o dominant és el hexaedre.
- **Automàtic:** És una combinació d'hexaedres i tetraedres per fer un escombrat del sòlid a mallar.

La selecció del mètode de mallat anirà lligat a la geometria a estudiar. Així doncs, en el cas d'un tub, s'ha de buscar el mallat que representi millor el cas a modelar, per exemple, en aquest cas on es té un tub sense ramificacions ni canvis de secció, és a dir un tub troncal amb trams rectes i corbes, el mètode dels tetraedres serà l'utilitzat, ja que com s'ha dit no deforma el domini i és relativament senzill.

Com a últim pas s'ha de validar el mallat realitzat. Per a això hi ha diferents maneres de fer-ho, com per exemple i més senzill, seria comparar els valors obtinguts amb altres models en que ja se'n sàpiga quins són els resultats exactes. En el cas d'aquest treball, no es pot fer aquesta comparació i per tant s'ha d'utilitzar un altre mètode. D'aquesta manera el procediment a seguir és el de fer un mallat d'on s'obtenen uns primers resultats. Seguidament es realitza un refinament de la peça a les zones més crítiques i s'obtenen els següents resultats. Així doncs, la validació passa per comparar els resultats obtinguts, amb els de l'anterior mallat. Si aquests són molt similars, es pot dir que l'anterior mallat és correcte. En cas contrari caldrà tornar a realitzar aquest procés tants cops com sigui necessari fins que es doni el cas esmentat.

És clar que conforme més densitat d'elements, més acurat seran els resultats obtinguts, però comportaran un ús major de memòria de l'ordinador i més temps de càlculs.

4.5 Definició de les condicions de contorn i inicials

A fi de poder realitzar correctament la simulació, les condicions de contorn i inicials han d'estar perfectament definides, ja que aquestes proporcionen a la resolució per mètodes numèrics la informació necessària per iniciar els càlculs. D'aquesta manera, la primera condició frontera que es troba, es tracta de que la component normal de la velocitat relativa del fluid respecte a la superfície ha de ser zero, ja que el fluid no pot travessar les parets del tub. Així doncs aquest fet fa que la component tangencial de la velocitat sobre la superfície sigui nul·la i a aquesta condició se li denomina no lliscament.

Seguidament s'ha de triar amb quin tipus de fluid es tractarà, laminar o turbulent. Per a això, s'ha de calcular el número de Reynolds, on com s'ha dit anteriorment, un Re petit significarà que es tracta d'un flux laminar, on aquest flux es desenvolupa de manera regular, sense variacions brusques ni pertorbacions i descrivint capes paral·leles. Per altra banda, si el número de Reynolds és alt, es parla d'un flux turbulent, on aquest es desenvolupa de manera irregular. Les variables del moviment mostren un comportament aleatori o caòtic, fent que les petites pertorbacions que es puguin donar, al contrari del flux laminar on aquestes quedaven negligides gràcies a la viscositat, en aquest cas es veuen amplificades.

Així doncs, la turbulència es produeix de manera tridimensional, cosa que fa que l'estudi teòric de les equacions de Navier-Stokes siguin encara un problema a resoldre, ja que a partir de les condicions de contorn i inicials es pot arribar a una solució global, però no es pot demostrar que aquesta sigui única.

Això és degut a que els fluxos turbulents són molt sensibles a petites pertorbacions d'aquestes condicions inicials i de contorn, cosa que crea inestabilitat a mesura que augmenta el número de Reynolds ja que no s'aconsegueix controlar la linealitat.

5. Disseny dels tubs

5.1 Introducció

Per analitzar el flux de l'aire s'ha hagut de fer un disseny del tub. Primerament es va anar al laboratori per fer les mesures necessàries. Entre elles el diàmetre, la longitud de la canonada i en els casos dels colzes, el seu angle de desviació.

5.2 Disseny

Com s'ha dit al apartat anterior, amb l'ajuda de Solidworks, s'ha dissenyat els 4 corresponents recorreguts. Aquests són:

- Tram recte (figura 5.1)
- Colze de 180° (figura 5.2)
- Colze de 45° (figura 5.3)
- Colze de 90° (figura 5.4)

D'aquesta manera es podrà veure les diferències en les distribucions de velocitat i pressió i en les pèrdues de càrrega singulars, lineals i per tant, totals.

A continuació podem veure les figures en vista isomètrica per a cada disseny:

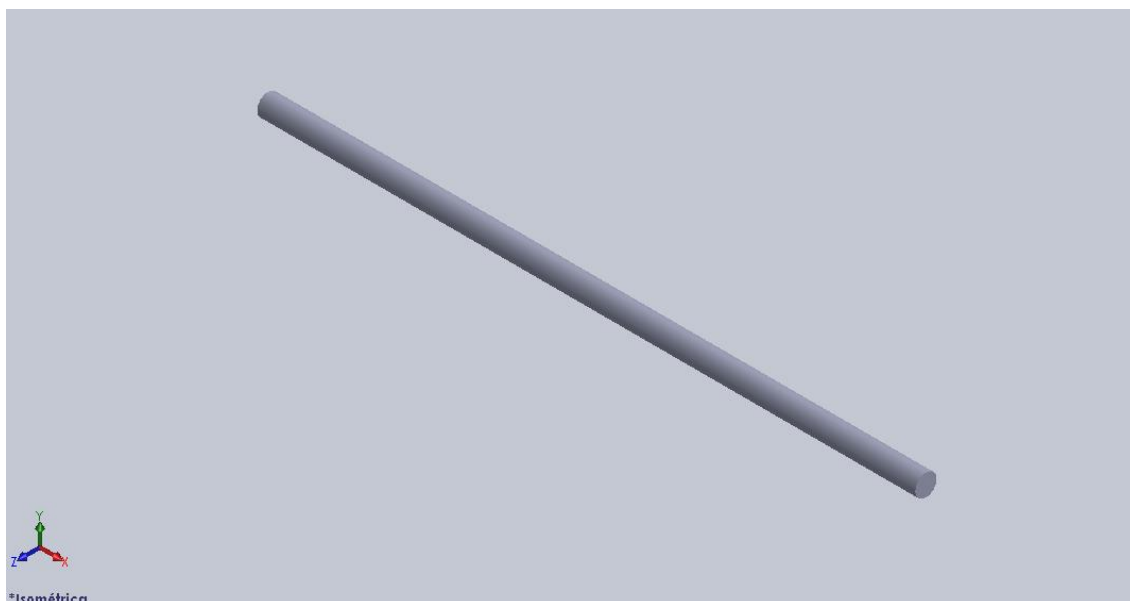


Figura 5.1. Disseny en isomètric del tram recte.
[FONT: Elaboració pròpia.]

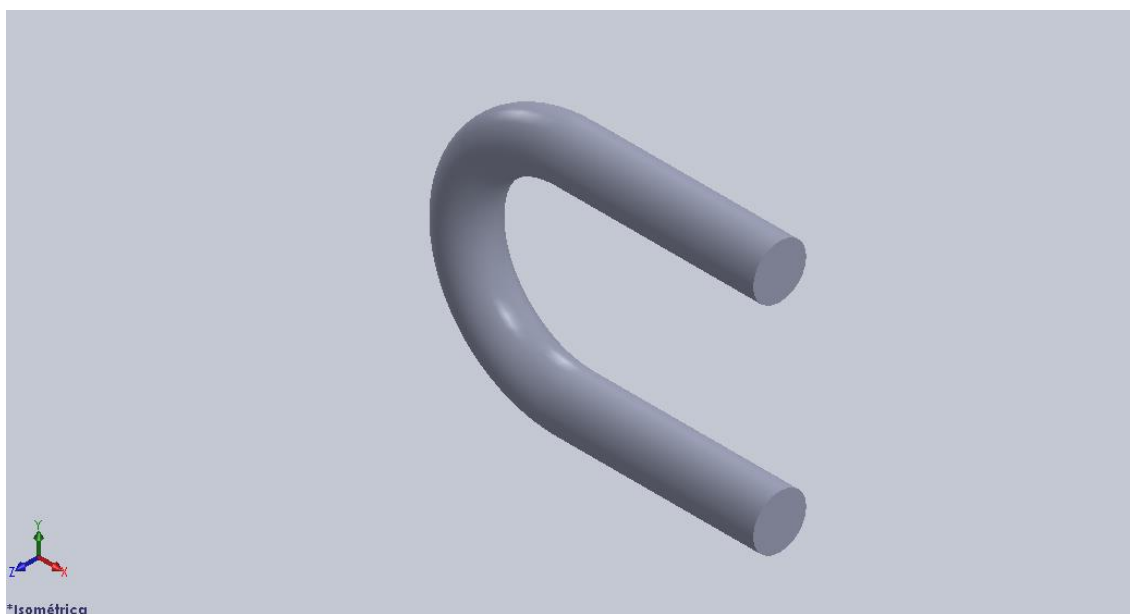


Figura 5.2. Disseny en vista isomètrica del colze de 180°.
[FONT: Elaboració pròpia.]

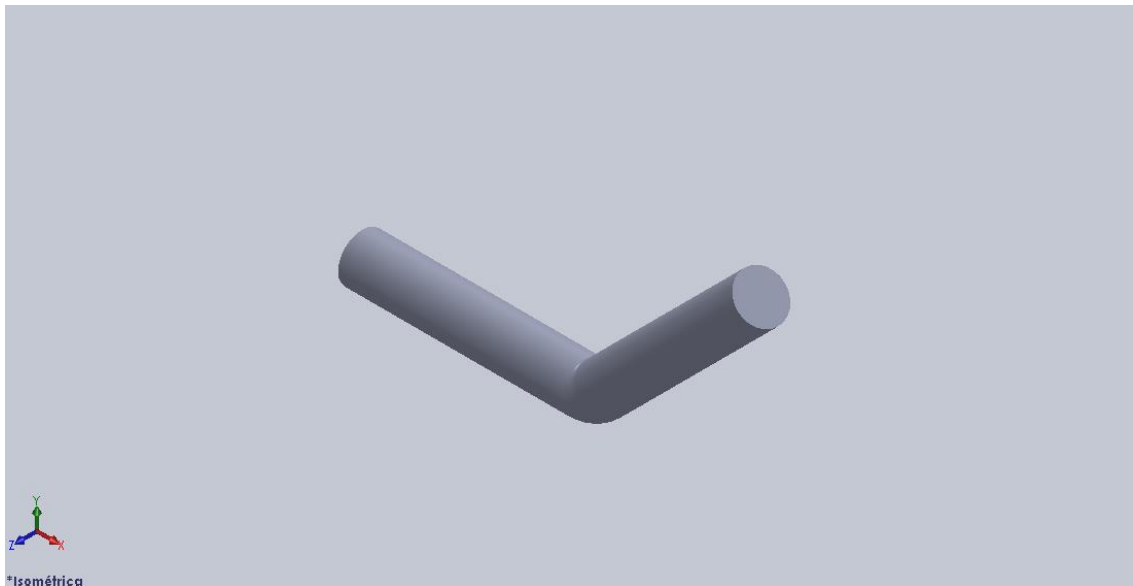


Figura 5.3. Disseny en vista isomètrica del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia.]

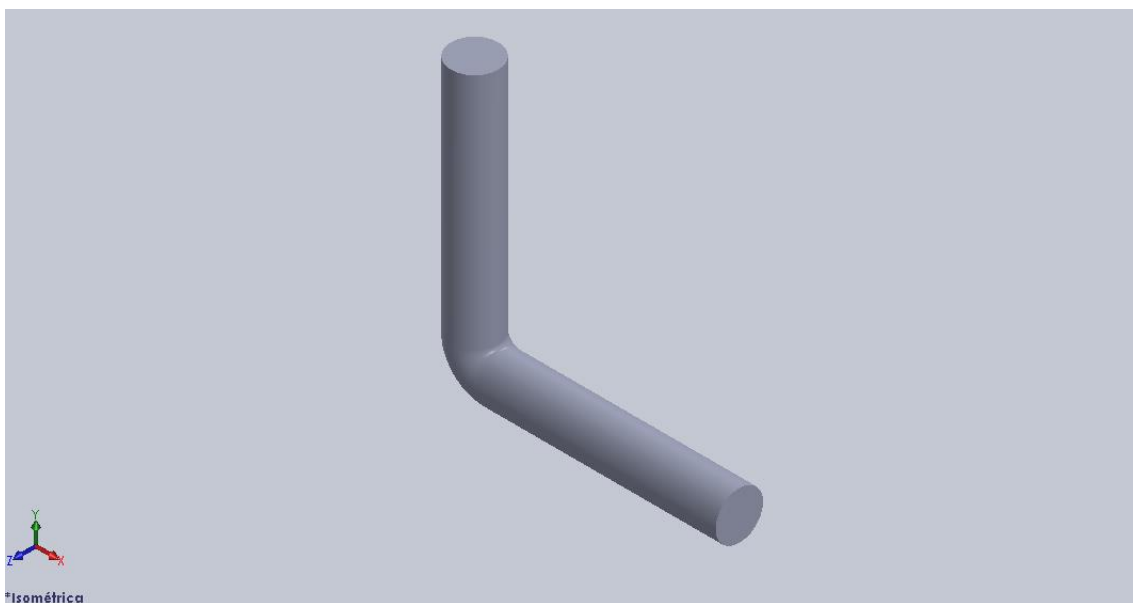


Figura 5.4. Disseny en vista isomètrica del colze de 90°.

[FONT: Elaboració pròpia.]

5.3 Croquis

A continuació s'observen les mesures del tub utilitzades per al seu disseny mitjançant Solidworks (figures 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8).

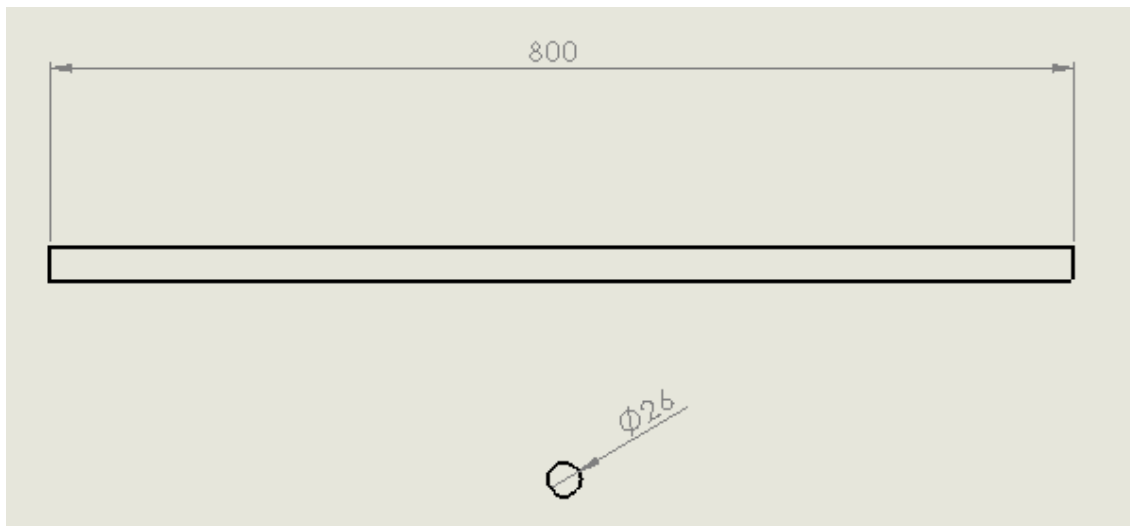


Figura 5.5. Croquis del tram recte.

[FONT: Elaboració pròpia.]

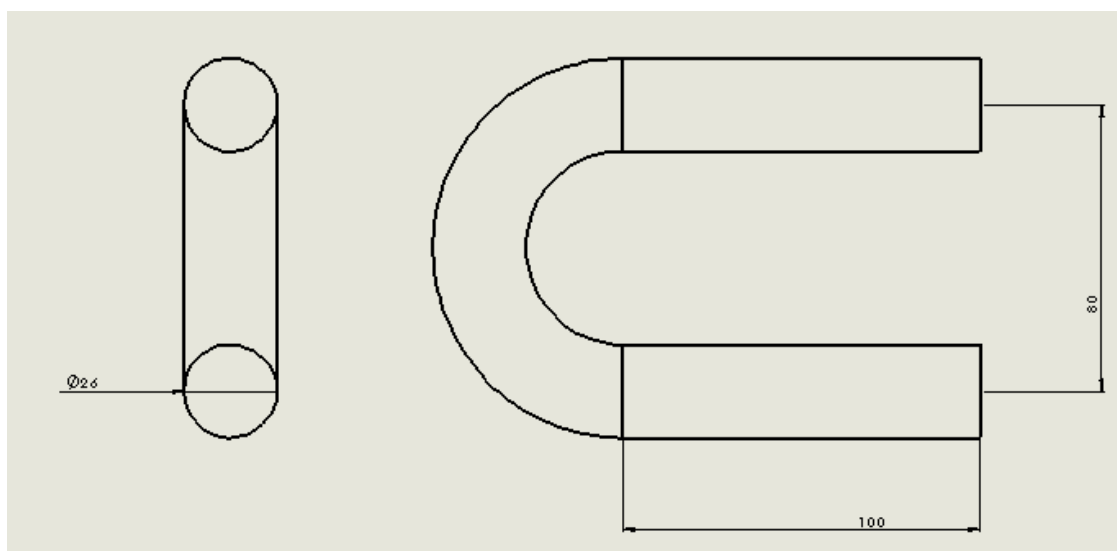


Figura 5.6. Croquis del colze de 180°.

[FONT: Elaboració pròpia.]

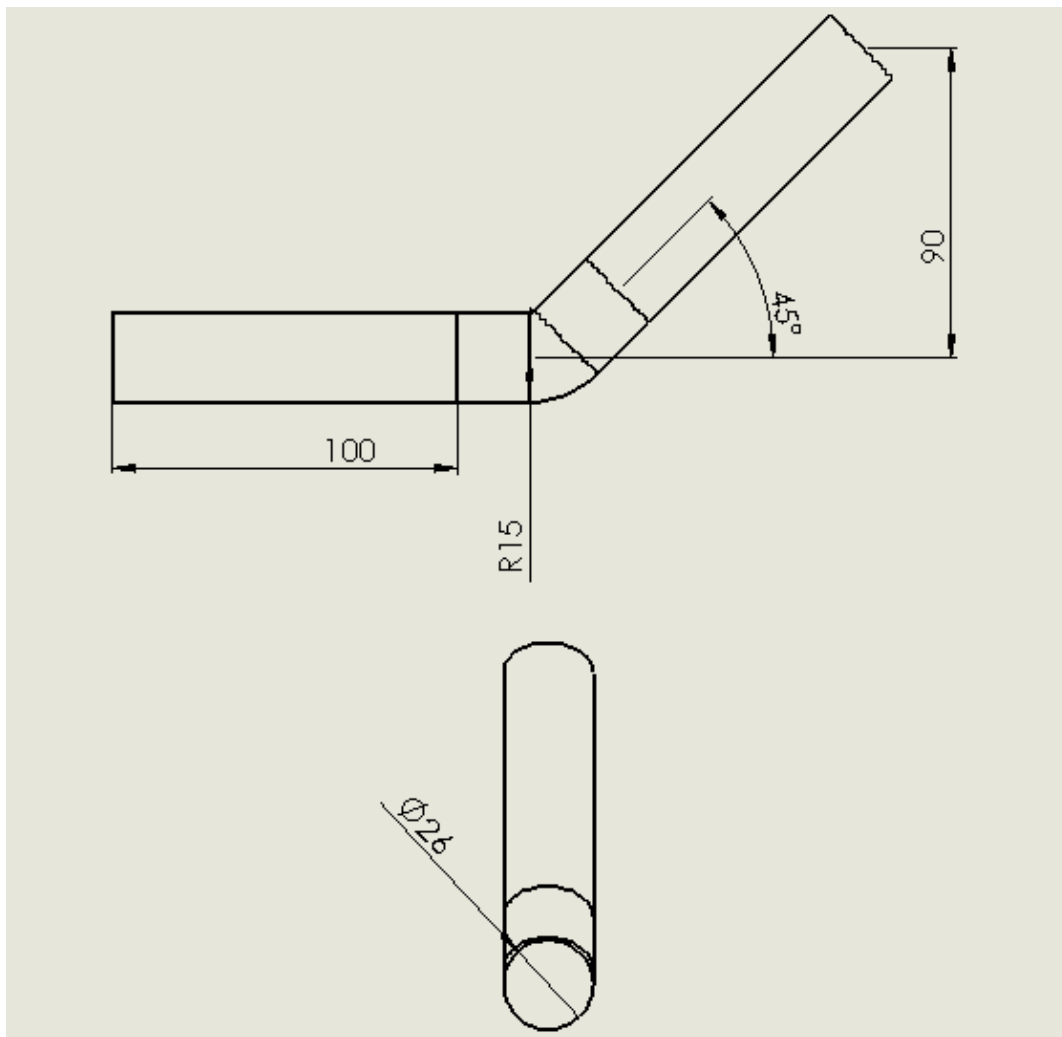


Figura 5.7. Croquis del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia.]

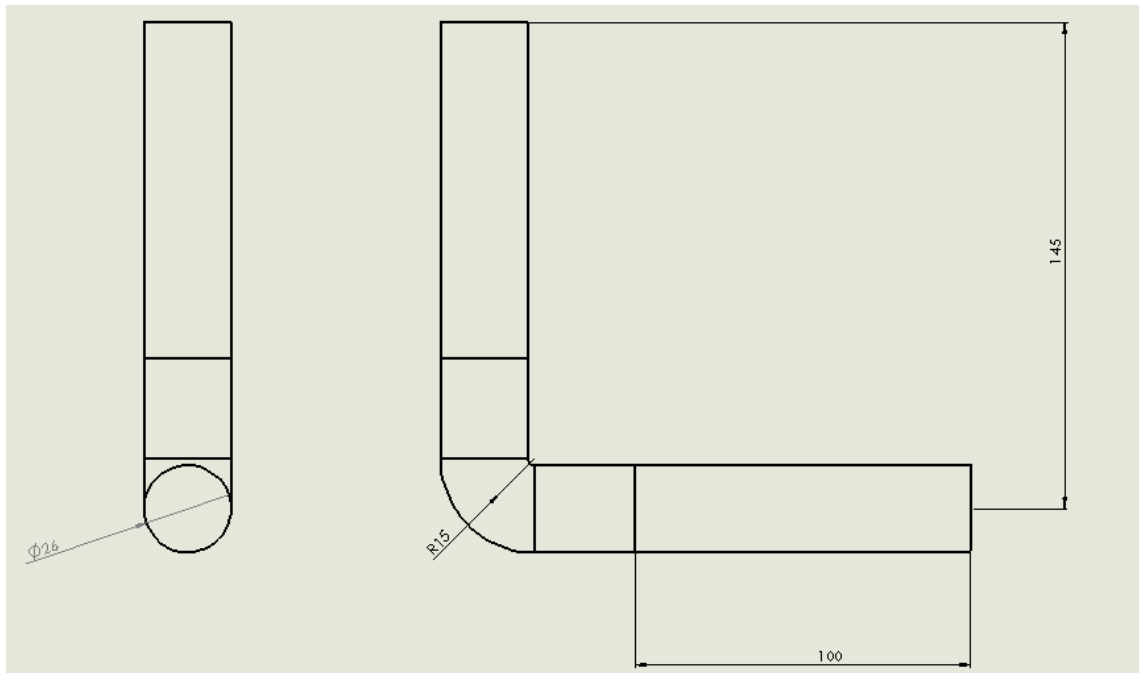


Figura 5.8. Croquis del colze de 90° .

[FONT: Elaboració pròpia.]

Com es pot veure són dissenys senzills, els quals només representen el tram del flux entre els dos punts de mesura de cada obstacle.

6. Anàlisi amb ANSYS FLUENT

6.1 Introducció

Primerament, al analitzar el flux de l'aire a través del conducte, s'haurà de tenir en compte si es tracta d'un gas compressible o incompressible. En el segon cas, el que ho caracteritza és que la densitat no variarà en cap cas, ja sigui per canvis de velocitat o pressió. D'altra banda, s'ha negligit les pèrdues degudes als canvis de temperatura, cosa que portaria a problemes més complexos.

A continuació, un cop definits aquests aspectes, es realitza una simulació a través de la Dinàmica de Fluids Computacional, també abreujat i conegut com CFD. Això es basa en la utilització d'ordinadors per a resoldre les equacions de dinàmica de fluids i així poder aplicar-les a problemes reals.

Aquesta eina fa ús dels mètodes numèrics per fer les aproximacions necessàries per trobar les millors solucions a cada problema plantejat sobre el comportament dels fluids i tot lo relacionat. Amb tot això, les simulacions CFD treballen i aproximen les equacions que descriuen la física darrere del fluid mitjançant l'anàlisi numèric.

Finalment, l'ús que fa l'usuari és el resultat d'ajuntar les característiques d'aquest software i aplicar-ho a problemes reals. I en cas de voler fer una verificació o validació dels resultats, hauria de realitzar l'experiment que pertoqui.

6.2 Fluxos en conductes

La pressió al llarg del moviment del flux va experimentant una pèrdua, de manera que al llarg de la seva trajectòria degut a la fricció, deixa de ser constant. Com s'ha calculat anteriorment, es tracta d'un flux incompressible i com a tal, la característica principal és que la seva densitat es manté constant al llarg de tot el recorregut.

Entrant en detall, aquest fet farà que la velocitat al conducte sigui en tot moment constant degut a l'equació de la continuïtat en estat estacionari (equació 6.1) entre dos punts del conducte, per exemple l'entrada i la sortida:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s \quad \text{Equació 6.1}$$

Desenvolupant el flux màssic en les seves variables queda de la següent forma (equació 6.2):

$$(\rho VA)_e = (\rho VA)_s \quad \text{Equació 6.2}$$

On:

ρ = Densitat del fluid

V = Velocitat

A = Àrea transversal

En el cas del conducte estudiat, es tracta d'una secció constant, el que dóna el següent resultat (equació 6.3):

$$(\rho V)_e = (\rho V)_s = K \quad \text{Equació 6.3}$$

D'aquesta manera, al ser la densitat constant per ser un fluid incompressible, es pot veure que la velocitat també romandrà constant al llarg del recorregut.

6.3 Condicions de contorn

Les condicions de contorn i inicials que s'han utilitzat per a realitzar la simulació, han vingut donades per les característiques del sistema instal·lat. És a dir, es coneix la velocitat d'entrada de l'aire, la qual serà la primera condició inicial. La temperatura en què es treballa no es tindrà en compte ja que no es farà un anàlisi de les pèrdues per transmissió de calor, ja que complicaria més el problema plantejat. A la sortida del tub, s'ha posat la condició de que sigui lliure, és a dir, obtindrem quina pressió tindrà el gas en aquest punt amb la pressió d'entrada indicada. Finalment, s'han indicat les característiques del aire, aportant així les dades següents:

$$\text{Viscositat: } 1,812 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s} [16]$$

$$\text{Densitat: } 1,205 \frac{kg}{m^3} [17]$$

La pressió d'entrada vindrà determinada per la velocitat inicial.

6.4 Mallat

Com s'ha explicat anteriorment, l'anàlisi amb ANSYS es basa en resoldre el problema mitjançant els mètodes numèrics. Aquest mètode transforma les equacions diferencials en equacions algebraiques, també conegut com discretització. D'aquesta manera serà necessari crear un mallat del conducte per a que dugui a terme aquesta discretització en una selecció de punts, els quals la seva unió acaben creant cel·les que poden tenir distintes formes, segons l'usuari desitgi. Aquestes geometries resultants de les cel·les poden ser triangles o quadrilàters en el cas que sigui un mallat bidimensional o de tetraedres, piràmides o prismes en el cas del tridimensional.

Amb tot això es troben dos tipus de mallats, l'estructurat i el no estructurat.

6.4.1 Mallat estructurat

Es tracta d'una distribució ordenada dels elements de sistema estudiat. Amb això, es facilita els càlculs a l'ordinador degut a que l'accés a una cel·la és ràpid, és a dir ocupa menys memòria de l'ordinador, de manera que la cel·la del seu costat serà la qual el seu índex sigui un número més o un menys de la cel·la corresponent.

Aquest mallat es pot representar de manera cartesiana o curvilínia, sent en el cas cartesià, cel·les amb les seves línies paral·leles als eixos. En el segon cas, aquestes línies s'adapten al sistema estudiat, de manera que es deformen. Vist d'una altra manera, en el cas cartesià les línies es creuen amb angles de 90° i en el curvilini no.

6.4.2 Mallat no estructurat

En aquest cas, l'inconvenient que té és que ocupa més memòria de l'ordinador, al contrari que el mallat estructurat. D'altra banda, és un mallat senzill de generar per a l'ordinador, independentment de la complexitat de la geometria i això fa que trigui menys a fer-lo. Això permet flexibilitat per analitzar tot tipus de geometries sempre i quan es defineixin un paràmetres adequats a fi d'obtenir una bona qualitat de malla i bons refinaments. Aquests refinaments ajudaran a arribar a resultats molt més acurats.

Aquests mallats estan formats per quadrilàters i triangles en sistemes bidimensionals.

6.5 Model de turbulència k- ϵ

Al punt 3.4 s'ha calculat el Reynolds tant pel tram recte com pels flux dels colzes i s'ha obtingut un valor d'aquest elevat. D'aquesta manera, es tracta d'un flux turbulent i s'haurà de tenir en compte a l'hora de fer la simulació.

El model k-Èpsilon és considerat el model estàndard de la indústria i per tant, un dels més importants i aplicat en la majoria de codis CFD.

Això és degut a que és un model numèricament robust i estable. En simulacions, aquest model ofereix resultats òptims en quant a termes de precisió.

Es basa en expressar la viscositat turbulenta en funció de l'energia cinètica turbulenta k , que ve definida per la variació de les fluctuacions en la velocitat i la taxa de dissipació viscosa turbulenta ϵ . Es tracta d'un model de dues equacions que modela la turbulència quan el número de Reynolds és gran.

6.5 Simulació

Un cop dissenyats els diferents tubs i sabudes les condicions inicials i de contorn de l'anàlisi del sistema, es procedeix a realitzar la simulació del comportament del fluid pels recorreguts. Per a això, el primer a fer és el mallat. A continuació es poden visualitzar processos realitzats per a seleccionar el millor mallat. És evident que amb un mallat més refinat, és a dir, amb més nodes i elements els resultats seran més aproximats. D'altra banda però, això suposarà un augment de la memòria necessària per al seu càlcul i més temps. Per tant, es buscarà un mallat on els resultats obtinguts, al refinar de nou, convergeixin.

6.5.1 Tram Recte

El tram recte de 0,8m és el primer que s'estudia del sistema. El mètode empleat ha sigut el dels tetraedres, obtenint en un primer mallat amb 9146 nodes i 42428 elements. A la figura 6.1 es pot observar amb detall el mallat.

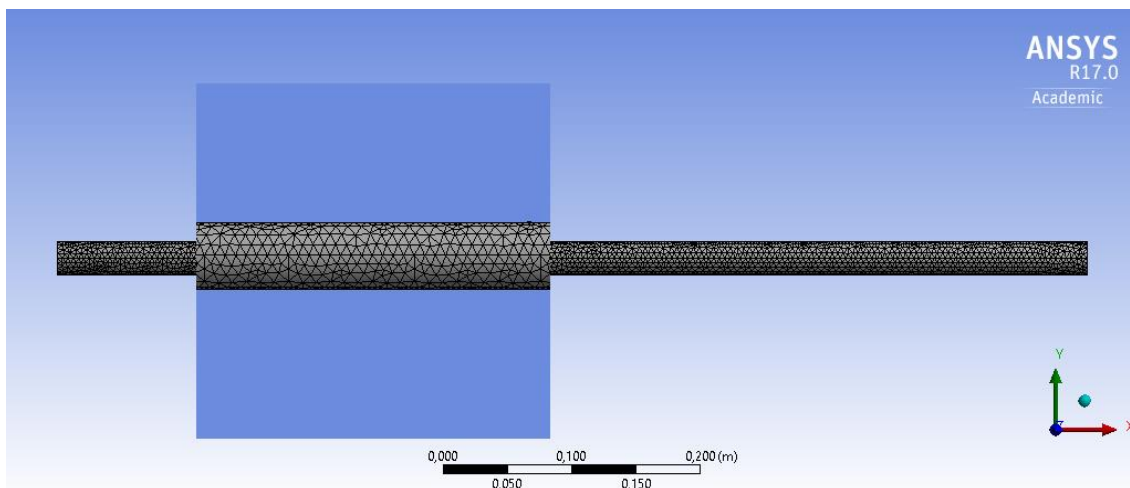


Figura 6.1. Primer mallat del tram recte.

[FONT: Elaboració pròpia.]

En aquest primer mallat els resultats màxims i mínims per l'anàlisi del tub són respectivament, 136,56 Pa i 33,97 Pa.

A continuació s'ha procedit a fer un primer refinament del tub (figura 6.2) on s'han obtingut un total de 53706 nodes i 272347 elements. Les pressions màximes i mínimes s'han trobat a l'entrada i sortida i han sigut de 145,12 Pa i 52,10, respectivament.

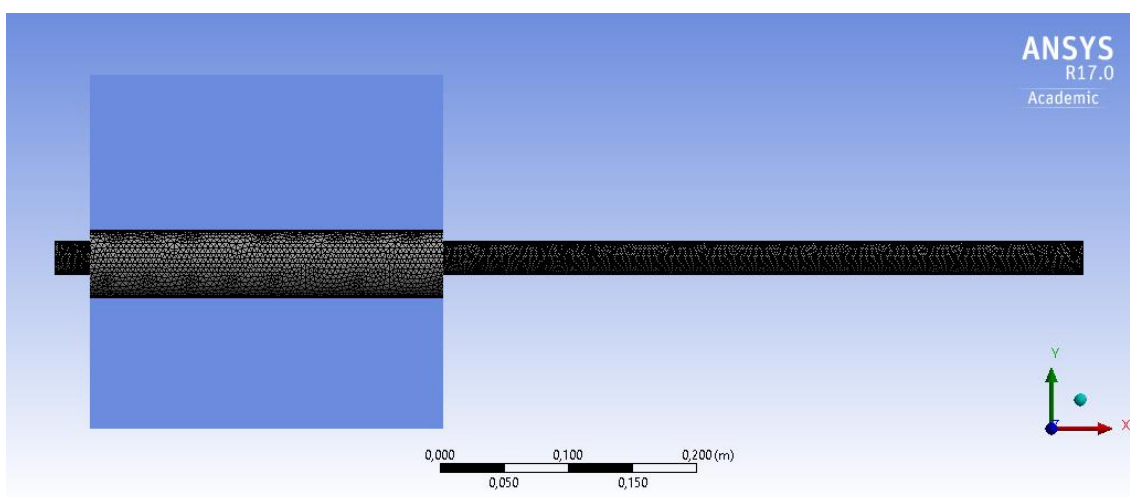


Figura 6.2. Primer refinat del mallat del tram recte.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

6.5.2 Colze 180°

El colze de 180° és el segon tram per on passa l'aire. El mètode de mallat ha sigut el dels tetraedres i s'han obtingut en el primer cas, 9710 nodes i 47218 elements. Les pressions màximes i mínimes han estat de 100,99 Pa i 17,08 Pa, respectivament. A continuació, a la figura 6.3 es pot observar amb detall el mallat utilitzat.

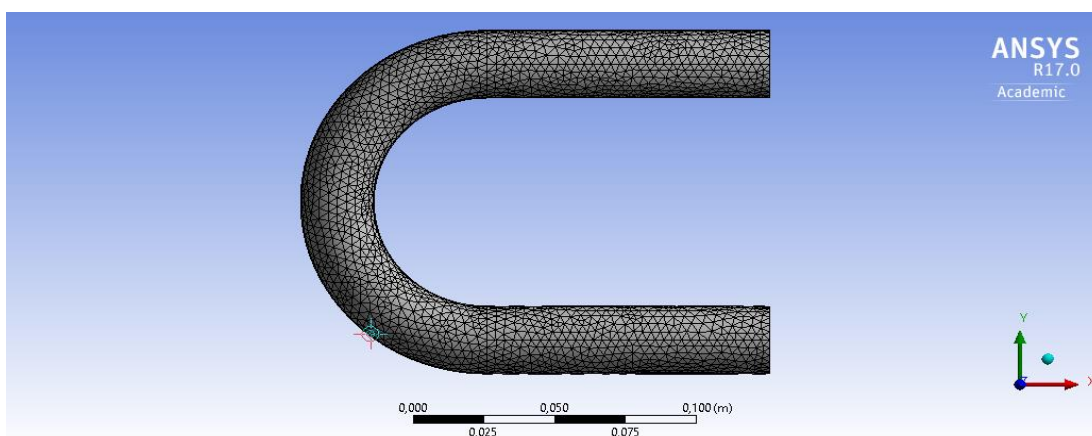


Figura 6.3. Primer mallat del colze de 180°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

Després d'aquest primer mallat s'ha procedit a refinar tot el tub ja que és un tram curt amb molts punts importants a analitzar. Així doncs, un cop refinat s'han obtingut 50506 nodes i 258164 elements i unes pressions màximes i mínimes de 113,45 Pa i -0,497 Pa , respectivament. A la figura 6.4 es pot apreciar el refinat.

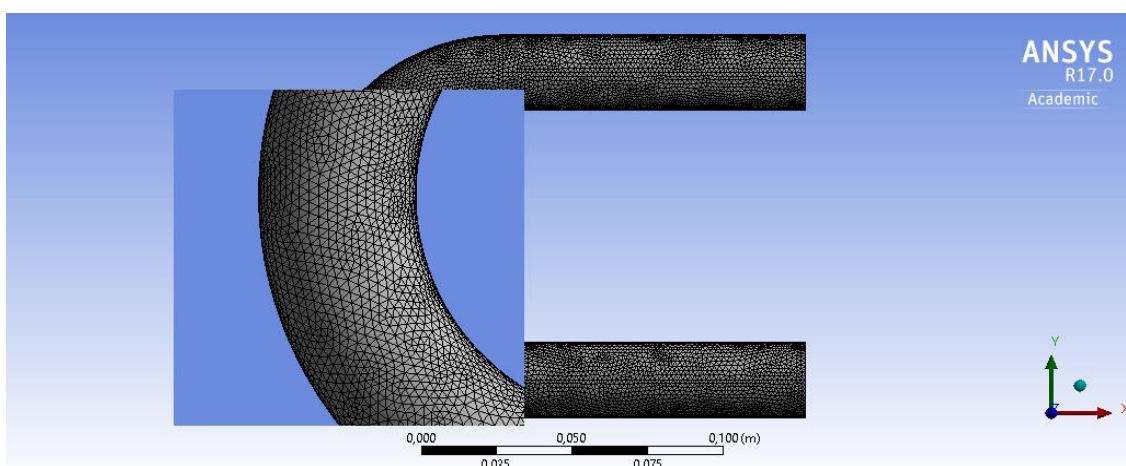


Figura 6.4. Primer refinat del mallat del colze de 180°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

Finalment s'ha realitzat un mallat refinant més els extrems (Figura 6.5) ja que són les zones que més interessaven analitzar i el límit d'elements no deixava refinar més la peça. S'ha obtingut un mallat de 90991 nodes i 472196 elements. Les pressions màximes ha sigut de 113,45 Pa i la de sortida de 49,28 Pa, essent en el cas anterior de 53,423. Per tant, per un millor rendiment de l'ordinador s'ha considerat el primer refinat com a correcte.

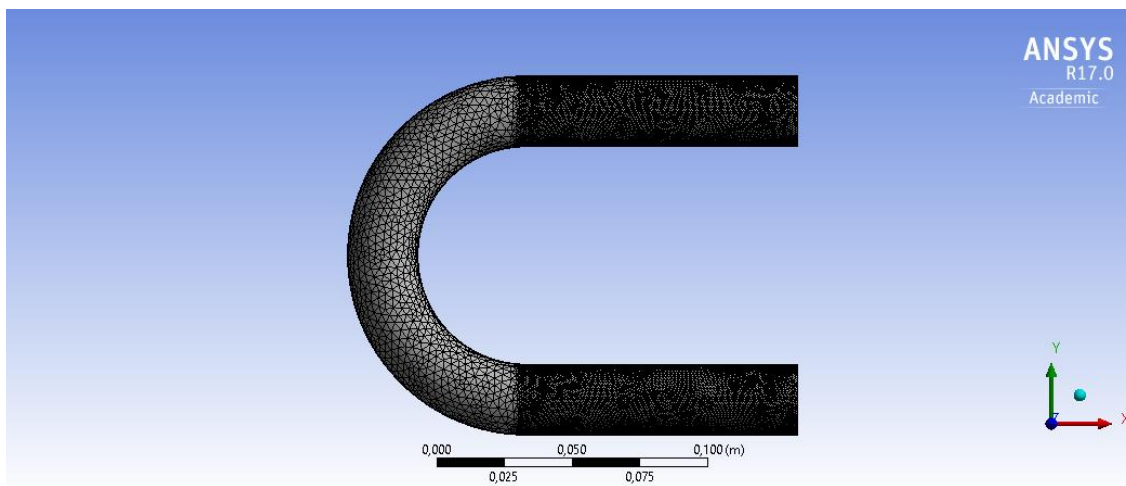


Figura 6.5. Segon refinat del colze de 180°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

6.5.3 Colze 45°

El colze de 45° és el tercer tram per on passa l'aire, després de passar per l'anterior de 180°. El mètode de mallat ha sigut el dels tetraedres i s'han obtingut 5432 nodes i 25904 elements. A continuació, a la figura 6.6 es pot observar amb detall el mallat utilitzat.

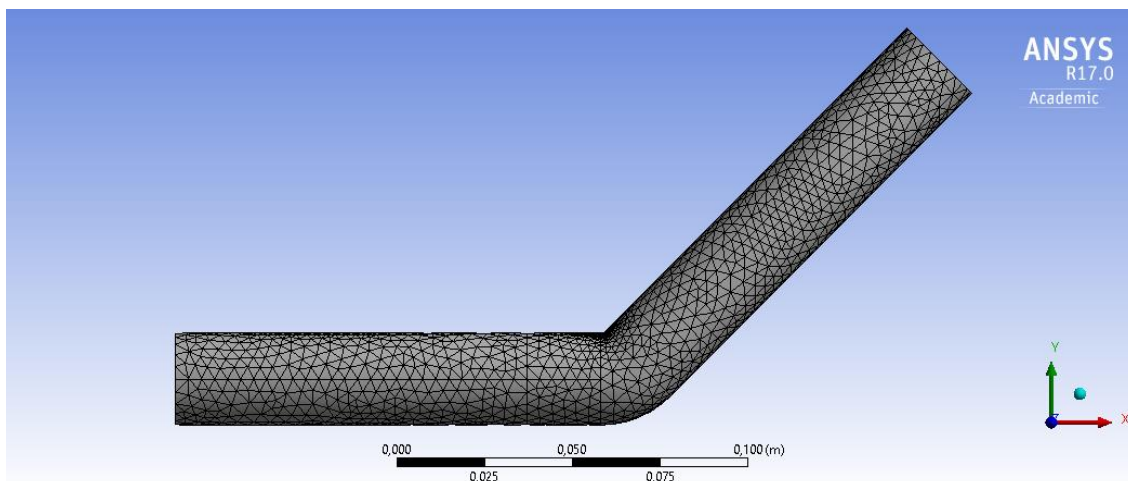


Figura 6.6. Primer mallat del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

En aquest primer mallat els resultats màxims i mínims per l'anàlisi del tub són respectivament, 89,75 Pa i -31,75 Pa.

Com al colze anterior, s'ha refinat tot el tub pel mateix motiu i s'ha realitzat el mallat que es pot observar a la figura 6.7. Per a aquest mallat s'han obtingut un total de 28734 nodes i 145398 elements.

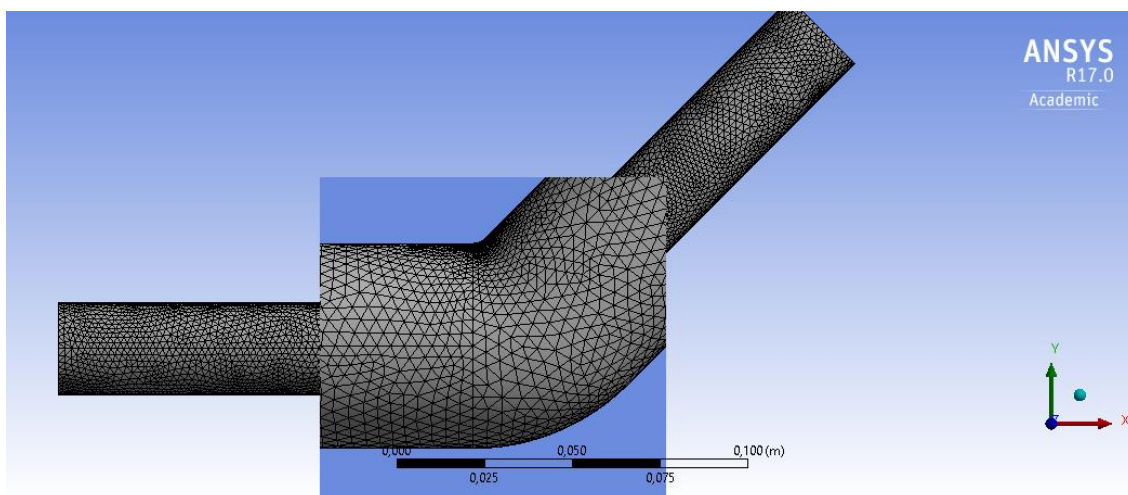


Figura 6.7. Primer refinat del mallat del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

Per aquest mallat els nous valors de les pressions màxims i mínimes del colze són 97,83, i -35,207 Pa, respectivament.

Per últim, s'ha fet un segon refinat (figura 6.8) on s'han obtingut 71717 nodes i 370741 elements.

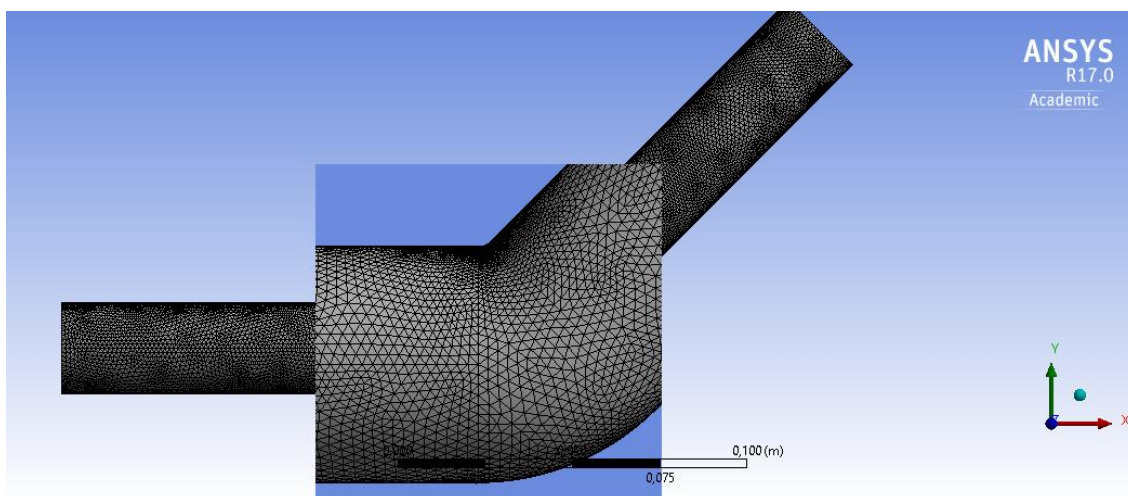


Figura 6.8. Segon refinat del mallat del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

Finalment els valors de pressions obtinguts per aquest tub són d'una màxima de 101,45 Pa i una mínima de -49,36 Pa.

6.5.4 Colze 90°

Finalment el colze de 90° és el quart tram per on passa l'aire, que com s'ha esmentat anteriorment està situat a un a branca diferent als altres dos colzes anteriors. El mètode de mallat ha sigut el dels tetraedres i s'han obtingut 7783 nodes i 37886 elements. A continuació, a la figura 6.9 es pot observar amb detall el mallat.

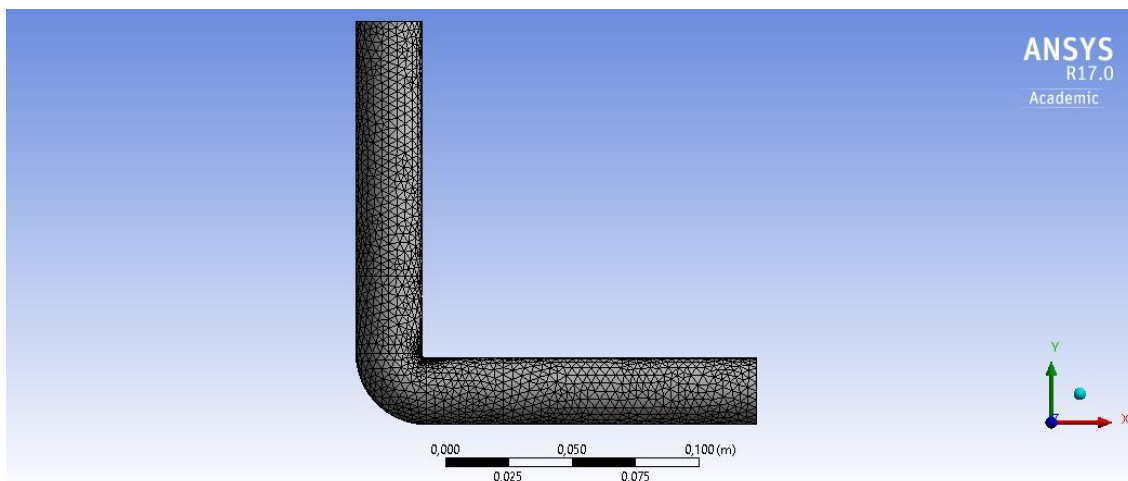


Figura 6.9. Primer mallat del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

Els valors màxims i mínims de pressions obtinguts per a aquest mallat han sigut de 115,95 Pa i -71,91 Pa.

Seguidament, seguint el procediment dels colzes anteriors i pel mateix motiu, s'ha refinat el tub sencer, obtenint així 39815 nodes i 203153 elements. A la figura 6.10 s'aprecia el mallat refinat.

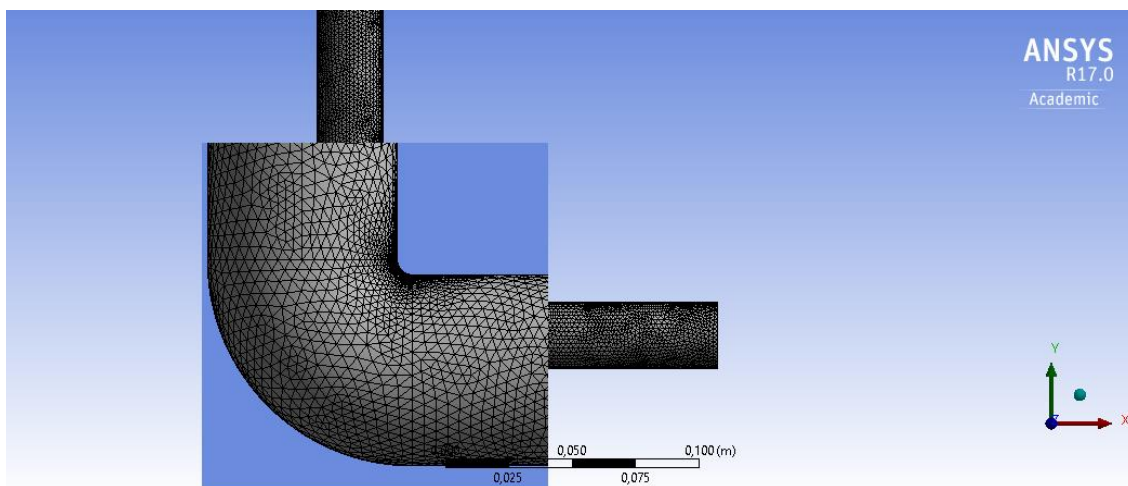


Figura 6.10. Primer refinat del mallat del colze de 90°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

En aquest cas els valors de pressions màxims i mínimes han sigut de 128.274 Pa i -74,40 Pa.

Finalment s'ha realitzat un segon refinament (figura 6.11) on s'han obtingut 98192 nodes i 510270 elements.

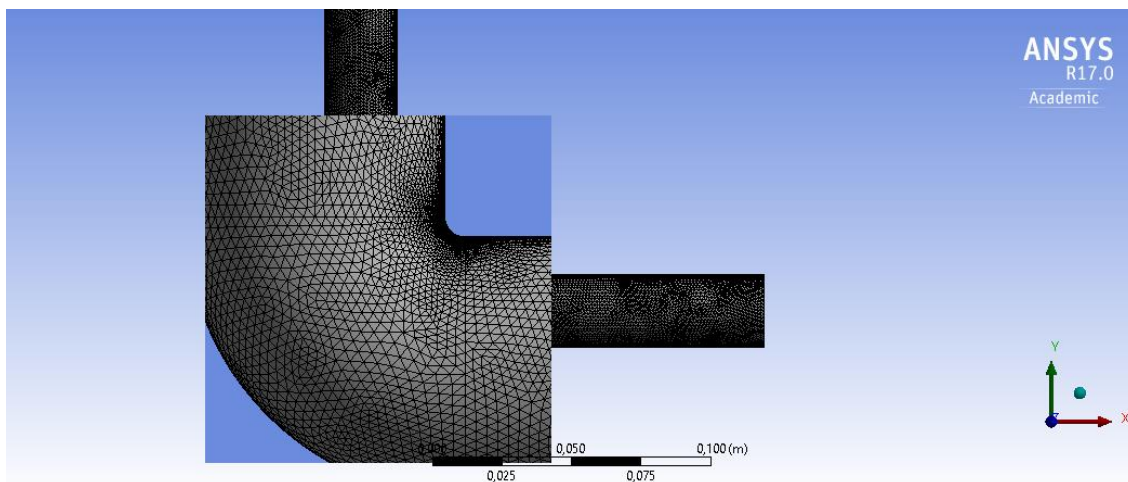


Figura 6.11. Segon refinat del mallat del colze de 90°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

Finalment els valors obtinguts com a màxims i mínims d'aquest colze ha sigut de 145,83 Pa i -62,09 Pa.

Malauradament, els refinaments dels mallats han quedat limitats per la llicència de Ansys utilitzada ja que només permetia un màxim de 512000 elements. Tot i així els resultats es poden considerar correctes ja que s'ha observat una tendència convergir a un valor a tots els resultats.

6.6 Resultats

6.6.1 Tram recte

El tram recte és el més llarg que trobem a la instal·lació. El conducte de 0,8 metres és la geometria més comuna en els tubs per transportar fluids. Al ser una tram completament recte, sense canvis de secció i tot i no tenir-ho en compte en aquest treball, els canvis de temperatura són mínims i les pèrdues de càrrega són petites. La simulació ha convergit a la iteració 318. A les figures 6.12 i 6.13 es poden observar els gradients de

pressions obtinguts per aquest tram.

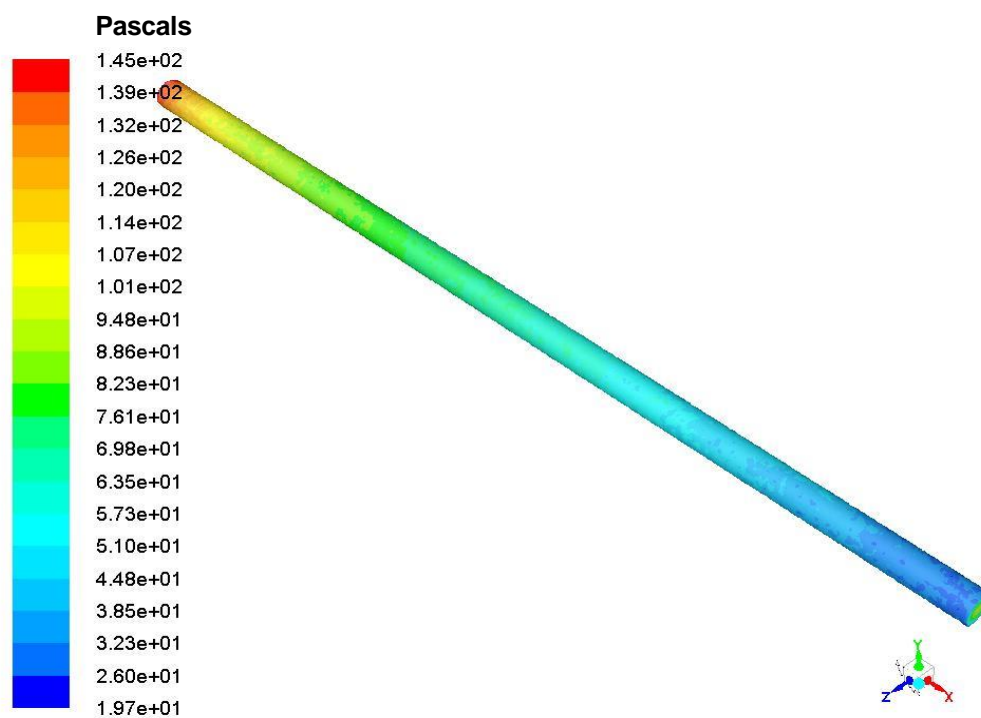


Figura 6.12. Gradient de pressions en vista isomètrica del tram recte.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

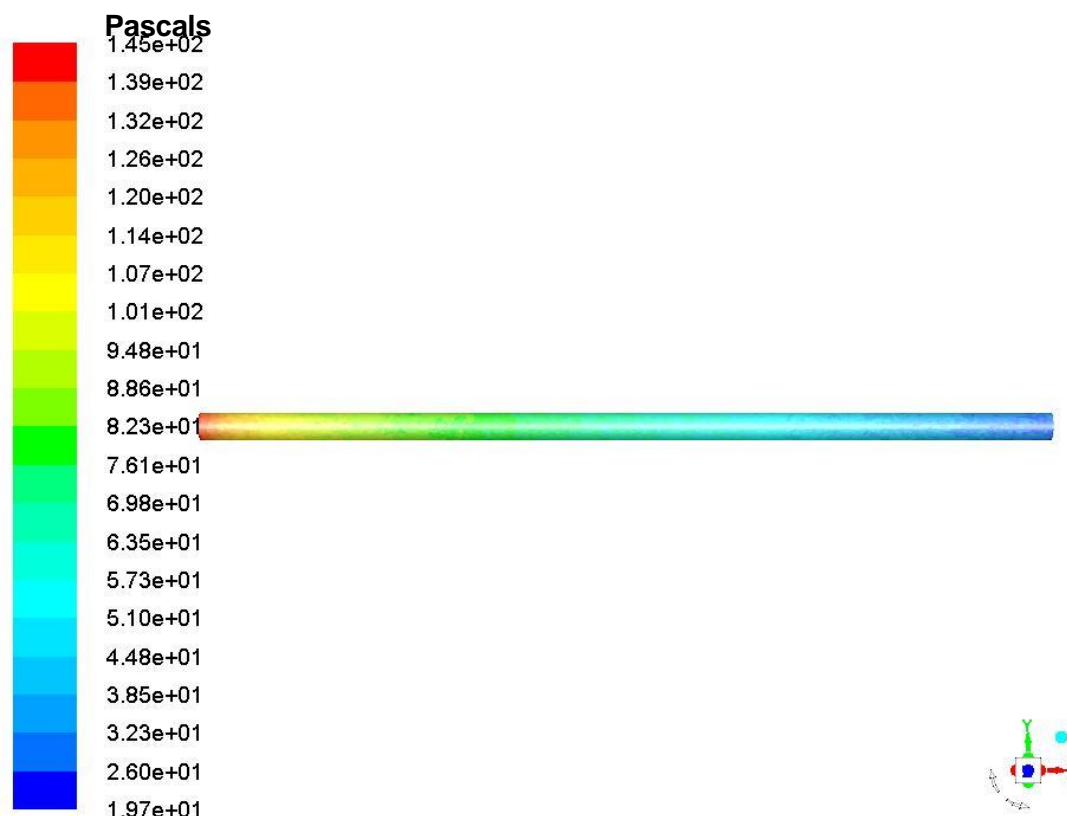


Figura 6.13. Gradient de pressions en vista de perfil.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

A continuació a la taula 6.1 podem observar les pressions a l'entrada i sortida així com les pèrdues de càrrega en aquest tram. 136,56 Pa i 33,97 Pa.

	Velocitat	Pressió a l'entrada	Pressió a la sortida	Pèrdues de càrrega
Mallat 1	10,46	136,56	33,97	8,724
Refinat 1	10,46	145,12	52,10	7,909
Unitats	<i>m/s</i>	<i>Pa</i>	<i>Pa</i>	<i>m. c. aire</i>

Taula 6.1. Pèrdues teòriques del tram recte

Efectivament, degut a la simplicitat de la geometria, la pressió presenta un gradient petit, així com també es pot observar que el gradient del perfil de velocitats (figura 6.14) es manté amb poques variacions ja que no hi ha gaires pertorbacions, com es pot veure a la figura 6.15 on

tots els vectors de velocitat es troben en la mateixa direcció i sentit.

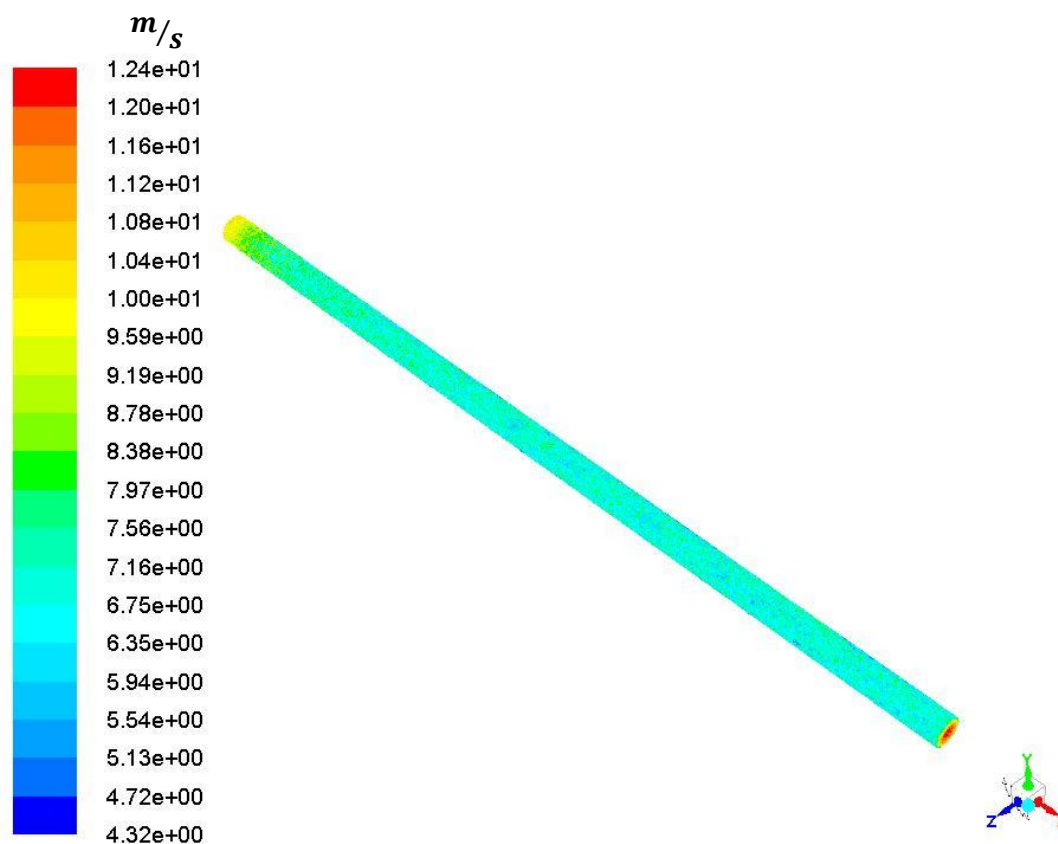


Figura 6.14. Perfil de velocitats en vista isomètrica.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

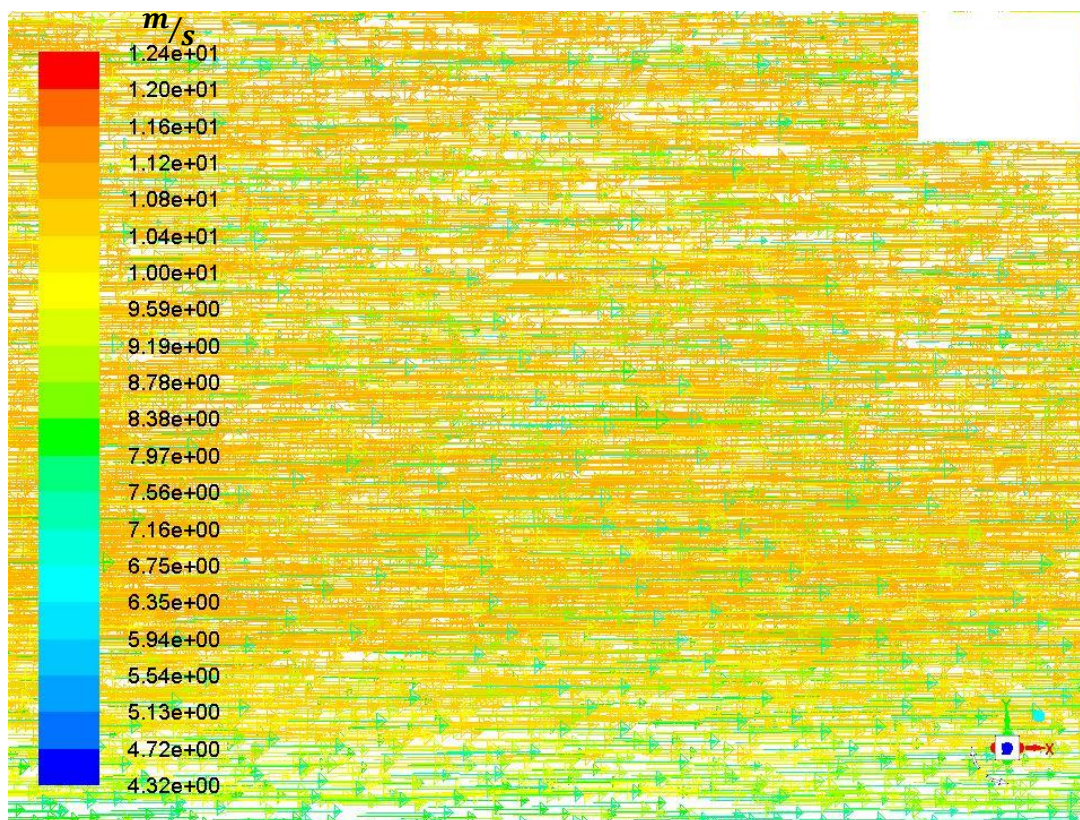


Figura 6.15. Detall dels vectors de velocitat del tram recte.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

6.6.2 Colzes

Els colzes són uns dels trams més utilitzats en els tubs, ja que si es necessita canviar de direcció per evitar obstacles o arribar a un destí, necessàriament es requerirà del seu ús per a aquests motius. En aquest treball, els colzes no tindran canvis de diàmetre com s'ha vist als dissenys.

6.6.1.1 Colze 180°

El gradient de pressions obtingut per a aquest colze es pot observar a les figures 6.16 i 6.17. Com es pot veure, al ser un colze de 180° però amb un radi de curvatura gran, les pèrdues no són gaire elevades com es podria esperar en un primer instant. La simulació ha convergit a la iteració 408.

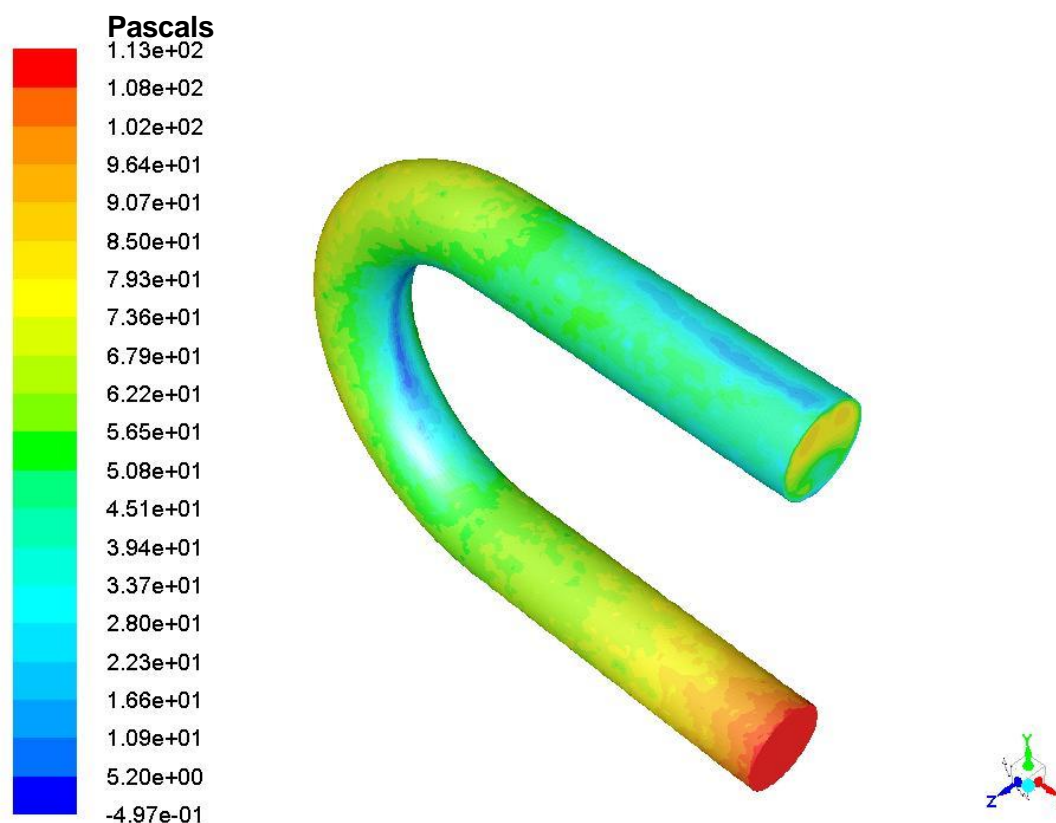


Figura 6.16 Gradient de pressions en vista isomètrica del colze de 180°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

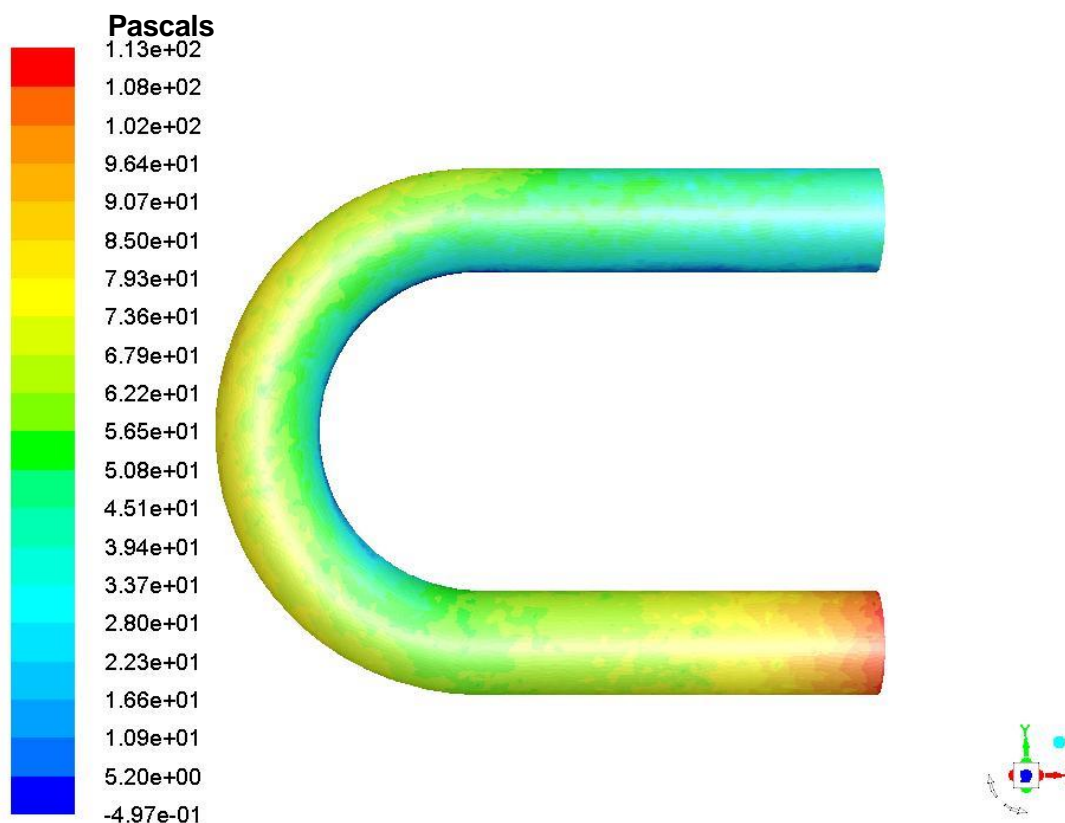


Figura 6.17. Gradient de pressions en vista de perfil del colze de 180°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

Es pot apreciar com les pressions són menors a l'interior de la curvatura. Això es degut a la trajectòria del flux. A la figura 6.18 es pot veure com el perfil de velocitats dona lloc a aquest fet.

	Velocitat	Pressió a l'entrada	Pressió a la sortida	Pèrdues de càrrega
Mallat 1	9,94	100,99	53,71	4,02
Refinat 1	9,94	113,45	53,42	5,105
Refinat 2	9,94	113,45	49,28	5,457
Unitats	<i>m / s</i>	<i>Pa</i>	<i>Pa</i>	<i>m. c. aire</i>

Taula 6.2. Resultats teòrics del colze de 180°

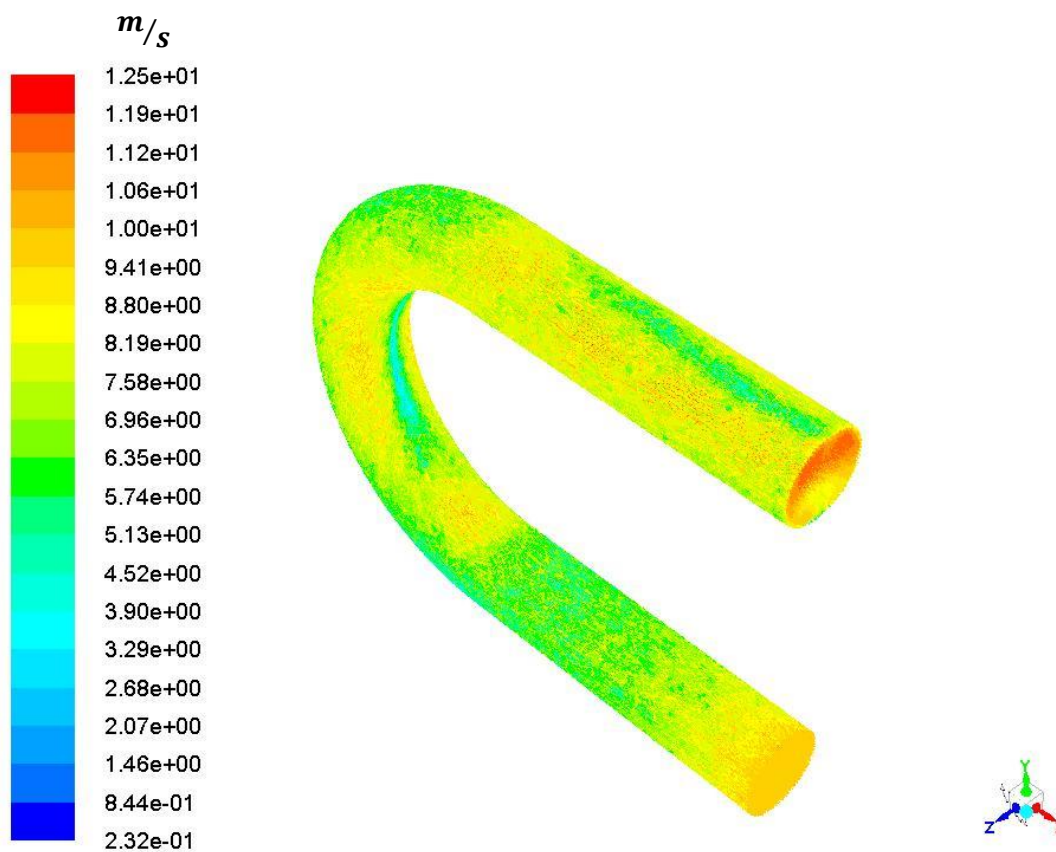


Figura 6.18. Perfil de velocitats en vista isomètrica del colze de 180°. [FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

En canvi, degut a les dimensions del radi de curvatura no es troben gaires turbulències ni pressions negatives. Com es pot observar a la figura 6.19, els vectors de velocitat segueixen tots gairebé la mateixa direcció en les zones on es podria donar aquest fenomen.

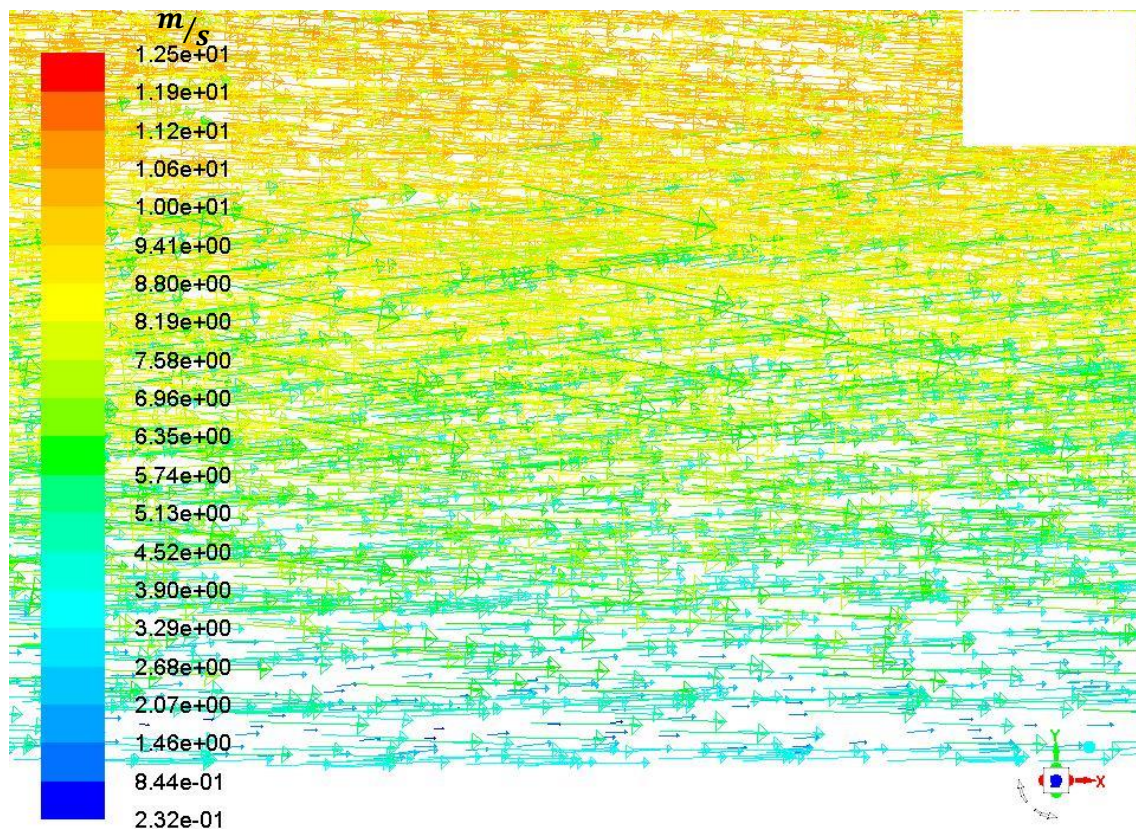


Figura 6.19. Detall dels vectors de velocitat del colze de 180°.
[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

6.6.1.2 Colze 45°

El colze de 45° presentarà un gradient de pressions inferior al dels altres colzes degut a aquest angle més obert. Aquest fet farà que presenti un canvi de direcció menys abrupte i per tant es generin menys pertorbacions. La simulació ha convergit a la iteració 316. A les figures 6.20 i 6.21 es poden veure el gradient de pressions d'aquest colze i que estan resumits a la taula 6.3.

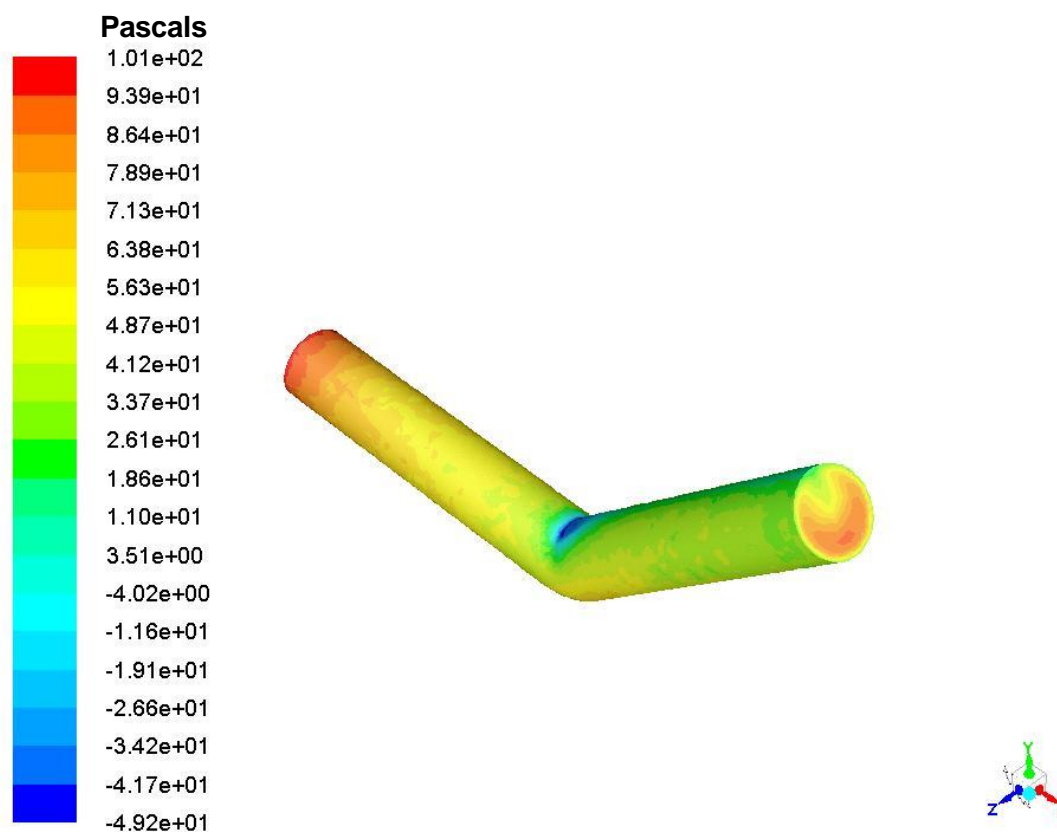


Figura 6.20. Gradient de pressions en vista isomètrica del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

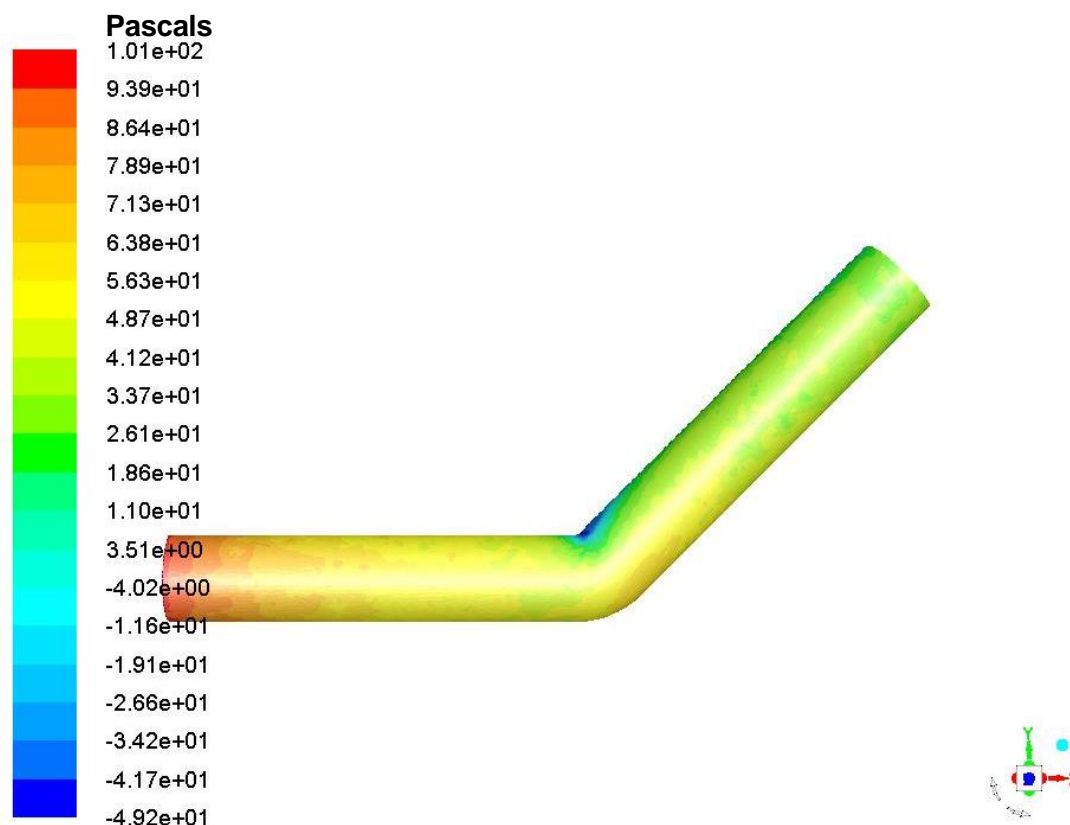


Figura 6.21. Gradient de pressions en vista de perfil del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

	Velocitat	Pressió a l'entrada	Pressió a la sortida	Pèrdues de càrrega
Mallat 1	9,94	89,75	45,41	3,770
Refinat 1	9,94	97,83	48,36	4,207
Refinat 2	9,94	101,47	51,53	4,247
Unitats	<i>m/s</i>	<i>Pa</i>	<i>Pa</i>	<i>m. c. aire</i>

Taula 1.3. Resultats teòrics del colze de 45°.

De nou es troben zones amb pressions negatives al canvi de direcció. A les figures 6.22 i 6.23 es poden observar els perfils de velocitats i com aquests, a la zona interior del colze adopten un caràcter turbulent, on els vectors prenen direccions aleatòries.

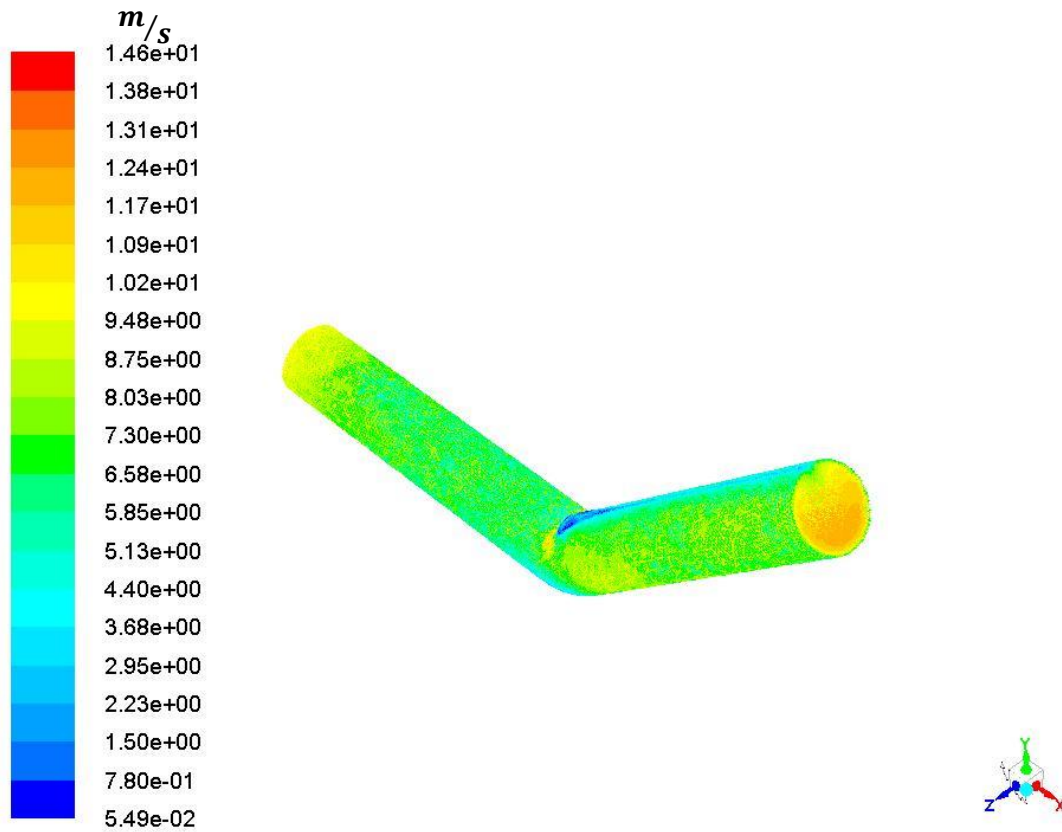


Figura 6.22. Perfil de velocitats del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

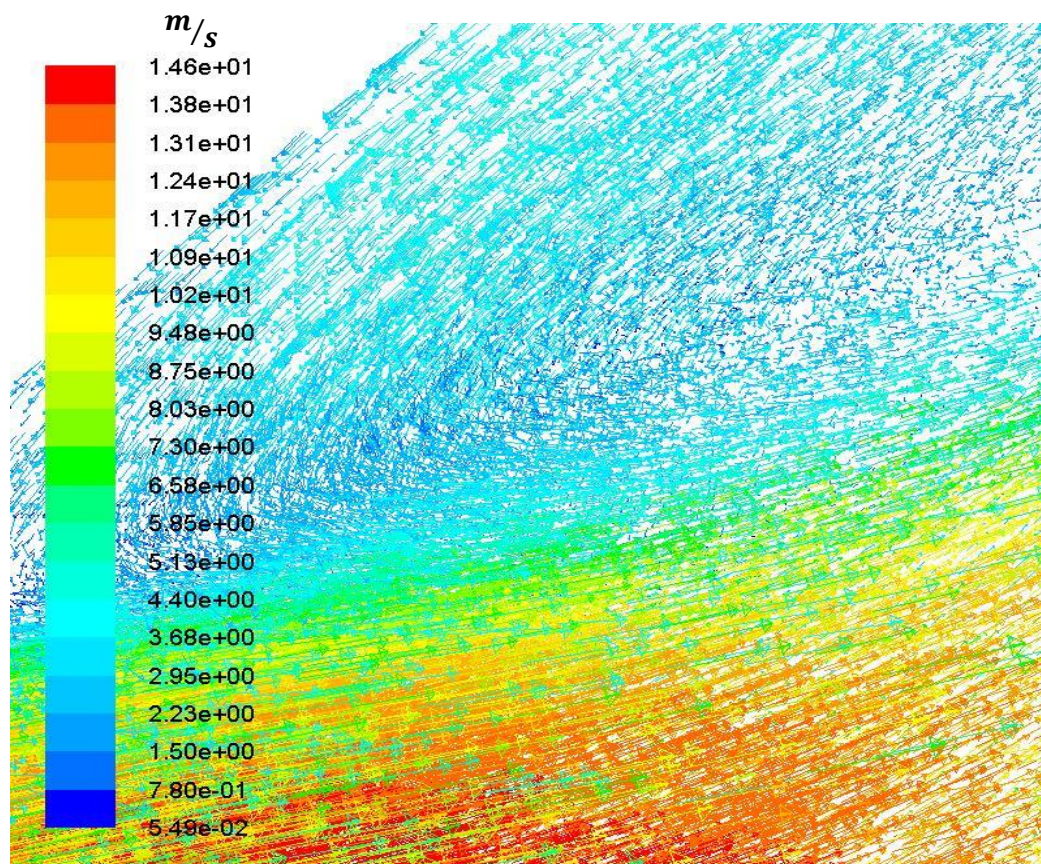


Figura 6.23. Detall dels vectors de velocitat del colze de 45°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

6.6.1.3 Colze 90°

El gradient de pressions obtingut per a aquest colze es pot observar a les figures 6.24 i 6.25. La simulació ha convergit a la iteració 240 i per tant es pot considerar correcte.

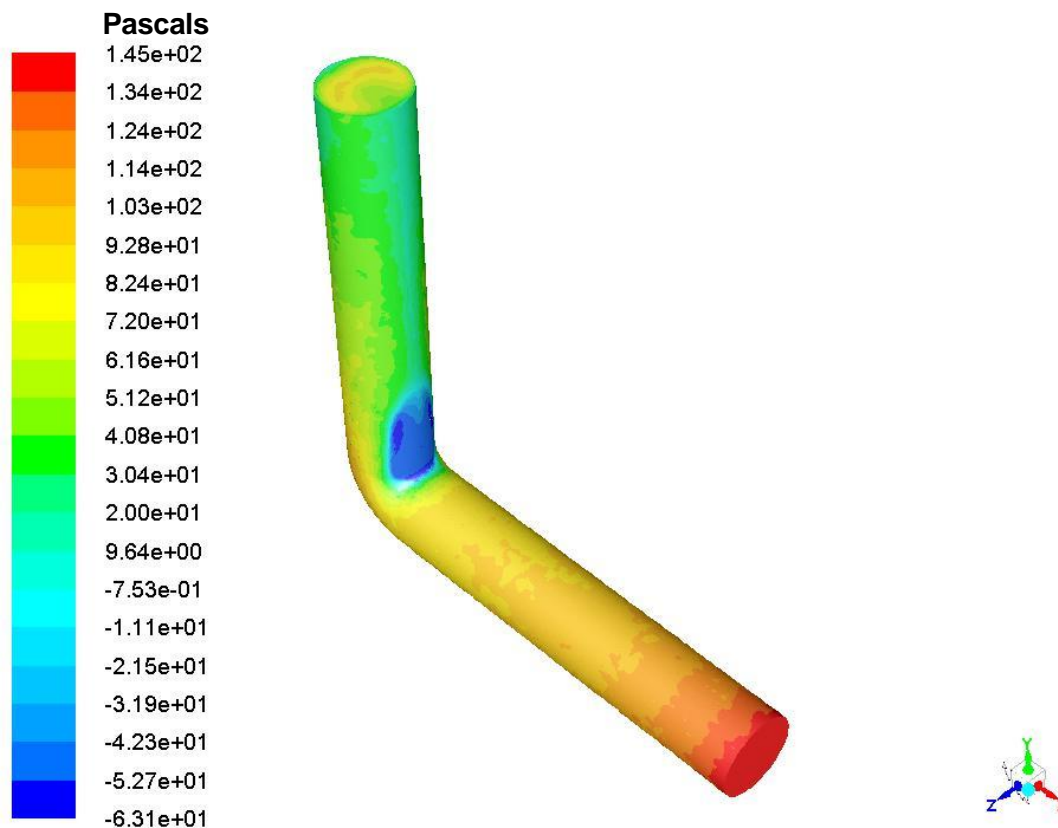


Figura 6.24. Gradient de pressions en vista isomètrica del colze de 90°.
[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

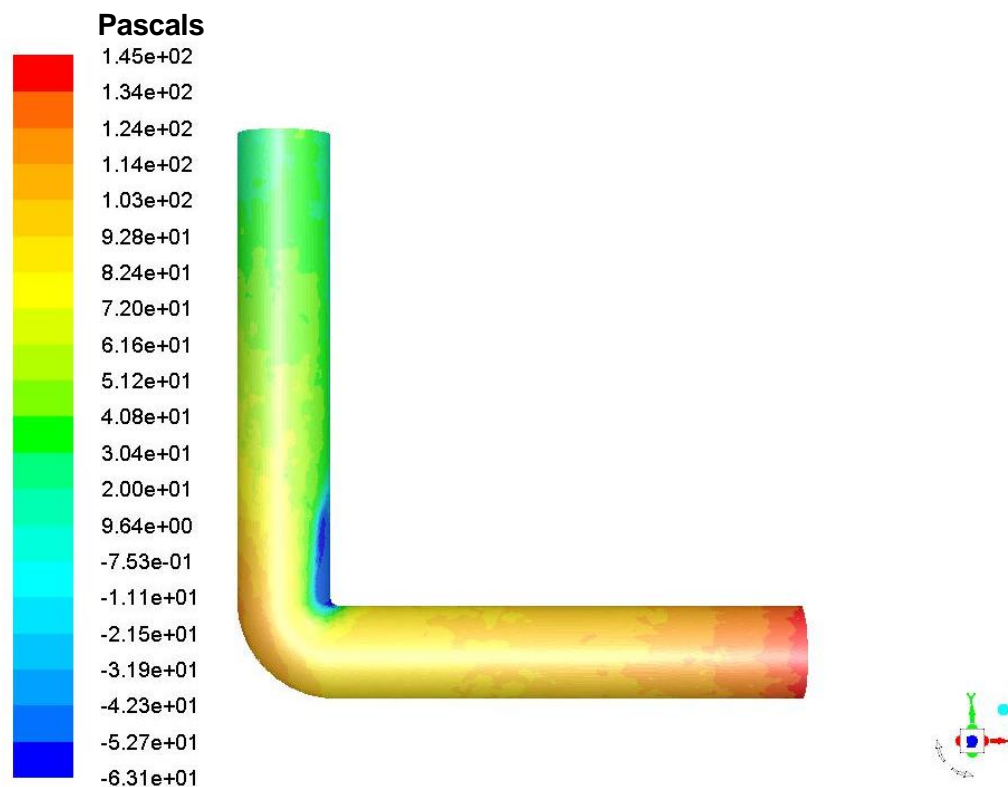


Figura 6.25. Gradient de pressions en vista de perfil del colze de 90°.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

Com es d'esperar les pressions màximes es troben a l'entrada i d'altra banda les mínimes no es troben a la sortida sinó al canvi de direcció. On degut a les turbulències que es creen, es donen lloc a pressions negatives a l'interior del canvi de direcció.

Finalment, a la taula 6.4 es veuen reflectits els valors de les pèrdues de càrrega per a aquest colze.

	Velocitat	Pressió a l'entrada	Pressió a la sortida	Pèrdues de càrrega
Mallat 1	9,94	115,95	30,15	7,296
Refinat 1	9,94	128,27	38,89	7,600
Refinat 2	9,94	144,75	49,29	8,117
Unitats	m/s	Pa	Pa	m. c. aire

Taula 6.4. Resultats teòrics del colze de 90°.

D'altra banda per corroborar aquestes turbulències, a les figures 6.26 i 6.27 es poden observar com els vectors de velocitat es corresponen amb els fenòmens que es donaven amb les pressions. En concret a la figura 6.27, es poden veure com els vectors de velocitat no segueixen una trajectòria sinó que tenen direccions diferents degut a aquest caràcter turbulent que es crea.

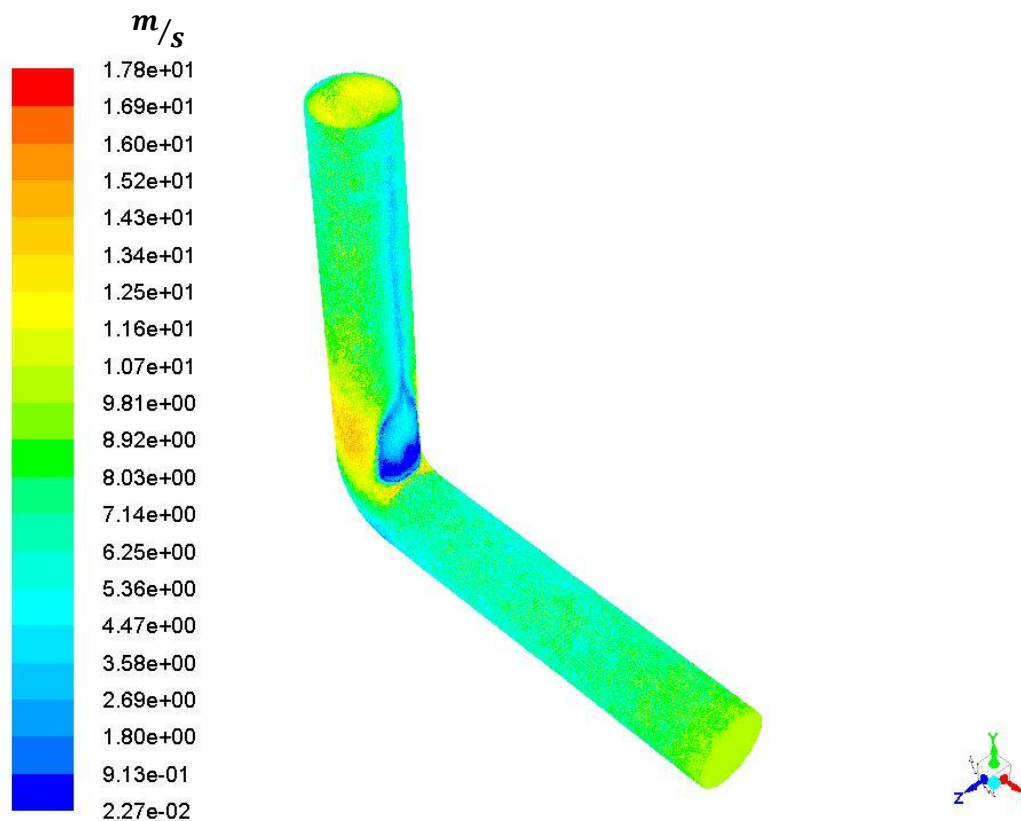


Figura 6.26. Perfil de velocitats en vista isomètrica del colze de 90°.
[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

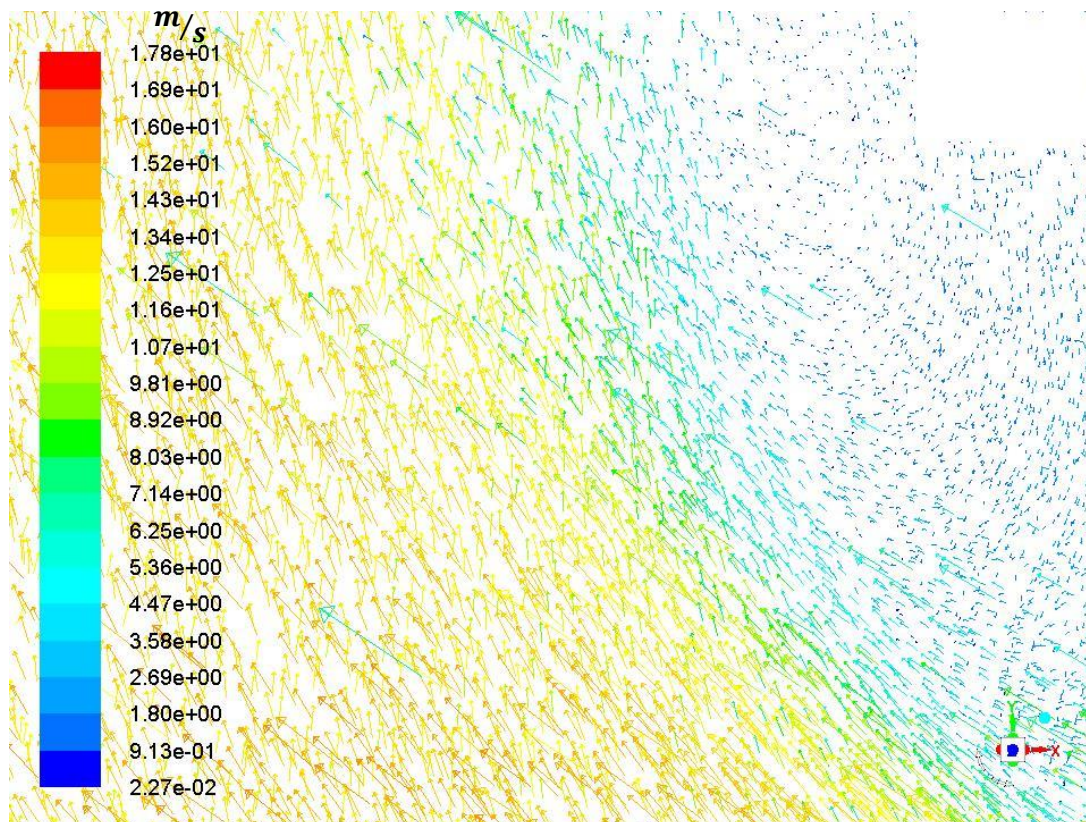


Figura 6.27. Detall dels vectors de velocitat del colze de 90°.
[FONT: Elaboració pròpia mitjançant el software Ansys Fluent.]

6.6.3 Resultats experimentals i simulats

Un cop trobades les pèrdues de càrrega tant experimentals com simulades, es procedeix a comparació d'aquestes. La comparació entre aquests resultats és necessària per saber si el Plafó de Catalana de Gas està funcionant correctament.

A la taula 6.5 estan reflectides les pèrdues experimentals i simulades per a cadascun dels trams analitzats.

	Pèrdues teòriques	Pèrdues experimentals	Error absolut (%)
Tram recte	93,02	65	43,11
Colze 180°	60,03	75	24,94
Colze 45°	49,94	45	9,89
Colze 90°	65,46	70	6,94
Unitats	Pa	Pa	—

Taula 6.5. Comparació dels resultats teòrics i experimentals.

Aquestes diferències entre els valors experimentals i simulats es deuen principalment per els següents factors.

En primer lloc el rotòmetre no indicava una velocitat constant sinó que oscil·lava amb un rang de $\pm 0,5 \frac{m^3}{h}$. Això pot ser degut a que el rotòmetre no realitzi mesures exactes o que el ventilador no subministri un flux d'aire constant.

El segon motiu és que les canonades del Plafó de Catalana de Gas estan fetes de coure i tenen anys d'antiguitat. Això pot influir en les pèrdues degut al desgast que hagi pogut patir al llarg dels anys. De fet s'observa que en els trams on hi ha més tram de fricció amb les parets del tub (colze de 180° i tram recte) la diferència entre les pèrdues teòriques i experimentals són majors, essent en el cas experimental, menors al que haurien de ser. I això pot ser degut al desgast que pot haver patit el tub de coure al llarg dels anys.

El tercer motiu i seguint en la dinàmica del primer, és degut a la falta d'exactitud dels aparells de mesura respecte a les eines computacionals.

També és possible que les obertures realitzades als tubs per al càlcul de la diferència de pressions, sigui una font de pèrdues no contemplades, tot i que estigui dissenyat per a que aquestes siguin mínimes.

Finalment també ha pogut influir el mètode per calcular les pèrdues als colzes, on com s'ha explicat, es tapava amb la mà una branca per tal de fer les mesures adients a l'altra.

7. Pressupost

El projecte s'ha desenvolupat bàsicament amb eines informàtiques. Per aquest motiu els costos del treball es limiten a la mà d'obra de l'autor i el suport rebut pel tutor i d'altra banda, els provinents del material utilitzat com les llicències, l'ordinador o el material d'oficina.

Concepte	Unitats	€/Unitats	Cost total (€)
Material			
Impressió TFG	1	30	30
Altres impressions			5
Material d'oficina			10
Subtotal			45 €
Personal			
Enginyer Junior	600	20	12.000
Tutor	15	40	600
Subtotal			12.600 €
Altres			
Llicència Microsoft Office			50
Llicència Ansys Fluent			0
Llicència Solidworks			0
Subtotal			50 €
TOTAL			12.695 €

8. Impacte ambiental del projecte

Per a l'elaboració del treball ha sigut necessària la utilització d'un ordinador portàtil durant aproximadament 600 hores. El consum del computador i la pantalla són els que s'han contemplat per a valorar l'impacte ambiental provocat per l'elaboració del projecte. Així doncs, el consum elèctric comporta una emissió de CO_2 degut a la generació d'energia elèctrica.

D'altra banda, per al seguiment i realització del projecte s'han produït desplaçaments, tant per part de autor com del tutor. Aquests han sigut en vehicle propi combinat amb transport públic per part de l'autor i transport públic per part del tutor. L'ús del cotxe i autobús impliquen emissions tant de CO_2 , com de partícules sòlides i altres gasos contaminants causants de l'efecte hivernacle. Tot i així, aquestes emissions es poden considerar negligibles en comparació amb tot el territori del país, i a més, els viatges s'han aprofitat per fer altres tasques a dins de la universitat.

Un altre consum d'energia elèctrica es va produir al realitzar el procés experimental al Plafó de Catalana de gas, on era necessari la utilització del ventilador radial. Tot i així, també es tracta d'un consum insignificant ja que només va ser encès durant menys de 5 minuts.

D'aquesta manera, es pot concloure que l'impacte ambiental causat per l'elaboració d'aquest projecte és insignificant en relació a la contaminació diària a Catalunya. Tot i així, s'ha intentat reduir el consum innecessari de paper i llum. D'una banda intentant tenir la informació en pantalla o llibre, és a dir, evitant imprimir els apunts tot i ser més fàcil la lectura. I d'altra, treballant sempre a zones amb llum natural, suprimint així la utilització de l'enllumenat interior de casa.

9. Desenvolupament del treball

A la figura 9.1 es pot observar el temps dedicat a cada tasca del treball. Com es pot veure, el quadrimestre anterior es va intentar realitzar el tema inicial del projecte com s'ha comentat a l'inici d'aquest. Després de buscar informació sobre els gasos incompressibles es va decidir no tirar endavant aquest treball i realitzar un de nou però de la mateixa temàtica. A partir d'aquí, treballant amb un gas incompressible, tot ha sigut més senzill i es pot observar una dinàmica de treball constant i organitzada.

Elaboració TFG		Novembre		Desembre			Gener			Febrer			Març			Abril			Maig			Juny		
Tasca	Duració (setmanes)	Setmana				Setmana			Setmana			Setmana			Setmana			Setmana			Setmana			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
1. Búsqueda informació sobre gas natural	1	■																						
2. Búsqueda informació sobre vehicles GN - Di	1		■																					
3. Disseny tub dipòsit - Injectors	1			■																				
4. Aprenentatge Ansys Fluent	1			■																				
5. Simulació mitjançant Ansys	2			■	■																			
6. Búsqueda informació gas compressible	2				■	■																		
7. Tria i inici del tema final de TFG	1											■												
8. Búsqueda informació fluid incompressible	5											■	■	■	■	■								
9. Elaboració part teòrica de la memòria	5											■	■	■	■	■								
10. Elaboració part experimental	2																■	■						
11. Disseny tubs	1																				■			
12. Simulació mitjançant Ansys	2																				■	■		
13. Extracció de dades	2																					■	■	
14. Finalitzar memòria	4																							■

Figura 9.1 Diagrama de Gantt de l'elaboració del projecte.

[FONT: Elaboració pròpia mitjançant Excel.]

Conclusions

L'objectiu d'aquest treball era l'anàlisi experimental i la simulació d'un fluid incompressible circulant per diferents tipus de tubs. Per acabar aquest treball es revisaran si s'han assolit els objectius marcats.

En primer lloc s'ha recopilat la informació necessària per a l'entesa del treball. D'aquesta manera s'han assolit els coneixements pertinents per a la comprensió del projecte. Igualment, això pretén servir com a possible suport per als futurs alumnes de l'assignatura i aquesta primera part de teoria pot servir de guia.

Un cop assentades les bases del treball, s'ha fet l'anàlisi experimental on s'ha obtingut les dades necessàries per poder estudiar el comportament de l'aire. En aquest primer anàlisi ja s'ha pogut analitzar diferents termes característics com el coeficient de fricció f i el de pèrdua K_L i així comparar-los amb els teòrics provinents de càlculs o de fonts diverses. En aquest cas s'ha vist que aquests factors no presentaven errors considerables que poguessin donar lloc a que es pensés que els tubs es trobaven en estats molt deteriorats.

En segon lloc s'ha procedit a realitzar la simulació mitjançant Ansys Fluent. El primer dels objectius era aprendre el seu funcionament i adquirir coneixements del seu ús, fet que es pot assumir com assolit. El segon i més important era el de simular el fluid a través dels tubs per a poder fer una posterior comparació amb l'anàlisi experimental. Finalment, després d'adquirir els coneixements necessaris, s'han pogut simular satisfactòriament cadascun dels trams del sistema i extreure les dades que es pretenien obtenir, tot i que s'ha de tenir en compte que les eines per al correcte desenvolupament d'aquesta part eren limitades, tant per part de l'ordinador com pel software Ansys.

Amb els resultats extrets s'ha pogut veure amb més detall quin comportament té l'aire quan circula pels diferents trams. Així com a al tram recte es pot observar un gradient amb un comportament ordenat, amb pressions màximes i mínimes a l'entrada i sortida, respectivament i un perfil de velocitats on els vectors no presenten gaires aleatorietats i tots tenen gairebé la mateixa direcció. D'altra banda el comportament del fluid als colzes presenta comportaments molt diferents respecte al tram recte i entre ells. Per tant a l'hora de construir sistemes de canonades, s'ha de tenir molt en compte quines peces s'utilitzen i on, depenent de les especificacions que s'hagin de complir.

En darrer lloc s'han comparat els dos tipus d'anàlisi. En aquest punt s'han observat les discrepàncies entre ells. Aquestes, han donat lloc a concloure el Plafó de Catalana de gas ha patit un desgast al llarg dels anys ja que no té un rendiment proper al que hauria de tenir teòricament. A més aquestes diferències s'ha observat que deixant de banda el desgast dels tubs, també poden ser ocasionades per altres factors, com l'ús d'eines de mesura poc exactes o la falta de recursos informàtics. Aquestes circumstàncies es poden corregir amb facilitat tot i que amb inversions de diners i d'aquesta manera es podria atribuir amb més exactitud a què es deuen les diferències que sorgeixen.

Futures línies de treball

Com s'ha comentat al principi del treball, la idea inicial era la d'estudiar gas natural a través d'un tub des del dipòsit fins als injectors d'un cotxe. Al ser un cas compressible, no ha sigut possible el seu estudi i pot ser un possible futur treball interessant a realitzar de cara al Treball de Fi de Màster, on s'hauran adquirit els coneixements necessaris per portar a terme aquesta futura línia de treball.

D'altra banda, aquest projecte podria millorar si es disposessin de les eines adequades per a la seva confecció. Aquestes podrien ser una versió de Ansys que admetés més elements i un ordinador capaç de realitzar càlculs amb quantitats grans d'elements. Això milloraria l'exactitud dels resultats obtinguts i segurament es podria extreure més informació sobre les dades obtingudes, ja que es podrien fer mallats més refinats i per tant obtenir resultats més exactes de les zones més importants.

Bibliografia

- [1] White F. *Mecánica De Fluidos*. 6a edició. Madrid, MacGraw-Hill; 2010, p. 39.
- [2] White F. *Mecánica De Fluidos*. 6a edició. Madrid, MacGraw-Hill; 2010, p. 344.
- [3] LA GUÍA. [<http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>, 30 Març 2017].
- [4] LA GUÍA. [<http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>, 30 Març 2017].
- [5] White F. *Mecánica De Fluidos*. 6a edició. Madrid, MacGraw-Hill; 2010, p. 277.
- [6] Çengel Y, Cimbala J. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*, 2a edició. Mèxic, MacGraw-Hill; 2010, p. 344.
- [7] Giles R, Evett J, Liu C. *Mecánica De Los Fluidos E Hidráulica*. 3a edició. Madrid, MacGraw-Hill; 2010, p.169.
- [8] DOCUMENTS TIPS [<http://documents.tips/documents/investigacion-friccion-en-el-fluido.html>, 1 Abril 2017]
- [9] DERIVATES INVESTING [<http://www.derivativesinvesting.net/article/641460411/internal-flows-laminar-flow-between-rotating-cylinders-turbulent-flow-in-a-pipe-and-open-channel-flow/>, 5 Abril 2017].
- [10] WORDPRESS [<https://raulsmtz.files.wordpress.com/2011/03/moody.jpg>, 5 Abril 2017].
- [11] INGENIERÍA RURAL [<http://www.ingenieriarural.com/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMateriales.pdf>, 6 Abril 2017].
- [12] GICODA [<http://www.gicoda.com/ventiladores-radiales/>, 10 Abril 2017].
- [13] AKI [<http://www.aki.es/productos/codos-de-cobre-45/idp13509>, 12 Abril 2017].
- [14] FERRETODO [<http://www.ferretodo.com.mx/product-detail.php?art=4403>, 12 Abril 2017].

[15] TODO DE INOXIDABLE

[<http://www.tododeinoxidable.com/Productos/ConexionesSanitarias/SanitariaSoldable/tabid/158/Default.aspx>, 12 Abril 2017].

[16] INGENIERÍA CIVIL UTN-FRBA

[http://www.civil.frba.utn.edu.ar/Materias/hidraulica/archivos/tablas_graficos.pdf, 20 Abril 2017]

[17] VALVIAS [<http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-densidad-gases.php>, 20 Abril 2017]

Bibliografia complementària

- ANSYS. [<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>, 2 Maig 2017]