

Treball de Fi de Grau/Màster

Titulació

**Anàlisi, calibratge i posta en marxa d'un banc d'assaig
de cavitació amb finalitats docents**

MEMÒRIA

Autor: Jordi Baucells Fuster
Director: Esteban Jou Santacreu
Convocatòria: Juny de 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El departament de Mecànica de Fluids disposa d'un banc d'assaig amb un venturi que es vol aprofitar per a l'estudi de pèrdues de càrrega i cavitació. En el treball, s'avaluen les condicions de funcionament del banc d'assaig i es calibra a partir d'un anàlisi de resultats realitzat amb tres metodologies diferents: un estudi teòric, un anàlisi experimental i una simulació amb Ansys Fluent. Un cop calibrat, es recullen les aplicacions del banc d'assaig i es plantegen nous dissenys de l'element a fi que s'adapti millor a les característiques buscades pel departament. Finalment, es contempen les finalitats docents del projecte i es crea l'estructura de la pràctica que es realitzarà amb el banc d'assaig estudiat.

Sumari

SUMARI	4
AGRAÏMENTS	7
ÍNDIX DE FIGURES	8
ÍNDIX DE TAULES	11
1. GLOSSARI	12
2. INTRODUCCIÓ	13
2.1. Objectius	13
3. ESTUDI DEL BANC D'ASSAIG	15
3.1. Descripció del muntatge	15
3.1.1. Funcionament i elements del banc d'assaig	15
3.1.2. Dimensions del venturi.....	16
3.2. Conceptes teòrics	17
3.2.1. Propietats del fluid.....	17
3.2.2. Teorema de l'Energia.....	17
3.2.3. Pèrdues de càrrega	18
3.2.3.1. Pèrdua de càrrega lineal	18
3.2.3.2. Pèrdua de càrrega singular: canvi bruscat de secció	19
3.2.3.3. Pèrdua de càrrega singular: tram cònic.....	20
3.3. Anàlisi experimental.....	22
3.3.1. Unitats de mesura.....	22
3.3.2. Calibratge del banc d'assaig	22
3.3.3. Determinació de pèrdues de càrrega.....	24
3.3.3.1. Pèrdua de càrrega lineal	24
3.3.3.2. Pèrdua de càrrega singular: canvi bruscat de secció	24
3.3.3.3. Pèrdua de càrrega singular: tram cònic.....	24
3.3.4. Anàlisi de sensibilitat.....	25
3.3.5. Resultats.....	26
3.3.6. Corba característica de la bomba	29
3.4. Simulació per CFD: ANSYS.....	32
3.4.1. Geometria	32
3.4.2. Mallat	33

3.4.3.	Condicions de contorn	38
3.4.4.	Solució	38
3.4.5.	Resultats	39
3.5.	Anàlisi de resultats	45
3.5.1.	Comparativa valors teòrics, experimentals i simulats.....	45
3.5.1.1.	Sentit divergent	45
3.5.1.2.	Sentit convergent	46
3.5.1.3.	Conclusions de la comparativa.....	46
3.6.	Conclusions finals banc d'assaig.....	47
4.	APLICACIONS DEL BANC D'ASSAIG	49
4.1.	Cavitació.....	49
4.2.	Ompliment i buidatge de dipòsits	53
4.3.	Línies de càrrega.....	55
4.3.1.	Línies piezomètriques en el banc d'assaig.....	57
4.3.2.	Càlcul d'àrees	59
5.	DISSENY I CONDICIONS D'UN NOU VENTURI	60
5.1.	Geometria.....	60
5.1.1.	Càlcul de la longitud mínima del tram lineal	61
5.1.2.	Càlcul del coeficient de fricció mínim	64
5.1.3.	Augment de la secció petita mantenint les altres dimensions	65
5.2.	Localització dels punts de mesura	65
5.2.1.	Condicions de cavitació	66
5.3.	Aparells de mesura	67
6.	FINALITATS DOCENTS	68
6.1.	Teoria	68
6.2.	Simulació	68
6.3.	Experiment	69
6.4.	Guió de pràctiques	70
7.	CONCLUSIONS	71
8.	PLANIFICACIÓ I PRESSUPOST	73
9.	IMPACTE AMBIENTAL	76
10.	BIBLIOGRAFIA	77
	Referències bibliogràfiques.....	77
	Bibliografia complementària.....	77

Agraïments

A la meva família, pel seu suport i els seus consells.

Al meu tutor, per la seva dedicació i implicació constant

Índex de Figures

Figura 1. Element principal del banc d'assaig (Venturi).....	15
Figura 2. Cabalímetre, venturi, columnes manomètriques amb rellotges de lectura del manòmetre i del vacuòmetre i dipòsits cilíndrics (Imatge esquerra). Banc hidràulic amb dipòsit, bomba i cabalímetre (Imatge dreta).	16
Figura 3. Dimensions del venturi del banc d'assaig (unitats de distància en mm) i numeració dels punts d'estudi.....	16
Figura 4. Singularitat per canvi bruscat de secció en sentit divergent	19
Figura 5. Singularitat per canvi bruscat de secció en sentit convergent	19
Figura 6. Singularitat per eixamplament d'àrea progressiu	20
Figura 7. Singularitat per disminució d'àrea progressiva	21
Figura 8. Dipòsit cúbic de 343 m ³ per a mesurar volums de forma precisa.....	23
Figura 9. Representació esquemàtica del muntatge usat per l'obtenció de la corba característica de la bomba	30
Figura 10. Corba característica de la bomba.....	31
Figura 11. Croquis de SolidWorks per a la simulació 2D.....	33
Figura 12. Malla 1 – Per defecte	33
Figura 13. Malla 2 – Element de tamany 1 mm	34
Figura 14. Ampliació del mallat 2 i distribucions de velocitat	34
Figura 15. Malla 3 – Element de tamany 0,5 mm	35
Figura 16. Distribució de velocitats malla 3	35
Figura 17. Contorns on es realitza el refinat.....	35
Figura 18. Malla 4 Refinada	36
Figura 19. Distribució de velocitats malla 4	36

Figura 20. Interpolació de velocitats en els elements de la malla 4	37
Figura 21. Malla 5, equivalent al malla 4 afegint "inflation"	37
Figura 22. Representació de resultats de la Malla 5 (inflació)	38
Figura 23. Condicions de contorn del venturi	38
Figura 24. Evolució dels residus i de la pressió d'entrada al llarg del procés iteratiu.....	39
Figura 25. Distribució de velocitats en sentit divergent.....	40
Figura 26. Distribució de velocitats ampliada en la singularitat en sentit divergent.....	40
Figura 27. Distribució de pressions en sentit divergent	41
Figura 28. Distribució línies de corrent en les singularitats (sentit divergent). Les línies negres verticals corresponen als punts de mesura 6 i 1.....	41
Figura 29. Distribucions de velocitats sentit convergent (global a la imatge superior i local ampliada a la inferior).....	42
Figura 30. Distribució de pressions en sentit convergent	43
Figura 31. Distribució de línies de corrent en sentit convergent	43
Figura 32. Localització del deixant i de l'inici del tram de flux uniforme	44
Figura 33. Deixants turbulents a la singularitat (Font: [2]).....	44
Figura 34. Radi de curvatura en el canvi de secció brusc	46
Figura 35. Diagrama de fases d'una substància (Font: [6])	49
Figura 36. Formació de bombolles en el punt d'estudi 4	50
Figura 37. Connexió entre el venturi i els aparells de mesura de pressió mitjançant un ràcord	51
Figura 38. Estel de bombolles d'aire que apareixen quan les columnes manomètriques estan connectades (vàlvules obertes).....	52
Figura 39. Estel de bombolles amb els forats aïllats amb cinta tefló	52
Figura 40. Dipòsit volumètric 1 (resseguit en groc) i dipòsit volumètric 2 (resseguit en	

vermell)	54
Figura 41. Esquema del funcionament del buidatge del dipòsit 1.....	55
Figura 42. Evolució de les línies de càrrega.....	56
Figura 43. Representació de les columnes manomètriques d'aigua i les diferències d'alçada	58
Figura 44. Teorema de Tales per a la determinació dels radis 2 i 3	59
Figura 45. Croquis del predisseny del nou venturi (Longitud del tram lineal desconeguda) .	61
Figura 46. Dimensions del venturi del banc d'assaig (unitats de distància en mm) i numeració dels punts d'estudi.....	62
Figura 47. Circuit sencer del muntatge.....	62
Figura 48. Diagrama de Moody (Font: [4]).....	64
Figura 49. Localitzacions inadequades dels capil·lars (Punt 1 a la imatge superior i punt 6 a la inferior).	66
Figura 50. Diagrama de Gantt del projecte.....	73

Índex de Taules

Taula 1. Propietats de l'aigua	17
Taula 2. Resultats del calibratge del cabalímetre i desviació entre el valor teòric i el real	23
Taula 3. Resultats obtinguts amb els cabals llegits al cabalímetre	25
Taula 4. Mesures de pressió i velocitat en sentit divergent.....	26
Taula 5. Valors dels coeficients i de les pèrdues de càrrega en sentit divergent.....	27
Taula 6. Mesures de pressió i velocitat en sentit convergent	28
Taula 7. Valors dels coeficients i de les pèrdues de càrrega en sentit convergent.....	29
Taula 8. Valors de cabal, pressió i altura manomètrica de la bomba.....	30
Taula 9. Comparativa resultats amb les diferents metodologies (sentit divergent)	45
Taula 10. Comparativa resultats amb les diferents metodologies (sentit convergent)	46
Taula 11. Condicions de pressió i velocitat i cotes piezomètriques	56
Taula 12. Hores dedicades en el projecte	74
Taula 13. Pressupost total del projecte	75

1. Glossari

f_{lin} – Coeficient de pèrdua de càrrega lineal (λ)

K_6 – Coeficient de pèrdua de càrrega singular per canvi de secció brusca

K_{con} – Coeficient de pèrdua de càrrega singular per canvi de secció progressiu

2. Introducció

El departament de Mecànica de Fluids de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB, UPC) va adquirir un banc d'assaig per a la implementació d'una nova pràctica per a l'assignatura. El dispositiu escollit es va comprar a l'empresa Edibon amb la finalitat d'ensenyar als alumnes conceptes tan importants com les pèrdues de càrrega o d'energia. El format d'una pràctica és més amè per l'estudiant i incrementa el seu nivell d'atenció i de dedicació.

L'element principal del banc d'assaig és un venturi que varia la dimensió de l'àrea al llarg de la seva longitud. Aquests canvis en la geometria alteren els valors de velocitat i de pressió a cada secció i són particularment útils per a l'estudi de les pèrdues de càrrega.

No obstant, en testejar el seu funcionament els responsables de l'assignatura van detectar un seguit de incerteses i incoherències en la màquina i els seus resultats. El coordinador de l'assignatura i tutor d'aquest projecte va plantejar com a proposta de treball de final de grau un anàlisi, calibratge i posta en marxa del banc d'assaig adquirit per a, finalment, poder ser utilitzat en forma de pràctica.

2.1. Objectius

L'objectiu final del projecte és analitzar i calibrar el banc d'assaig actual per tal de poder implementar una pràctica on s'estudiïn les pèrdues de càrrega. Per tal de realitzar el calibratge, es farà una comparativa entre els resultats obtinguts a partir de tres metodologies diferents: un estudi teòric, una anàlisi experimental i una simulació.

Primerament, es vol realitzar una anàlisi teòrica on s'investigaran les expressions de pèrdua de càrrega del banc d'assaig i es calcularan els seus valors teòrics.

La segona metodologia consisteix en un estudi exhaustiu del banc d'assaig real. En aquest apartat, es prendran les mesures necessàries per a determinar els valors de les pèrdues de càrrega de forma experimental.

En tercer lloc, es valora la realització d'una simulació amb el programa Ansys Fluent on es simulin les mateixes situacions que les estudiades en les dues metodologies anteriors. D'aquesta manera, s'obtingran per tercer cop un recull de resultats de les pèrdues de càrrega del venturi, en aquest cas de la simulació.

Així doncs, es durà a terme una comparativa entre les tres metodologies i s'analitzarà la coherència entre els diferents resultats. Aquesta comparativa permetrà determinar si el banc

està ben calibrat o si requereix d'algun ajust. Finalment, es decidirà si el banc actual és apte per a la realització de les pràctiques de l'assignatura de Mecànica de Fluids.

Un cop validat el correcte funcionament del banc d'assaig, es prosseguirà a investigar i recollir totes les seves aplicacions, analitzant la funcionalitat dels diferents elements del banc d'assaig i els possibles experiments que s'hi puguin dur a terme.

El següent objectiu del treball comprèn el disseny d'un nou venturi que s'ajusti millor a les necessitats de l'assignatura, en el cas que l'actual pugui ésser millorat. El nou disseny basarà el seu procés de millora amb els conceptes que s'hagin anat observant al llarg del treball. A més a més, es prioritzarà el fet d'aconseguir mantenir gran part de les aplicacions del venturi actual.

Les finalitats docents d'aquest treball són vàries. De forma indirecta, el projecte vol introduir l'autor i els futurs estudiants a les simulacions de fluids, ja que és un recurs molt utilitzat en molts dels sectors de l'enginyeria. Per altra banda, en el treball es decidirà l'estructura de la futura pràctica, on s'esmentaran els apartats que haurà de contenir el guió final i els passos que s'hauran de seguir en l'experiència.

3. Estudi del banc d'assaig

3.1. Descripció del muntatge

3.1.1. Funcionament i elements del banc d'assaig

El banc disposa d'elements mecànics i elèctrics, tots ells treballant conjuntament per al correcte funcionament en les diverses tasques a realitzar. En concret, en el seu muntatge es distingeixen dues parts: el banc hidràulic i el banc d'assaig.

L'element principal d'estudi té una geometria que recorda a la d'un venturi, malgrat tècnicament no ser-ho. El fabricant en el seu moment va descriure a la peça com a venturi, tal i com es pot veure a la Figura 1. Per tal d'evitar confusions, al llarg del treball es farà referència a l'element descrit com a venturi.



Figura 1. Element principal del banc d'assaig (Venturi)

El banc hidràulic disposa d'un dipòsit que conté un volum aproximat de 140 litres d'aigua acoblat a una bomba que impulsa el líquid pel circuit. Connectat a la bomba es troba un cabalímetre amb un rang de lectures de fins a $6000 \text{ dm}^3/\text{h}$. El banc d'assaig té com a element principal el venturi on es produeixen les variacions de pressió i velocitats necessàries per a la implementació dels fenòmens a estudiar. A l'entrada i a la sortida del venturi s'hi incorporen dos tubs cilíndrics. El primer connecta el cabalímetre del banc hidràulic i l'entrada del venturi i el segon s'utilitza per tancar el circuit i per tant uneix la sortida del venturi amb el dipòsit d'aigua. L'estructura incorpora un manòmetre per a la

lectura de pressions positives, un vacuòmetre per a les pressions negatives i un conjunt de columnes manomètriques per a la visualització de les variacions de pressions entre els punts d'estudi. A més a més, hi ha dos petits dipòsits cilíndrics que únicament s'acoblaran al sistema en determinades ocasions.



Figura 2. Cabalímetre, venturi, columnes manomètriques amb rellotges de lectura del manòmetre i del vacuòmetre i dipòsits cilíndrics (Imatge esquerra). Banc hidràulic amb dipòsit, bomba i cabalímetre (Imatge dreta).

3.1.2. Dimensions del venturi

L'esquema del venturi mostra els punts d'estudi considerats. N'hi ha tants com forats té, sent la numeració d'aquests punts la corresponent a la Figura 3, que es mantindrà en tota la memòria.

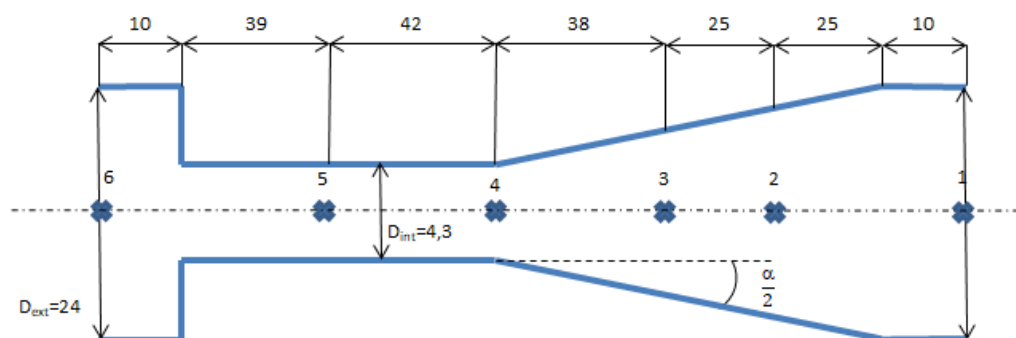


Figura 3. Dimensions del venturi del banc d'assaig (unitats de distància en mm) i numeració dels punts d'estudi

3.2. Conceptes teòrics

Tenint en compte les finalitats docents d'aquest projecte, la profunditat en l'anàlisi teòrica i els càlculs serà concordant amb el nivell que es pot assolir en l'assignatura de Mecànica de Fluids de l'ESTEIB (UPC, Barcelona). En cas que es requereixin mètodes d'anàlisi més complexos, tots seran ben justificats i explicats en la memòria del treball.

3.2.1. Propietats del fluid

L'aigua serà sempre el fluid amb el qual s'operarà i es consideren les següents propietats que es mantindran constants durant tota la tesi. S'ha considerat una temperatura constant de la sala de 25 °C.

Densitat	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
Viscositat dinàmica	$\mu = 8,91 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$
Viscositat cinemàtica	$\nu = 8,91 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Taula 1. Propietats de l'aigua

3.2.2. Teorema de l'Energia

Gràcies a la geometria del venturi i els aparells de mesura del banc, es poden analitzar i determinar les variacions de pressió i velocitat al llarg del circuit. En un cas ideal, on les forces de fricció i les pèrdues de càrrega són nul·les, el teorema de l'Energia (també anomenat Equació de Bernouilli) ens demostra que l'energia es manté constant durant tot el circuit. Per tant, qualsevol variació de pressió, velocitat o altura seria compensada.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

En la realitat, fenòmens com la fricció o la viscositat impedeixen el comportament ideal i ocasionen pèrdues en l'energia del sistema que en la memòria es referenciaran com a pèrdues de càrrega. Per tant, l'Equació de Bernouilli queda modificada a la següent expressió:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{f1-2} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

3.2.3. Pèrdues de càrrega

En el projecte es distingeixen dos tipus de pèrdues de càrrega diferents: lineals i singulars. Les primeres, i tal com s'intueix pel seu nom, es produeixen en els trams lineals de l'aparell i són ocasionades principalment per la fricció. En canvi, les singulars s'observen en regions de l'element on hi ha variacions geomètriques significatives.

$$h_f = f_{lin} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} + K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Dit això, l'estudi de les pèrdues de càrrega es centrarà en tres situacions: la pèrdua en el tram lineal entre els punt 4-6 i les singularitats per canvi de secció en el tram cònic (punts 1-4) i en el canvi brusc de diàmetre (punts 5-6).

S'ha de tenir en compte que el valor de les pèrdues de càrrega difereix segons el sentit de circulació del fluid, ja sigui en sentit convergent o divergent. Per aquest motiu, es realitzaran els càlculs en ambdós sentits.

En aquesta secció es pretén determinar els valors teòrics de les pèrdues de càrrega tant lineals com singulars i els seus corresponents coeficients. La metodologia usada per al càlcul d'aquests valors ha estat extreta del llibre *Memento des Pertes de Charges*^[1] i d'articles científics^[2, 3].

En una primera aproximació, es planteja la hipòtesi de parets llises al venturi. En apartats posteriors serà pròpiament confirmada o rebutjada comparant el seu valor amb l'experimental. El nombre de Reynolds a tals velocitats serà propi de fluxos turbulents i es calcula de la següent manera, tenint en compte que el diàmetre i la velocitat considerada seran sempre els de la secció de diàmetre petit (secció 0).

$$Re = \frac{v_0 \cdot D_0}{\nu} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

3.2.3.1. Pèrdua de càrrega lineal

El seu càlcul es pot realitzar de la mateixa manera tant en sentit divergent com en convergent. Cal aclarir que la següent expressió és vàlida per fluids amb nombres de Reynolds entre 4000 i 100000.

$$f_{lin} = \lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

3.2.3.2. Pèrdua de càrrega singular: canvi bruscat de secció

En aquesta singularitat, la metodologia descriu el comportament del fluid segons els diferents valors de Reynolds. En els casos a estudiar, el nombre de Reynolds serà molt elevat i sempre serà més gran que 10^4 . Concretament es donarà l'expressió per a trobar el coeficient de pèrdua de càrrega singular en un canvi bruscat de secció que es denominarà K_6 .

3.2.3.2.1 Sentit divergent

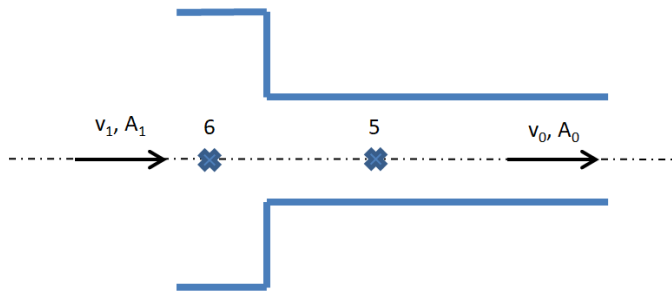


Figura 4. Singularitat per canvi bruscat de secció en sentit divergent

$$K_6 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right) \quad \text{si} \quad Re > 10^4 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

3.2.3.2.2 Sentit convergent

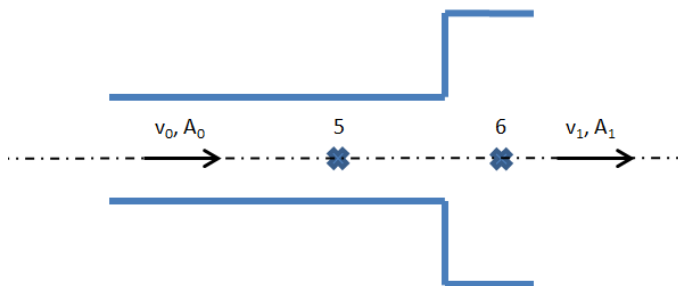


Figura 5. Singularitat per canvi bruscat de secció en sentit convergent

$$K_6 = \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2 \quad \text{si} \quad Re > 10^4 \quad (\text{Eq. 3.7})$$

3.2.3.3. Pèrdua de càrrega singular: tram cònic

A diferència de la pèrdua de càrrega produïda a l'apartat anterior, en aquest cas la disminució o augment de la secció és progressiva, produint una pèrdua de càrrega menor. Un bon paràmetre per a descriure aquestes pèrdues és el seu coeficient de singularitat que es denominarà com a K_{con} .

Hi ha dos factors que disminueixen l'energia del sistema en aquest cas particular, la fricció i el canvi de geometria. En tractar-se d'una variació de secció progressiva, la longitud del tram a estudiar és considerable. Per tant, en aquest cas se li sumarà un cert coeficient de fricció al coeficient de singularitat total (f_f). El canvi de geometria té diferents efectes segons el sentit de circulació del fluid. En sentit divergent, el canvi de secció provoca la separació de l'aigua per tal d'adaptar-se a la nova geometria. D'aquesta manera, s'originen zones de deixant que augmentaran la pèrdua de càrrega singular ($f_{élarg}$). En sentit convergent, aquests deixants no es formen i la pèrdua de càrrega és menor.

3.2.3.3.1 Sentit divergent

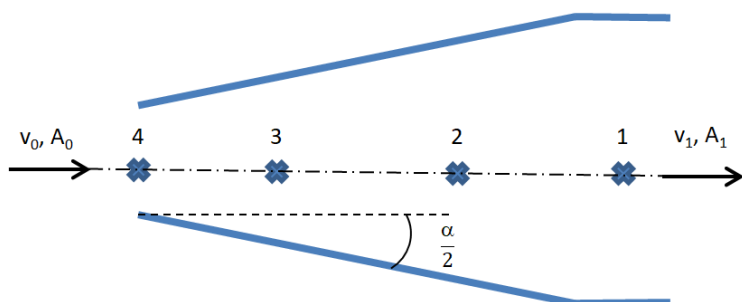


Figura 6. Singularitat per eixamplament d'àrea progressiu

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{élarg} = \varphi_{élarg} \cdot \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2 \\ \varphi_{élarg} = 3,2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt[4]{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \\ f_f = \frac{\lambda}{8 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \left(1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right) \end{array} \right. \rightarrow K_{con} = f_{élarg} + f_f \quad (\text{Eq. 3.8})$$

3.2.3.3.2 Sentit convergent

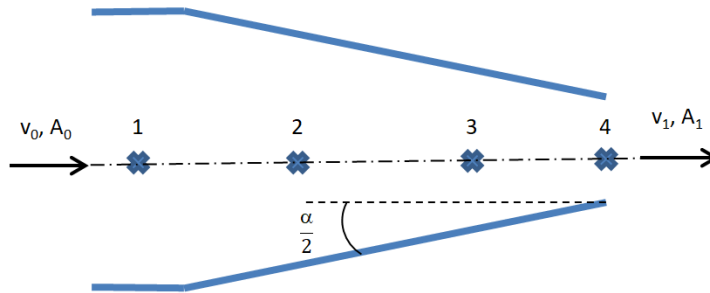


Figura 7. Singularitat per disminució d'àrea progressiva

$$K_{con} = \frac{\lambda}{8 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \left(1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right) \quad (\text{Eq. 3.9})$$

3.3. Anàlisi experimental

Un cop finalitzada l'explicació sobre com calcular els coeficients de fricció i de singularitat del sistema es va procedir a la mesura d'aquests valors en diferents condicions de treball del banc d'assaig real (diferents cabals). A partir de l'equació de Bernoulli i de la descripció de les pèrdues de càrrega es poden determinar aquests valors experimentalment per a, finalment, comparar-los amb els respectius valors teòrics.

L'equació de Bernoulli demostra com les pèrdues de càrrega depenen de la diferència de pressió, velocitat i altura entre els dos punts d'estudi. En trobar-se tots els punts en el mateix eix horitzontal, la diferència d'altures serà sempre 0 i només caldrà prendre mesures de la velocitat i de la pressió.

3.3.1. Unitats de mesura

El cabal es troba en dm^3/h per a facilitar les lectures en el cabalímetre, que està escalat amb dm^3/h . La selecció de *bar* com a unitat de pressió ve condicionada pel manòmetre i el vacuòmetre, que les indiquen amb *bar*. Malgrat no ser una unitat del S. I., és molt comuna per a la indicació de pressions i és adequada per a aquest. Les pressions al llarg del treball seran relatives, a no ser que s'especifiqui el contrari.

3.3.2. Calibratge del banc d'assaig

En primer lloc, es va comprovar el dimensionament del venturi a estudiar. El fabricant donava com a valors de diàmetre petit i de diàmetre gran 3 mm i 25 mm respectivament. Tanmateix, es va portar el venturi al taller de Mecànica de l'escola i, fent ús de calibres passa – no passa es van mesurar els veraders diàmetres, que eren de 4,3 mm i de 24 mm respectivament.

El cabal del circuit està estretament relacionat amb la velocitat a partir de la seva mateixa definició. Gràcies al cabalímetre es pot disposar de lectures ràpides del cabal. Abans però, és necessari saber si l'aparell de mesura està ben calibrat, és a dir, si els valors proporcionats són suficientment precisos.

$$Q = A \cdot v \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Sortosament, el càlcul d'un cabal pot realitzar-se manualment amb l'ajuda d'un cronòmetre i d'un recipient amb volums reglats ja que cabal equival a volum entre temps. D'aquesta manera es va voler fer una comparativa entre el valor teòric i el real, és a dir, entre la lectura de cabal que aporta el cabalímetre i el mesurat de forma manual.

Quant a la mesura del volum, en un intent d'obtenir una precisió el més elevada possible es va usar un recipient cúbic de 0,7 m de costat. Concretament, en ser la superfície fixa i constant, la mesura es va reduir a la mesura d'un sol paràmetre (la variació d'altura del líquid contingut en el dipòsit) reduint així l'error. Així mateix, els errors produïts en la mesura del temps es van també disminuir gràcies al gran volum del cub, que no s'ompliria fins passat un temps suficientment elevat.



Figura 8. Dipòsit cúbic de 343 m^3 per a mesurar volums de forma precisa

Cabal teòric (dm^3/h)	Cabal real (dm^3/h)	Error (%)
1050	912,82	13,064
1000	856,74	14,326
800	694,40	13,199
600	512,64	14,560

Taula 2. Resultats del calibratge del cabalímetre i desviació entre el valor teòric i el real

3.3.3. Determinació de pèrdues de càrrega

Es defineix el terme pèrdues de càrrega, introduït en l'apartat 3.2.3, com una suma de pèrdues de càrrega lineals i pèrdues de càrrega singulars.

3.3.3.1. Pèrdua de càrrega lineal

Aplicació del teorema de Bernouilli entre els punts 5-4 (4-5 en el sentit convergent).

$$\frac{P_5}{\gamma} = \frac{P_4}{\gamma} + h_{f5-4} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

$$h_{f5-4} = f_{lin} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

3.3.3.2. Pèrdua de càrrega singular: canvi bruscat de secció

Aplicació del teorema de Bernouilli entre els punts 6-5 (5-6 en el sentit convergent).

$$\frac{P_6}{\gamma} + \frac{v_6^2}{2g} = \frac{P_5}{\gamma} + \frac{v_5^2}{2g} + h_{f6-5} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$h_{f6-5} = f_{lin} \cdot \frac{L_{6-5}}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} + K_6 \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

3.3.3.3. Pèrdua de càrrega singular: tram cònic

Aplicació del teorema de Bernouilli entre els punts 4-1 (1-4 en el sentit convergent)

$$\frac{P_4}{\gamma} + \frac{v_4^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{f4-1} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

$$h_{f4-1} = K_{con} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

3.3.4. Anàlisi de sensibilitat

L'estudi dels cabals permet observar com hi ha una desviació força constant entre les lectures del cabalímetre i el valor real mesurat. L'error mitjà del cabalímetre s'estima en un 14 %. A continuació, es va procedir a realitzar una petita anàlisi de sensibilitat del cabal, on es determinaria si aquesta inexactitud té un gran efecte en els resultats finals i, per tant, és una de les causes de les incoherències esmentades a la introducció.

Per tal de realitzar aquest estudi de sensibilitat, es van prendre mesures en tres condicions de treball diferents, totes tres en sentit divergent, sent aquestes de 1000, 800 i 600 dm³/h llegits en el cabalímetre. A continuació, es van calcular els seus coeficients de pèrdua de càrrega de forma teòrica i experimental. Per a l'anàlisi de sensibilitat no es va tenir en compte el tram cònic i únicament es van comparar els coeficients f_{lineal} i K_6 teòrics i experimentals.

Cabals (dm ³ /h)	Velocitat	Reynolds	f_{lineal}		Error (%)	K_6		Error (%)
			Teòric	Exp.		Teòric	Exp.	
1000,00	19,13	9,23E+04	0,018	0,017	4,42	0,48	0,07	84,79
800,00	15,30	7,39E+04	0,019	0,019	0,23	0,48	0,11	77,75
600,00	11,48	5,54E+04	0,021	0,019	9,55	0,48	0,05	90,38

Taula 3. Resultats obtinguts amb els cabals llegits al cabalímetre

Tal i com s'havia sospitat, els resultats són molt sensibles al valor del cabal. Aquest fet s'observa quan es comparen els valors de K_6 de l'estudi teòric i l'experimental, diferint en alguns casos fins a un 90 % respecte el seu valor teòric. Per tant, es conclou que una variació d'un 14 % no es pot tolerar i que el posterior recull de resultats es realitzarà amb els cabals mesurats de forma manual.

3.3.5. Resultats

3.3.5.1.1 Sentit divergent

En aquest estudi es van realitzar un seguit de lectures de pressions i velocitats en els diversos punts senyalats en el venturi.

Punt	Cabals (dm ³ /h)											
	912,82		856,74		718,09		694,41		512,64		415,82	
	p (bar)	v (m/s)	p (bar)	v (m/s)	p (bar)	v (m/s)	p (bar)	v (m/s)	p (bar)	v (m/s)	p (bar)	v (m/s)
1	-0,06	0,56	-0,05	0,53	-0,075	0,44	-0,075	0,43	-0,08	0,31	-0,08	0,26
4	-0,90	17,46	-0,86	16,39	-0,72	13,74	-0,72	13,28	-0,40	9,81	-0,22	7,95
5	-0,54	17,46	-0,55	16,39	-0,50	13,74	-0,52	13,28	-0,28	9,81	-0,15	7,95
6	1,88	0,56	1,70	0,53	1,00	0,44	0,88	0,43	0,52	0,31	0,30	0,26

Taula 4. Mesures de pressió i velocitat en sentit divergent

S'observa en les diferents condicions de treball que la velocitat augmenta extremadament quan el diàmetre es redueix, produint un minvament de les pressions considerable. La pressió és positiva en el punt d'entrada i ja assoleix valors negatius en l'inici del tram lineal (punt 5). Quant a les lectures dels punts 2 i 3, l'agulla del manòmetre no prenia un valor estable i es va decidir no tenir-les en compte. Tot i així, les pressions relatives en aquests dos punts rondaven els 0 bar.

A continuació, es calculen amb la metodologia explicada als apartats anteriors els valors dels coeficients i de les pèrdues de càrrega. A més a més, es distingeix l'aportació de les singularitats o de la fricció en la pèrdua d'energia global (en metres).

		Cabals (dm ³ /h)					
		912,82	856,74	718,09	694,41	512,64	415,82
Bernouilli 5-4	f_{lin}	0,024	0,024	0,024	0,023	0,026	0,023
	h_f	3,670	3,160	2,243	2,039	1,223	0,714
	$h_{f_{lin}}$	3,670	3,160	2,243	2,039	1,223	0,714
	$h_{f_{sing}}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Bernouilli 6-5	K_6	0,369	0,462	0,375	0,378	0,433	0,218
	h_f	9,146	9,262	5,684	5,288	3,259	1,366
	$h_{f_{lin}}$	3,408	2,934	2,082	1,893	1,136	0,663
	$h_{f_{sing}}$	5,738	6,327	3,602	3,395	2,123	0,703
Bernouilli 6-4	K_6	0,369	0,462	0,375	0,378	0,433	0,218
	h_f	12,816	12,422	7,927	7,327	4,482	2,080
	$h_{f_{lin}}$	7,077	6,094	4,325	3,932	2,359	1,376
	$h_{f_{sing}}$	5,738	6,327	3,602	3,395	2,123	0,703
Bernouilli 4-1	K_{con}	0,449	0,396	0,315	0,269	0,333	0,556
	h_f	6,976	5,417	3,031	2,417	1,634	1,794
	$h_{f_{lin}}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	$h_{f_{sing}}$	6,976	5,417	3,031	2,417	1,634	1,794

Taula 5. Valors dels coeficients i de les pèrdues de càrrega en sentit divergent

3.3.5.1.2 Sentit convergent

Tot seguit es presenten les dades extretes en sentit convergent, seguint els mateixos criteris que en la secció anterior.

	Cabals (dm ³ /h)					
	850,29		732,15		538,79	
Punt	p(bar)	v (m/s)	p(bar)	v (m/s)	p(bar)	v (m/s)
1	1,91	0,52	1,42	0,45	0,8	0,33
4	0,35	16,26	0,25	14,00	0,12	10,31
5	-0,05	16,26	-0,05	14,00	0,00	10,31
6	-0,14	0,52	-0,12	0,45	-0,1	0,33

Taula 6. Mesures de pressió i velocitat en sentit convergent

Així mateix, les respectives pèrdues de càrrega es presenten a la següent taula.

		Cabals (dm ³ /h)		
		850,29	732,15	538,79
Bernouilli 4-5	f_{lin}	0,031	0,031	0,023
	h_f	4,077	3,058	1,223
	$h_{f lin}$	4,077	3,058	1,223
	$h_{f sing}$	0,000	0,000	0,000
Bernouilli 5-6	K_6	0,786	0,786	0,977
	h_f	14,386	10,700	6,427
	$h_{f lin}$	3,786	2,840	1,136
	$h_{f sing}$	10,600	7,860	5,292

Bernouilli 4-6	K_6	0,786	0,786	0,977
	h_f	18,464	13,758	7,651
	$h_{f\ lin}$	7,864	5,898	2,359
	$h_{f\ sing}$	10,600	7,860	5,292
Bernouilli 1-4	K_{con}	0,180	0,194	0,281
	h_f	2,433	1,940	1,524
	$h_{f\ lin}$	0,000	0,000	0,000
	$h_{f\ sing}$	2,433	1,940	1,524

Taula 7. Valors dels coeficients i de les pèrdues de càrrega en sentit convergent

3.3.6. Corba característica de la bomba

Un inconvenient visible en els resultats de l'apartat anterior és la limitació del cabal que circula. El cabalímetre permet mesurar cabals de fins a 6000 dm³/h. No obstant, el màxim aconseguit amb el circuit connectat és de l'ordre de 1000 dm³/h. El motiu principal d'aquest fenomen és que existeix una relació entre les pèrdues de càrrega del circuit i el cabal màxim que pot proporcionar la bomba.

La corba característica representa l'energia transferida per unitat de pes en funció del cabal. Per a trobar la corba característica de la bomba que permetrà definir aquesta relació es separa momentàniament el venturi del banc d'assaig i es connecta un manòmetre en el seu lloc seguit d'una vàlvula que limitarà el pas de fluid. D'aquesta manera, l'aigua circularà a diferents cabals i es podran llegir les pressions en el punt extrem del circuit a partir del manòmetre.

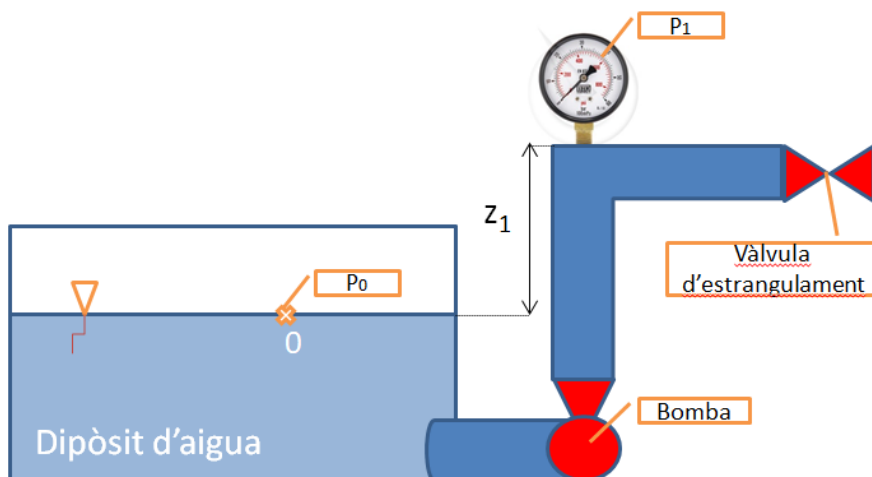


Figura 9. Representació esquemàtica del muntatge usat per l'obtenció de la corba característica de la bomba

El càlcul de l'altura manomètrica que proporciona la bomba es troba a partir de l'equació de Bernoulli entre la superfície lliure de l'aigua en el dipòsit i el punt on es situa el manòmetre. La diferència de cotes entre els dos punts d'estudi és de 0,5 m i la pressió a la superfície lliure del dipòsit és igual a la pressió atmosfèrica.

$$\frac{P_0}{\gamma} + z_0 + H_{bomba} = \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad \rightarrow \quad H_{bomba} = \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Així doncs, es va procedir a prendre mesures dels paràmetres esmentats per a, seguidament, poder dibuixar la corba.

Cabal real (dm ³ /h)	p ₁ (bar)	H _{bomba} (m)
992,126	1,70	17,86
1494,219	1,60	16,86
1777,151	1,50	15,85
3037,975	1,00	10,79
3678,832	0,50	5,71

Taula 8. Valors de cabal, pressió i altura manomètrica de la bomba

La corba característica es pot ajustar a una funció polinòmica de segon o tercer grau de forma bastant precisa. En aquest cas, es tria la regressió a partir d'una funció parabòlica.

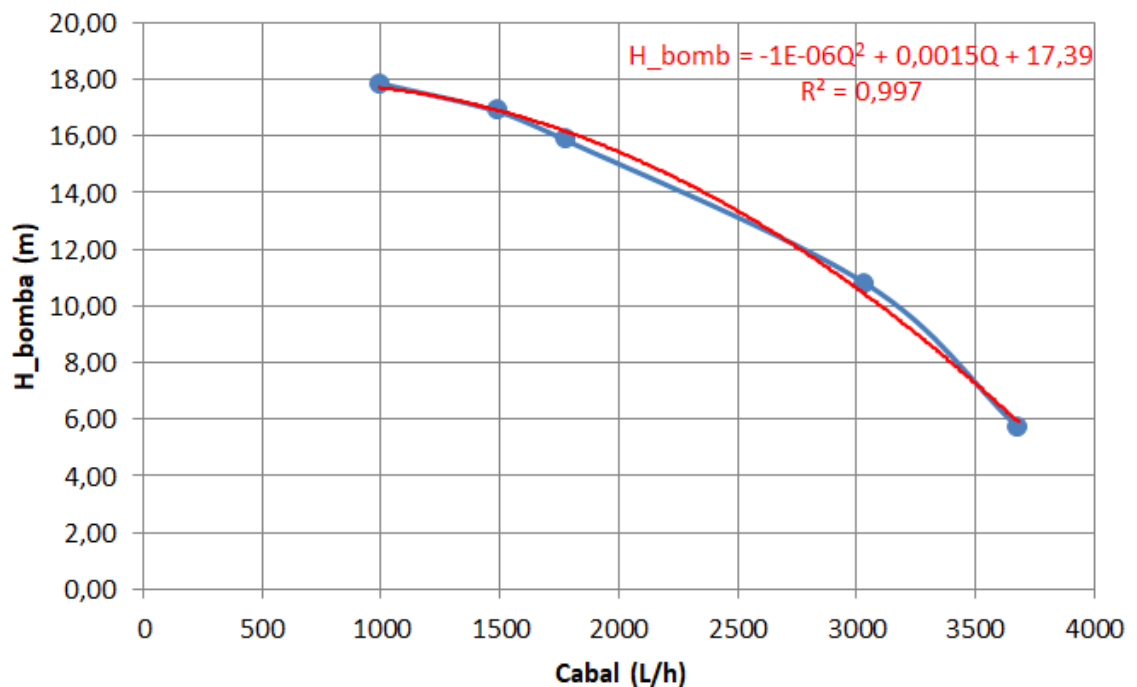


Figura 10. Corba característica de la bomba

Es pot comprovar la veracitat de dita corba comparant el valor de pèrdues de càrrega totals de la situació de treball màxim de l'apartat 3.3.5.1 amb el valor màxim teòric dictat per la corba. En els resultats en sentit divergent, quan la bomba treballava al màxim, el cabal era de 912,82 dm³/h i les pèrdues de càrrega totals eren de l'ordre de 17 m.

$$h_{f_{1-6}} = \frac{P_1 - P_6}{\gamma} + \frac{v_1^2 - v_6^2}{2 \cdot g} \simeq \frac{1,7 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 17,32 \text{ m} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

La corba característica de la bomba relaciona aquestes pèrdues de càrrega amb el cabal màxim. En aquest cas, la corba determina que per 17 m de pèrdua de càrrega, el cabal màxim de la bomba és de 1200 dm³/h aproximadament, bastant semblant al cabal real que hi circulava. La diferència pot ser causada per pèrdues de càrrega extres que no s'han considerat com les produïdes en els tubs o en la vàlvula d'estrangulament.

Ara bé, aquesta corba característica serà utilitzada solament per a tenir estimacions del cabal màxim amb el qual es pot treballar. En el cas que es plantegin nous dissenys de venturi, serà necessària per a saber si el rang de cabals escollit és realista o no.

3.4. Simulació per CFD: ANSYS

Al llarg del treball s'han analitzat les pèrdues de càrrega i els coeficients de forma teòrica, a partir de les seves expressions, i de manera experimental a partir del principi de Bernoulli. Abans de fer una comparativa entre aquests dos mètodes s'ha volgut tenir una tercera referència per a poder extreure unes conclusions encara més profundes.

Així doncs, es va decidir fer una simulació de totes les situacions estudiades. Les simulacions permeten entendre el comportament del fluid, sobretot en les zones on es produeixen variacions en les geometries, així com poder obtenir els valors de pressions i velocitats en els punts d'estudi. El programa seleccionat per a les simulacions va ser Ansys Fluent, idoni per simulacions de fluids.

Ateses les finalitats docents del projecte i el seu objectiu centrat en preparar el banc d'assaig per a una pràctica per a l'ETSEIB (UPC) de l'assignatura de Mecànica de Fluids, l'Ansys es pot incorporar dins la preparació de la pràctica per tal que els alumnes compreguin més profundament l'element muntatge que estudiaran i siguin capaços de contrastar els resultats del laboratori.

Cal ressaltar que, en un primer moment, es va optar per a efectuar una simulació 3D per a una millor visualització. De tota manera, vista la quantitat de temps emprat per Ansys, ja sigui per a construir el mallat de l'objecte com per al càlcul de la solució final, es va concloure que una simulació bidimensional amb condicions d'axisimetria podria ser una simulació més apropiada.

La metodologia seguida per a la definició de les solucions de la simulació i per a la representació de les gràfiques es basa en el tutorial *Fluid Flow and Heat Transfer in a Mixing Tee*, referenciat a la bibliografia. ^[4]

3.4.1. Geometria

La superfície 2D a partir de la qual es crearien els mallats i s'observarien els resultats es va fer amb el programa SolidWorks. Aquest software és molt pràctic per al dimensionament d'estructures i, a més a més, els seus fitxers poden ser importats directament per Ansys.

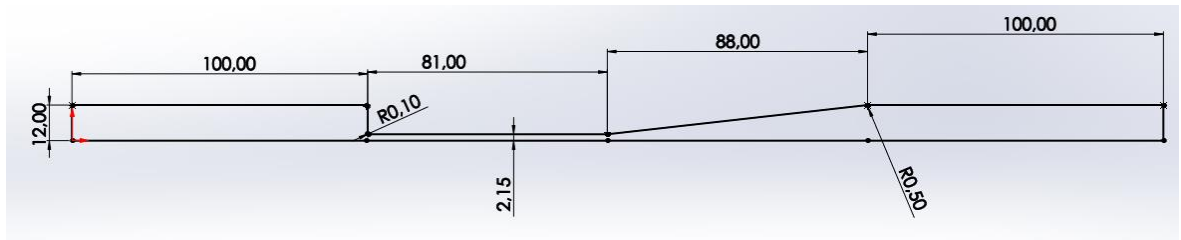


Figura 11. Croquis de SolidWorks per a la simulació 2D

Hi ha certes diferències respecte les dimensions del venturi de la Figura 3. Per exemple, s'han afegit radis de curvatura en els canvis de secció per tal d'eliminar la presència d'arestes vives a la simulació. Aquests han estat escollits de tal manera que no modifiquessin en excés la geometria i, en conseqüència, els resultats de la simulació.

L'altra modificació important que es distingeix a la Figura 11 és la longitud dels trams d'entrada i sortida del venturi. A la realitat, i tal com s'ha indicat a la descripció del muntatge, els forats d'entrada i de sortida es troben a una distància de 10 mm de les singularitats. En canvi, el croquis de la simulació els disposa a 100 mm. Aquesta modificació del disseny original ve motivada per la sospita que es té sobre la mala localització dels punts de mesura inicial i final. En l'anàlisi experimental, s'ha vist com les agulles del manòmetre i el vacuòmetre en certes condicions no donaven valors estables ja que oscil·laven al llarg del temps. Així doncs, s'ha augmentat la separació de la secció inicial i final del venturi per a poder detectar la presència d'alguna anomalia en els punts de mesura.

3.4.2. Mallat

El mallat és fonamental a les simulacions i ha de ser modificat i adaptat a les característiques que tindrà la simulació. Un mallat inadequat pot portar a simulacions i conclusions errònies. Alhora, una malla amb masses elements incrementa el temps de càlcul i fins i tot impossibilita la realització de la simulació. Per tant, es va procedir a fer una millora progressiva del mallat fins a arribar a un de suficientment bo. Juntament amb els diferents mallats s'avançarà alguna gràfica de resultats finals que ajudin al procés de millora de la malla. Cal recordar que únicament serviran per constatar la validesa del mallat i que l'anàlisi de resultats es realitzarà més endavant.

El primer en ser observat va ser el mallat que el programa Ansys Fluent creava per defecte.

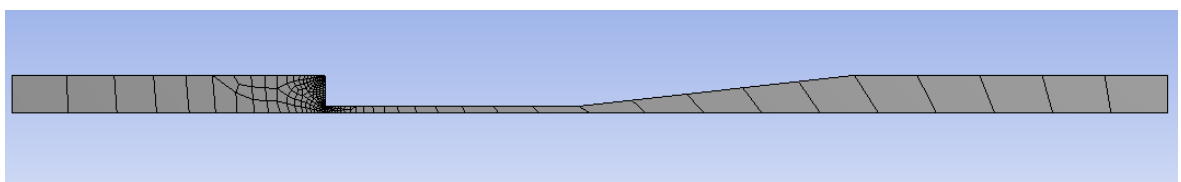


Figura 12. Malla 1 – Per defecte

Aquest és un exemple d'una malla incorrecta ja que els elements són molt grans, no hi ha divisions verticals i molt poques divisions horitzontals.

Per tant, la primera decisió presa va ser la de crear una malla amb un tamany d'element de 1 mm a tota la superfície amb la intenció d'observar si el mallat resultava més adequat i homogeni.

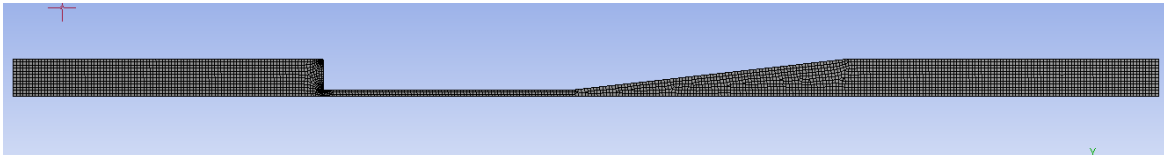


Figura 13. Malla 2 – Element de tamany 1 mm

El canvi és notable, doncs la concentració d'elements a la superfície havia incrementat cosa que permetria una millor interpolació dels resultats. No obstant això, en augmentar la imatge es va trobar que la quantitat d'elements continuava sent molt baixa, hi havia molt poques transicions. En veure el detall de precisió dels seus resultats, es va concloure que encara no s'havia arribat a un mallat adequat.

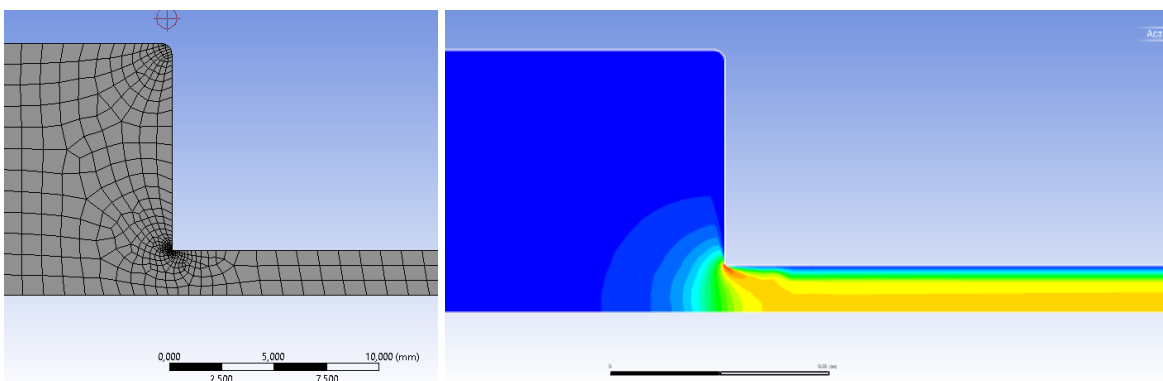


Figura 14. Ampliació del mallat 2 i distribucions de velocitat

Així doncs, es va aplicar un canvi de tamany d'element a 0,5 mm a tota la superfície. A més a més, es va situar el paràmetre "smoothing" a la posició de màxima qualitat per tal que les transicions entre elements de diferents tamany fos més suau.

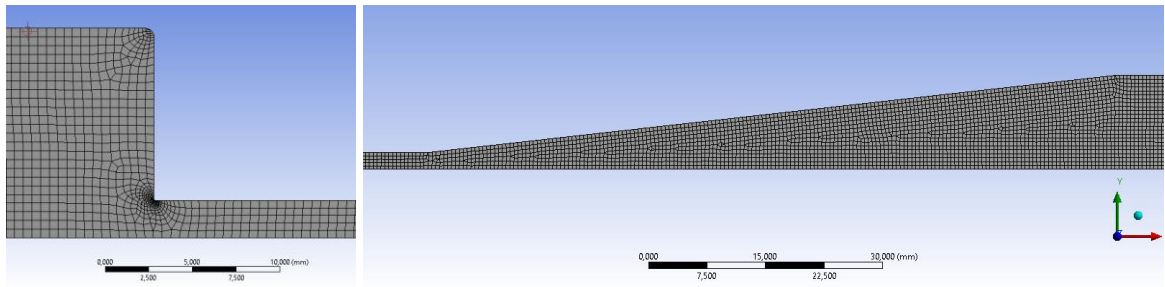


Figura 15. Malla 3 – Element de tamany 0,5 mm

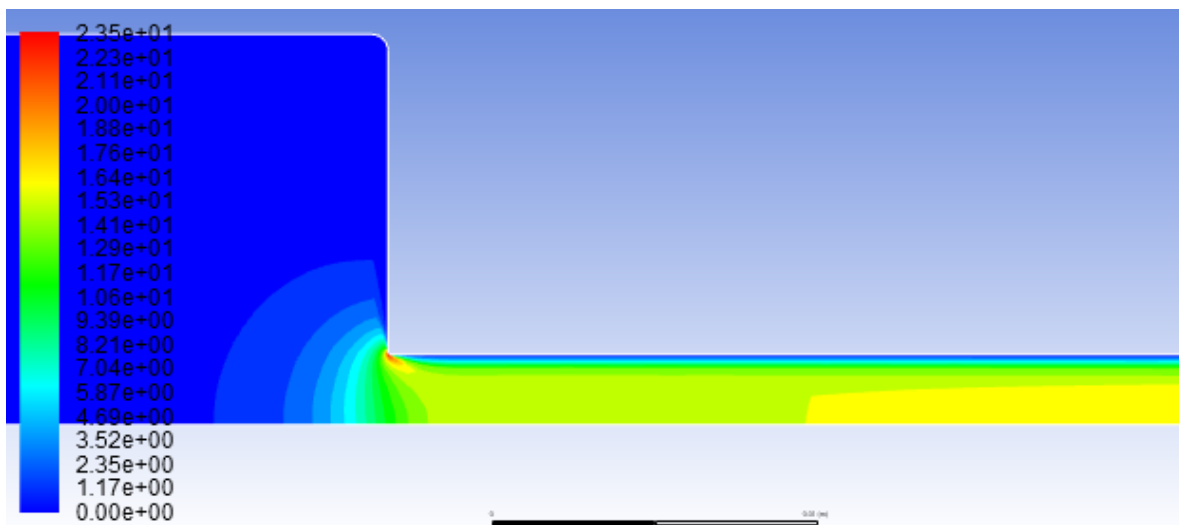


Figura 16. Distribució de velocitats malla 3

El tamany de l'element en els diàmetres grans es va considerar suficient, ja que no es produeixen gradients de velocitat molt elevats fins el canvi de secció. Per altra banda, el tram de secció petita i les singularitats requereixen d'un tamany més petit d'elements per a poder representar de forma més detallada l'evolució del fluid i fer una correcta simulació dels enormes gradients de velocitat que hi succeeixen. A la Figura 16, s'observa com dins del tub petit les variacions de velocitat no són progressives i no es distingeixen de forma clara. Així és que s'altera el tamany dels 7 contorns on hi ha les variacions de velocitat i pressió més importants a 0,1 mm.

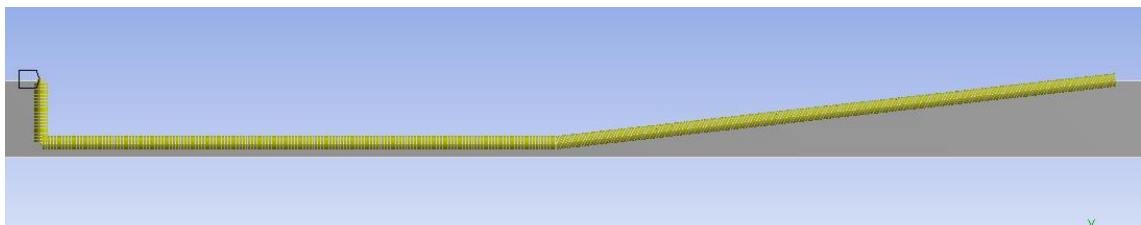


Figura 17. Contorns on es realitza el refinat

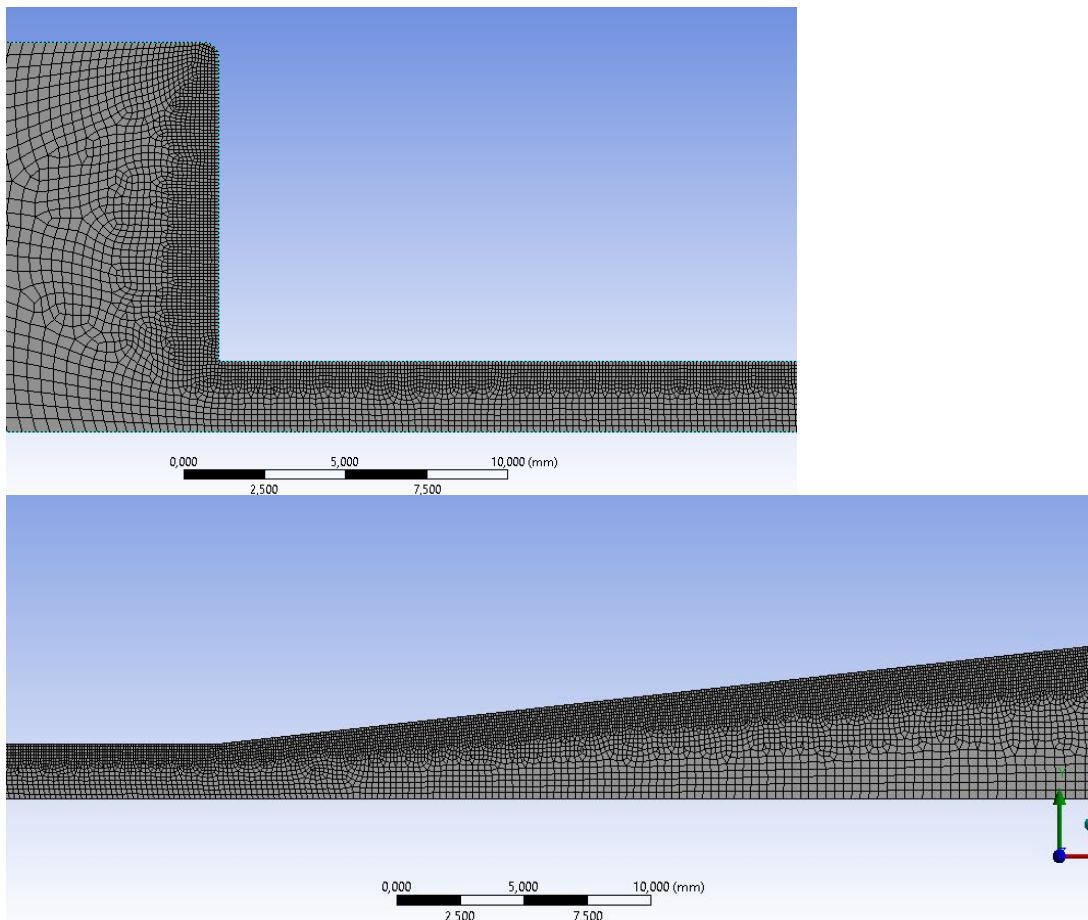


Figura 18. Malla 4 Refinada

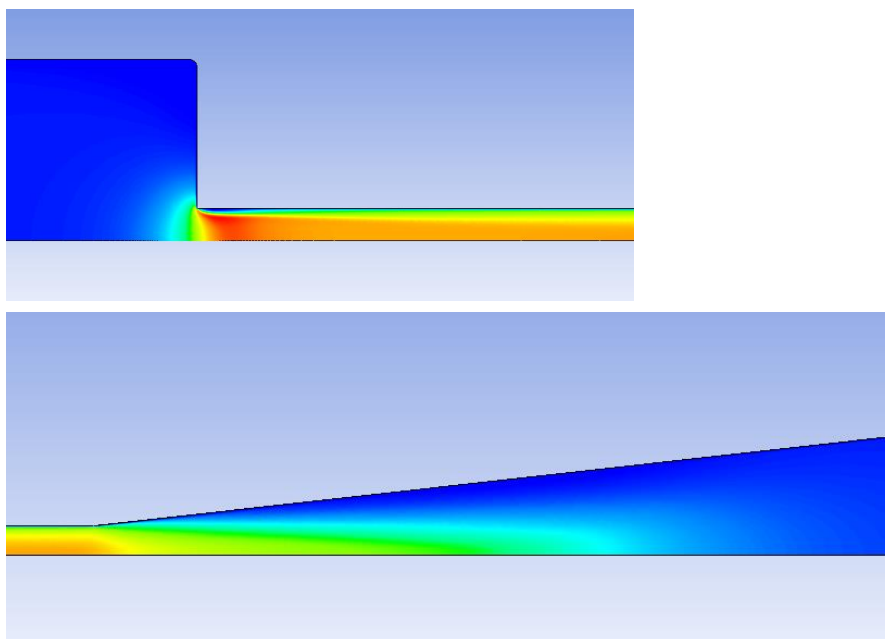


Figura 19. Distribució de velocitats malla 4

Finalment s'havia arribat a una bona representació dels resultats, on hi havia suficients elements per a conèixer el comportament del fluid en les zones més conflictives. L'últim mallat no es basa en incrementar el detall dels resultats sinó en el gradient de velocitats a la paret del venturi.

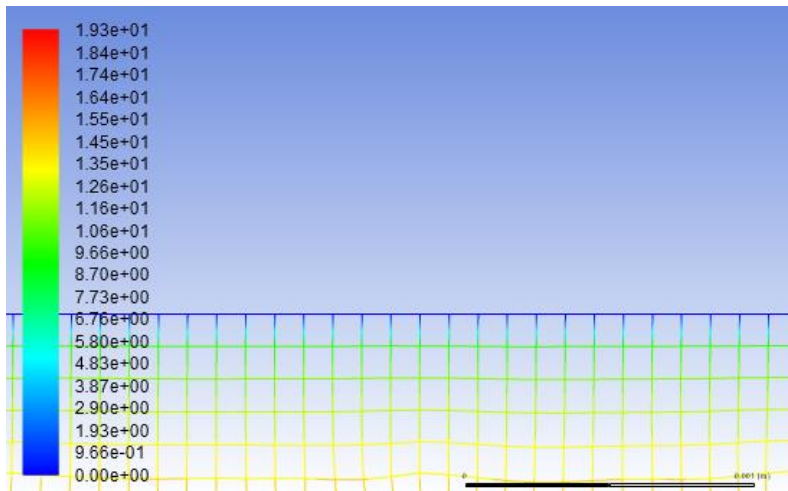


Figura 20. Interpolació de velocitats en els elements de la malla 4

A la Figura 20 es representen els elements del mallat amb el seu corresponent valor de velocitat. Just al contorn del venturi, els elements de la zona superior reben un fort gradient de velocitats. En un dels seus nodes la velocitat és nul·la, propietat imposada per les condicions de contorn, i en el node oposat la velocitat és de 10 m/s aproximadament. Aquest gradient de velocitats tant extrem requereix d'una funció de refinat especial anomenada inflació. Aquesta funció crea subdivisions en els elements en contacte amb les parets per a tenir més informació d'aquesta regió. Ansys té incorporada la funció "inflation", on es va dividir el primer element en contacte amb les parets en 10 subdivisions.

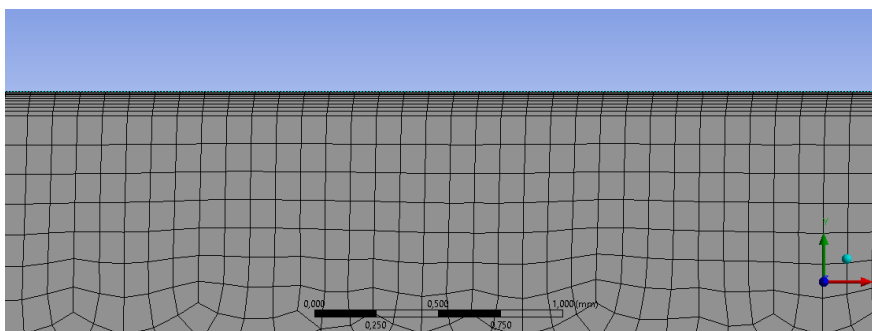


Figura 21. Mallat 5, equivalent al mallat 4 afegint "inflation"

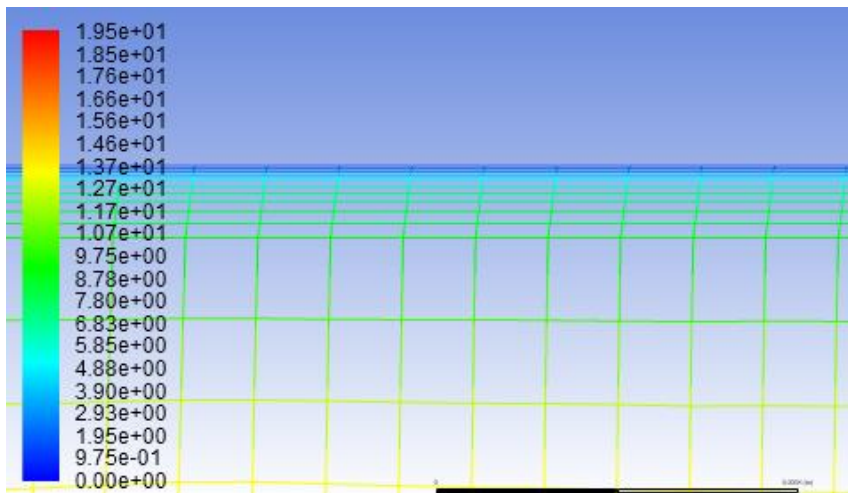


Figura 22. Representació de resultats de la Malla 5 (inflació)

3.4.3. Condicions de contorn

La simulació requereix 4 condicions de contorn: velocitat d'entrada, pressió de sortida, condició de paret ($v=0$) i condició d'axisimetria.

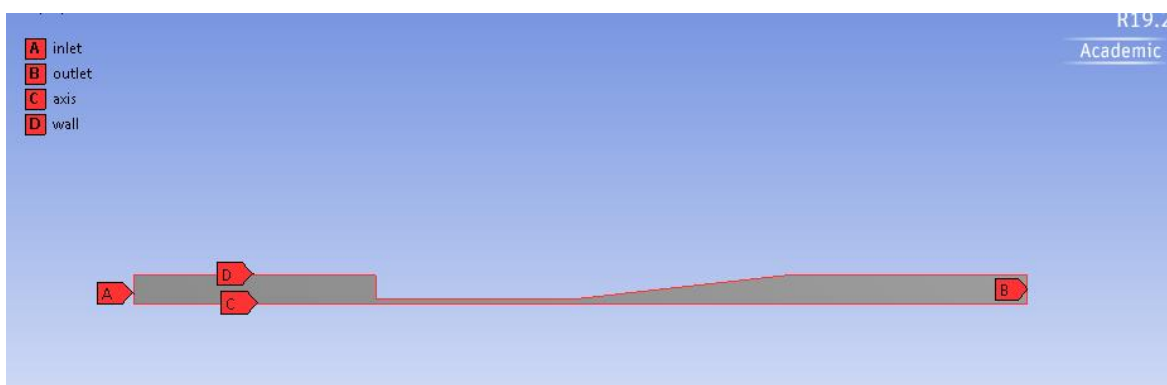


Figura 23. Condicions de contorn del venturi

3.4.4. Solució

Abans d'obtenir els resultats cal haver definit el material del fluid i les seves propietats, imposat les condicions de contorn i definida la solució i la seva monitorització. Ansys utilitza un mètode iteratiu que va modificant la resposta fins a arribar a un valor estable. Per tal de verificar la convergència de la solució, es recomana controlar l'evolució d'un dels paràmetres. En aquest cas, es va decidir observar el procés evolutiu de la pressió d'entrada del venturi.

En no saber el nombre d'iteracions necessàries per tal d'arribar a la convergència, es va calcular la primera solució amb 500 iteracions. A la Figura 24 es va veure que la resposta era convergent a les 150 iteracions. Per deixar un cert marge, les següents solucions es van computar amb 200 iteracions i sempre es va comprovar que la resposta hagués arribat a un valor estable.

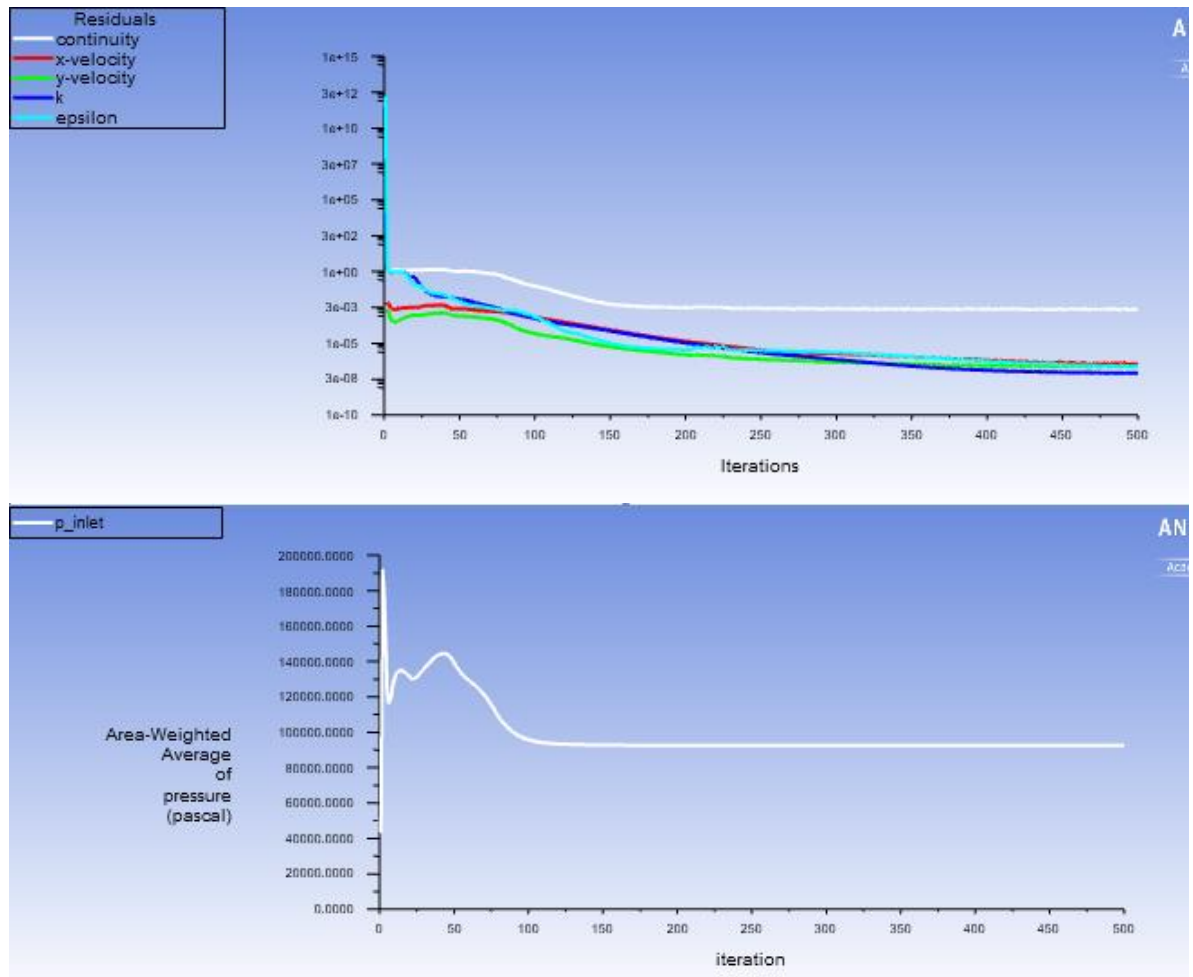


Figura 24. Evolució dels residus i de la pressió d'entrada al llarg del procés iteratiu

3.4.5. Resultats

Un cop establert el mallat adequat i el tipus de simulació (2D), es va procedir a fer una anàlisi dels resultats. Així es van dibuixar gràfics com per exemple el de velocitat o el de pressió. Les següents figures corresponen a les situacions de $Q=718,08 \text{ dm}^3/\text{h}$ en sentit divergent i $Q=732,15 \text{ dm}^3/\text{h}$ en convergent. Es va fer la mateixa anàlisi per a tots els altres punts de treball i els resultats finals es troben recollits a la comparativa final.

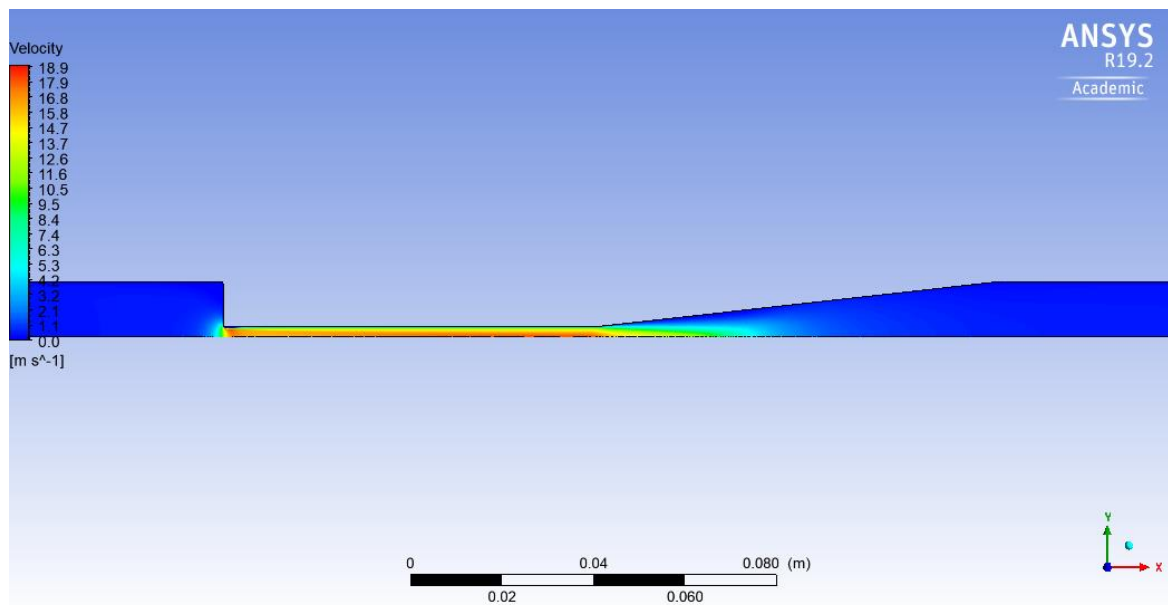


Figura 25. Distribució de velocitats en sentit divergent

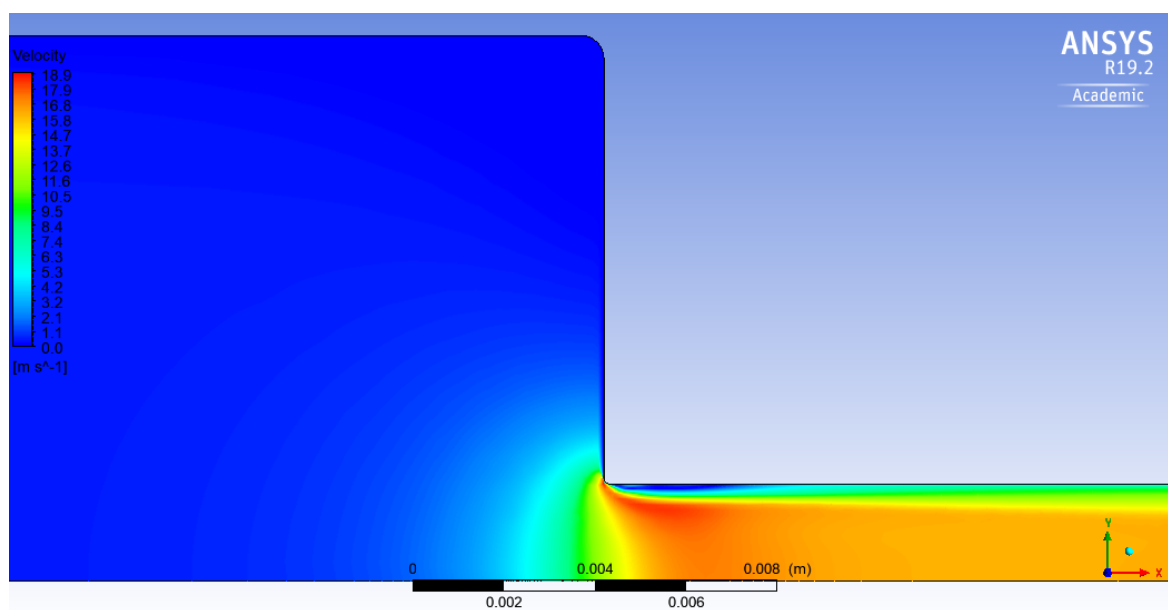


Figura 26. Distribució de velocitats ampliada en la singularitat en sentit divergent

La velocitat comença en un valor molt baix que no varia fins el canvi de secció brusca (regió blava). Ansys permet comprendre les variacions de velocitat de forma local mentre que fins ara s'havia estimat el seu valor mitjà. La imatge ajuda a entendre com la velocitat és màxima en el vèrtex del canvi de secció (regió roja). A més a més, es distingeix el fort gradient de velocitats al llarg de l'eix Y. El motiu pel qual existeix aquest gradient és per la condició de contorn imposada de velocitat nul·la a la paret. Deixant de banda la singularitat, la velocitat en el centre del venturi serà màxima i d'un valor més alt que el mitjà. En el tram cònic, la velocitat disminueix progressivament fins arribar de nou a un valor molt baix.

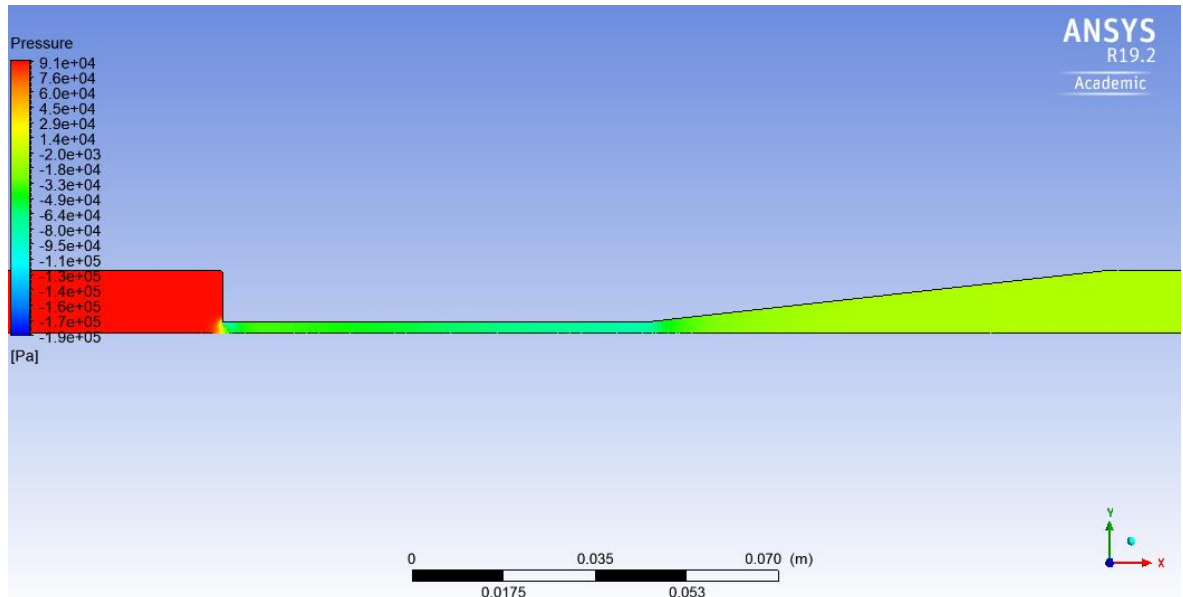


Figura 27. Distribució de pressions en sentit divergent

Les pressions presenten una conducta coherent amb l'esperada. A mesura que s'avança en l'eix de les X es veu la disminució progressiva de la pressió, sent aquesta negativa a l'interior del cilindre de diàmetre petit i acabant amb un valor semblant a zero.

D'altra banda, Ansys disposa de la funció "streamline" la qual ensenya l'evolució d'un conjunt de partícules en tot el recorregut.

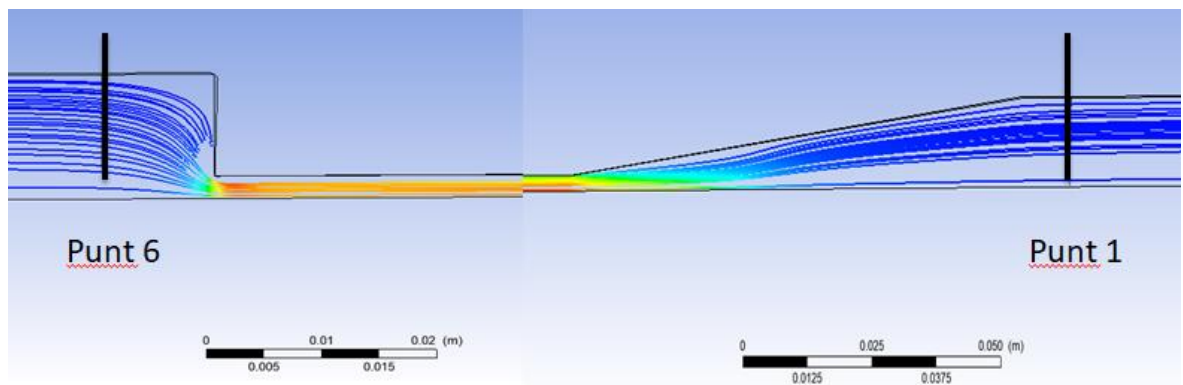


Figura 28. Distribució línies de corrent en les singularitats (sentit divergent). Les línies negres verticals corresponen als punts de mesura 6 i 1.

Tal i com es pot trobar a les conclusions, la distribució de les partícules fa sospitar que la localització dels punts de mesura en el venturi no és del tot apropiada. A la realitat, l'entrada no serà tan bona com la que es pot veure aquí ja que es troba a una distància menor de la singularitat. A la Figura 28 s'han representat els punts de mesura de la pressió d'entrada i de sortida (línies negres verticals). La distribució de les línies de corrent en aquests punts no

acaba de ser uniforme .

A continuació s'han adjuntat els gràfics en la situació convergent. La distribució de velocitats i de pressions és altra vegada coherent amb l'anàlisi prèvia tant teòrica com experimental. La velocitat augmenta progressivament en el tram cònic alhora que la pressió disminueix. El tram lineal té una distribució de velocitats i pressions anàloga a la distribució en el sentit divergent. En canvi, el canvi de secció brusc té un efecte diferent de l'estimat que és convenient observar.

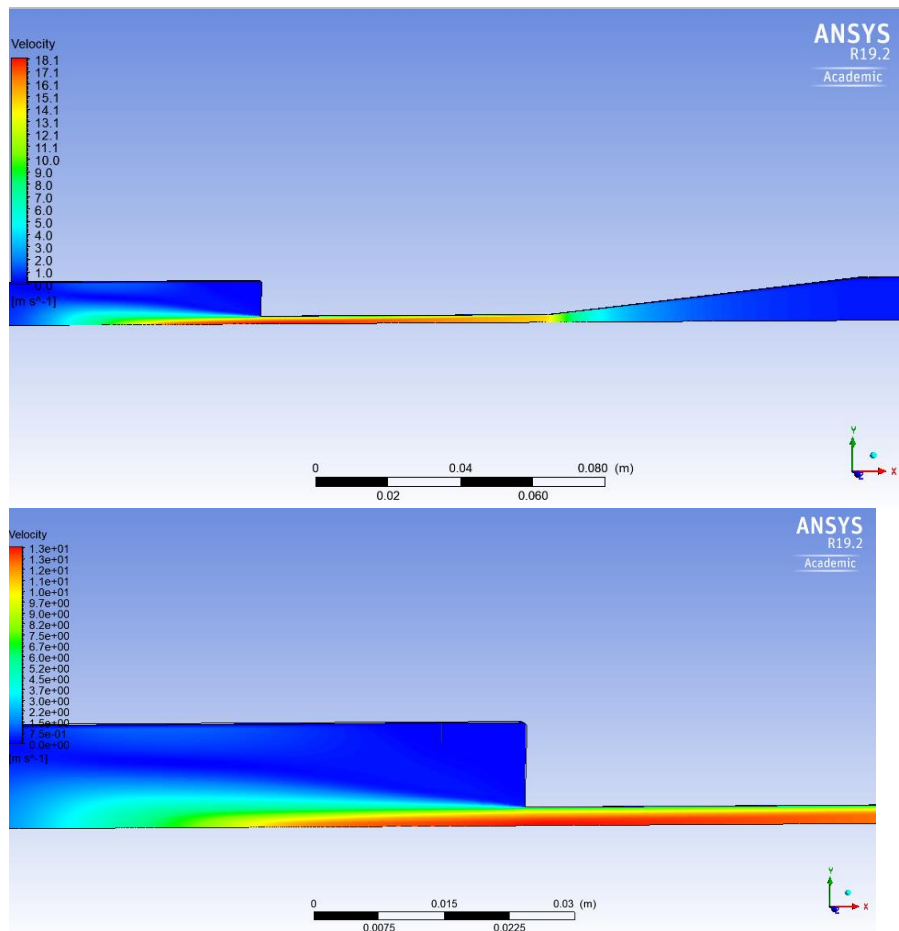


Figura 29. Distribucions de velocitats sentit convergent (global a la imatge superior i local ampliada a la inferior)

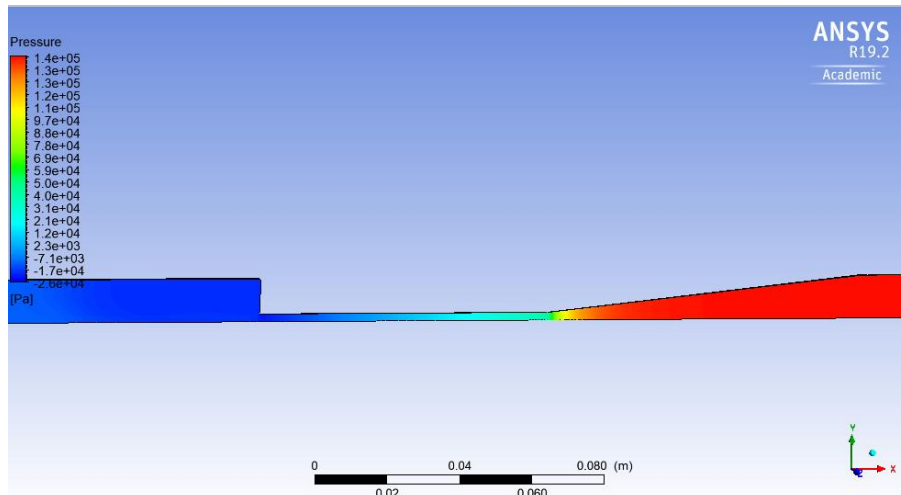


Figura 30. Distribució de pressions en sentit convergent

A la Figura 29 s'observa com la velocitat del fluid varia de forma molt gradual en el tram cònic del venturi. La diferència s'observa en el tram final, on hi ha el canvi bruscat de secció. En la situació anterior, on el fluid circulava en sentit divergent, ja hi ha hagut una sospita sobre la possible mala localització dels punts de mesura 1 i 6. Aquest fet és molt més notori en la situació present. Durant una distància molt superior a la del punt de mesura, el fluid és incapaç d'adaptar-se a la nova geometria i no arriba a un estat mínimament uniforme fins just el final de la figura. La línia de corrent reafirma aquesta teoria i amplifica els seus efectes.

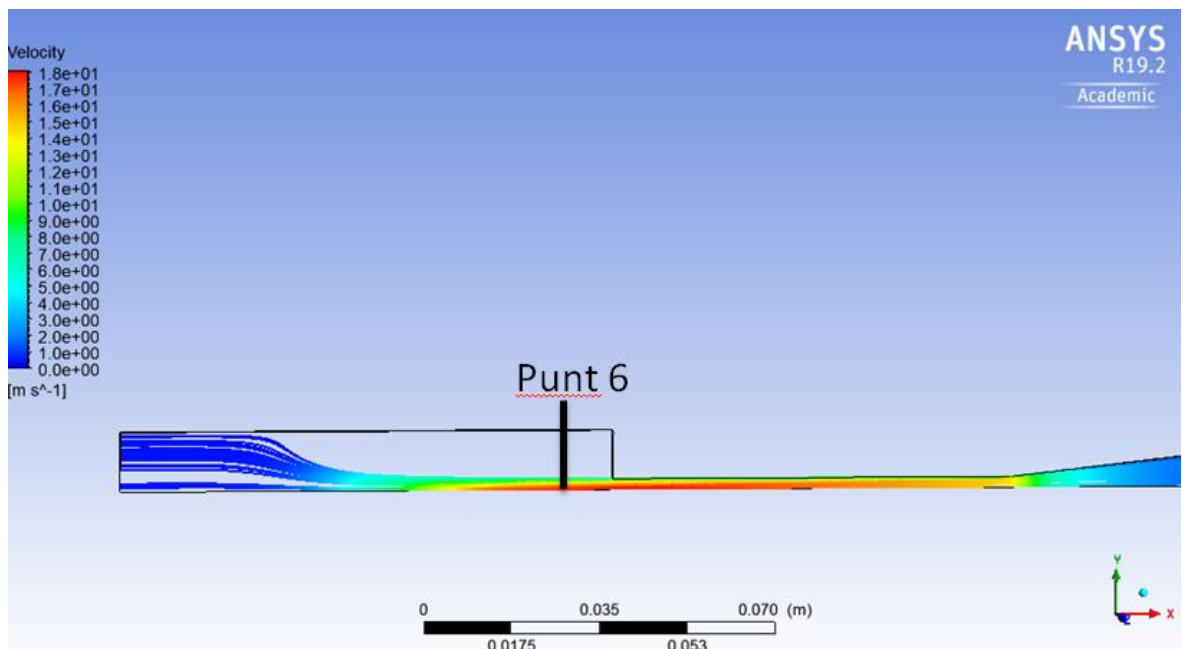


Figura 31. Distribució de línies de corrent en sentit convergent

De la mateixa manera que en la distribució anterior, s'ha dibuixat la secció on el fabricant ha col·locat els forats per prendre la mesura de pressió en el banc d'assaig real (Punt 6). La sospita de mala localització del punt de mesura es converteix en certesa en veure com el fluid no s'adequa al nou diàmetre fins gairebé el final de la longitud fictícia del venturi simulat.

De fet, s'ha comprovat que no fos Ansys que obligués al fluid a tornar-se desenvolupat en aquesta posició. Per a fer això, s'ha allargat la longitud del tram que abans era de 100 mm fins a 200 mm. Tot i això, es demostra com l'Ansys no imposa cap condició especial i el fluid realment es torna desenvolupat a 80 mm del canvi de secció.

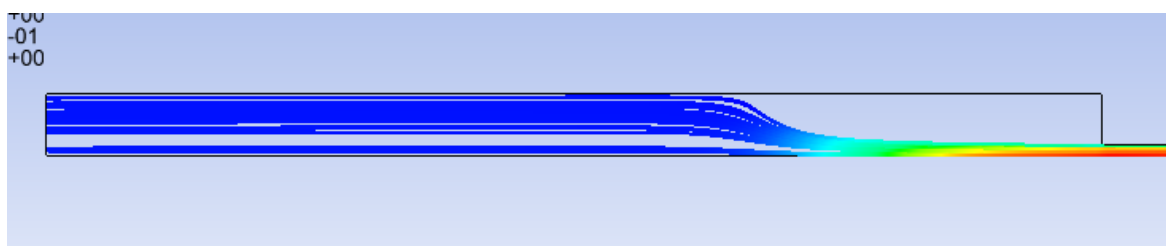


Figura 32. Localització del deixant i de l'inici del tram de flux uniforme

El motiu pel qual l'emplaçament dels forats de mesura és incorrecte és perquè s'està treballant en una regió on el flux no està desenvolupat. La singularita provoca un deixant turbulent que és el causant de males lectures o oscil·lacions.

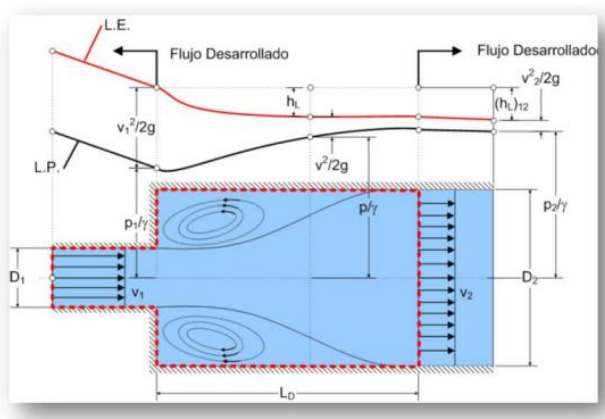


Figura 33. Deixants turbulents a la singularitat (Font: [2])

Les conseqüències que comporta aquest fet es veuen reflectides a la conclusió sobre el banc d'assaig. Malgrat les distribucions creades per Ansys són més detallades i han ajudat a comprendre com es desenvolupa el fluid a l'interior del conducte, s'ha decidit considerar únicament les pressions i velocitats mitjanes en cada un dels punts estudiats.

Finalment, s'han recollit els resultats dels coeficients de pèrdua de càrrega directament a la comparativa entre els tres mètodes. Els càlculs dels coeficients s'han dut a terme amb la

mateixa metodologia que s'ha emprat en l'anàlisi experimental, és a dir, a partir d'una taula de pressions i velocitats, calcular amb el principi de Bernouilli les pèrdues de càrrega i els seus coeficients.

3.5. Anàlisi de resultats

3.5.1. Comparativa valors teòrics, experimentals i simulats

Primer de tot, es verifica que el Reynolds mínim estigui per sobre de 10^4 per a poder utilitzar les fórmules plantejades. De fet, es troba la velocitat mínima a la qual ha d'anar el fluid per tal d'estar per sobre el nombre de Reynolds desitjat.

$$Re_{min} = \frac{v_{0min} \cdot 4,3 \cdot 10^{-3}}{8,91 \cdot 10^{-7}} \rightarrow v_{0min} = 2,07 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

Es pot observar com totes les velocitats en els trams de secció petita són majors a aquest valor. Per tant, no hi haurà problemes en quant a la hipòtesi de turbulència i es podrà fer ús de totes les expressions descrites a l'anàlisi teòrica.

3.5.1.1. Sentit divergent

Cabals (dm ³ /h)	f_{in}			K_6			K_{con}		
	Teòric	Exp.	Ansys	Teòric	Exp.	Ansys	Teòric	Exp.	Ansys
912,82	0,019	0,024	0,026	0,484	0,369	0,313	0,214	0,449	0,216
856,74	0,019	0,024	0,026	0,484	0,462	0,315	0,214	0,396	0,216
718,09	0,020	0,024	0,028	0,484	0,375	0,324	0,215	0,315	0,217
694,40	0,020	0,023	0,028	0,484	0,378	0,325	0,215	0,269	0,217
512,64	0,021	0,026	0,031	0,484	0,433	0,342	0,217	0,333	0,218
415,82	0,023	0,023	0,033	0,484	0,218	0,351	0,218	0,556	0,218

Taula 9. Comparativa resultats amb les diferents metodologies (sentit divergent)

3.5.1.2. Sentit convergent

Cabals (dm ³ /h)	f_{lin}			K_6			K_{con}		
	Teòric	Exp.	Ansys	Teòric	Exp.	Ansys	Teòric	Exp.	Ansys
850,29	0,019	0,029	0,034	0,937	0,793	0,906	0,020	0,180	0,082
732,15	0,020	0,028	0,036	0,937	0,815	0,902	0,021	0,225	0,087
538,79	0,021	0,023	0,039	0,937	0,977	0,894	0,022	0,281	0,098

Taula 10. Comparativa resultats amb les diferents metodologies (sentit convergent)

3.5.1.3. Conclusions de la comparativa

Excepte petits casos particulars que es comentaran a continuació, les tres metodologies emprades per a calcular els coeficients donen resultats força semblants. El valor estimat de f_{lin} és de **0,025**. Quant a les discrepàncies entre metodologies, f_{lin} experimental és una mica superior al valor teòric. Aquí entra en joc la validesa de la hipòtesi de parets llises assumida a l'anàlisi teòrica.

El coeficient per canvi de secció brusca (K_6) té una tendència a ser lleugerament inferior en l'anàlisi experimental i la simulació respecte el valor teòric. El venturi del banc d'assaig presenta una certa curvatura a la singularitat que produeix una alteració de la secció més progressiva. En l'anàlisi teòrica s'ha simplificat la geometria i no s'ha tingut en compte aquesta curvatura. En canvi, a fi d'evitar la presència d'arestes vives, la geometria de la singularitat a la simulació sí que es va dissenyar amb un cert radi de curvatura.

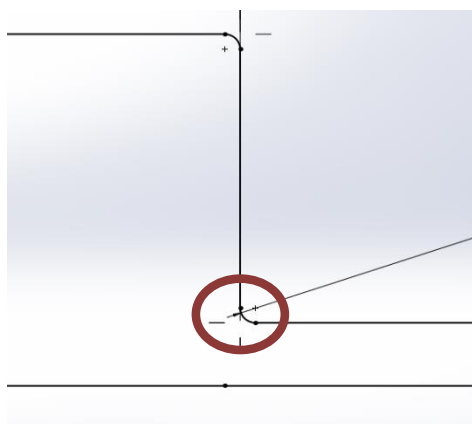


Figura 34. Radi de curvatura en el canvi de secció brusca

Lògicament, els resultats simulats i teòrics, on la singularitat presenta radi de curvatura, són lleugerament inferiors al teòric. Aproximadament, s'estima que $K_{6_divergent}=0,4$ i que $K_{6_convergent}=1$.

Per acabar, el tram cònic és la regió on hi ha hagut més discrepàncies entre les tres citades metodologies. Així doncs, K_{con} en divergència és similar tant en l'estudi teòric com en el simulat però experimentalment oscil·la força entre els diferents punts de treball, sempre situant-se en un interval aproximat de $K_{con_divergent}=0,2\div 0,4$. El motiu principal és que la pressió en el punt 1, necessària per al càlcul del coeficient, tendeix a valors propers al zero relatiu i oscil·la força al llarg del temps, factors que dificulten una mesura precisa.

Per altra banda, la situació en sentit convergent presenta la menor coherència entre els tres tipus d'anàlisi. La teoria i Ansys només tenen en compte la pèrdua de càrrega per fricció i menystenen l'aportació de la pèrdua de càrrega geomètrica, tal i com s'ha explicat a l'apartat 3.2.3.3. No obstant això, ja sigui per la menor validesa de la hipòtesi de parets llises o per altres orígens de pèrdua de càrrega simplificats en la teoria, els valors experimentals són superiors i giren al voltant de $K_{con_convegent}=0,2$.

3.6. Conclusions finals banc d'assaig

El banc d'assaig ofereix un ventall de possibles aplicacions i experiències enorme. Abans de procedir a les possibles situacions pràctiques que es poden desenvolupar amb el venturi, s'ha fet una reflexió sobre el banc d'assaig on es contempen els punts positius i també els inconvenients del muntatge.

D'entrada, sobte el mal calibratge del cabalímetre i la dada errònia sobre els diàmetres, més considerant l'alta sensibilitat dels resultats front aquests paràmetres. Amb la instrumentació i les dades pròpies del banc apareixen resultats incoherents com ara pèrdues de càrrega, i en conseqüència coeficients de pèrdua de càrrega lluny dels valors esperats. Malgrat els resultats en el treball s'hagin obtingut a partir dels cabals mesurats de forma manual, és un mètode poc pràctic i més considerant les finalitats docents del projecte. Per tant, s'ha decidit aplicar un factor corrector a la lectura del cabalímetre que estimi el valor del cabal real. Afortunadament, la desviació del cabalímetre és força constant i s'ha estimat en un 14 %. Així és que el factor corrector a aplicar al cabal llegit al cabalímetre és de 0,86.

En segon lloc, el banc d'assaig incorpora uns aparells de mesura poc pràctics per les situacions experimentals que es realitzaran. Les columnes manomètriques, que ronden el mig metre d'altura, permeten observar variacions de pressió de l'ordre de 0,05 bar. Tal i com es pot observar al llarg de tot l'estudi, les variacions de pressió entre els punts d'estudi són, en general, molt superiors. Així doncs, en disposar únicament d'un manòmetre i d'un vacuòmetre per a les lectures de pressió positives i negatives respectivament, hom es veu

obligat a apagar la màquina en el cas de voler conèixer les pressions en les diverses seccions.

En tercer lloc, les simulacions creades amb Ansys demostren la mala distribució dels capil·lars per on es mesuren les pressions. Les Figures 28 i 31 certifiquen que l'estat del fluid no és uniforme en els punts 6 i 1, en sentit divergent, i sobretot en el punt 6 en sentit convergent. Cal insistir que el fluid, just després d'una singularitat de canvi de secció exigeix una distància mínima de 80 mm aproximadament per a tornar a enganxar-se a les parets del cilindre. El venturi assajat no compleix aquesta distància mínima i per tant les mesures es realitzen en zones de flux no desenvolupat.

En un global, un cop s'han detectat i corregit els errors de calibratge i si no es tenen en compte els efectes produïts per les localitzacions inadequades dels punts de mesura, el banc pot ser útil per a les pràctiques de l'assignatura de Mecànica de Fluids.

4. Aplicacions del banc d'assaig

4.1. Cavitació

El fenomen de la cavitació consisteix en la formació de bombolles de vapor dins d'un fluid quan aquest pateix una baixada de pressió estant a temperatura constant. Per a entendre millor aquest fenomen cal haver comprès el diagrama de fases d'una substància.

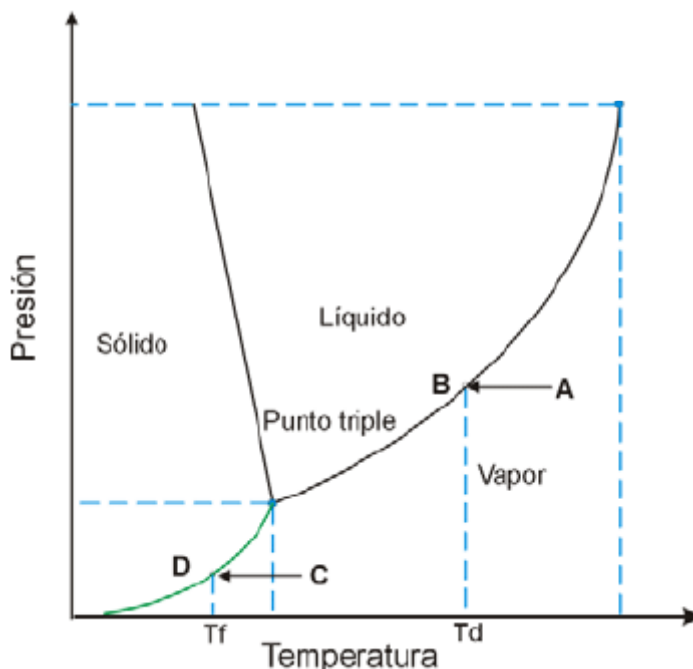


Figura 35. Diagrama de fases d'una substància (Font: [6])

De forma gràfica, el diagrama descriu els diferents estats que pot prendre la substància en qüestió depenent de la pressió i de la temperatura. Dit això, mantenint la temperatura constant el líquid es pot convertir en vapor si es troba a un determinat valor de pressió. Aquesta pressió s'anomena pressió de vapor i en les condicions de treball en les quals es treballa, és a dir, sent el fluid estudiat l'aigua i considerant una temperatura de l'entorn constant de 20°C, la pressió absoluta de vapor és de 3169,9 Pa. Així doncs, quan s'assoleixen aquests valors de pressió el líquid es vaporitza, fet que ocasiona l'aparició de bombolles en el fluid. ^[5]

Dins la Mecànica de fluids, la cavitació és un fenomen molt estudiat i important, en part pel gran impacte que té en el sector de l'enginyeria. Per exemple, el sorgiment d'aquestes bombolles en canonades causa un efecte erosiu que pot danyar significativament l'estructura.

Un dels motius pels quals es va fabricar i comprar el banc d'assaig sobre el qual es basa aquest projecte va ser el de poder ajudar als estudiants a comprendre millor aquest fenomen a partir de la seva visualització i estudi. A tal efecte, el venturi del banc d'assaig va ser dissenyat per tal de patir una gran disminució de pressió i així forçar el fluid a cavitatar.

En obrir completament la vàlvula de la bomba quan el venturi es troba en situació de divergència, es pot observar un conjunt de bombolles que apareix al voltant del punt 4, just a l'inici del tram cònic tal i com s'observa a la Figura 36.

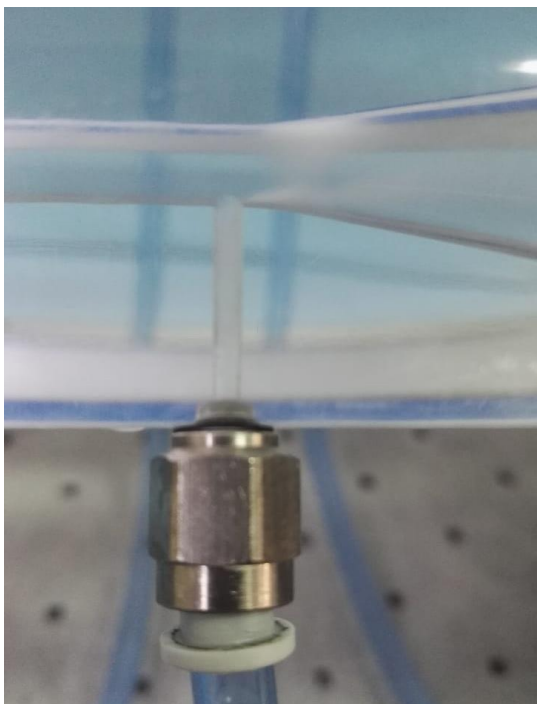


Figura 36. Formació de bombolles en el punt d'estudi 4

El fabricant assegura en el seu manual que es produeix cavitació en aquesta situació, doncs es poden veure i escoltar les bombolles circulant pel venturi. Si bé l'últim és cert, es va voler demostrar si el fenomen descrit era realment cavitació o no. Bé podria donar-se el cas que les bombolles observades no fossin de vapor d'aigua sinó d'aire que hagi entrat pels ràcords per la seva elevada depressió.

Es va tancar progressivament la vàlvula de control de cabal fins la desaparició completa de les bombolles i es va mesurar la pressió del punt on apareixien. Aquesta pressió era de -0,80 bar relatius, força diferent a la pressió de vapor de l'aigua de -0,95 bar. Tot seguit, es van plantejar diferents explicacions que poguessin descartar la presència de cavitació en el tub.

El venturi està connectat a un conjunt de columnes manomètriques per calcular les variacions de pressions que pateix. La connexió es fa mitjançant tubs de plàstic que s'acoblen manualment a uns ràcords per a mantenir-los fixos.

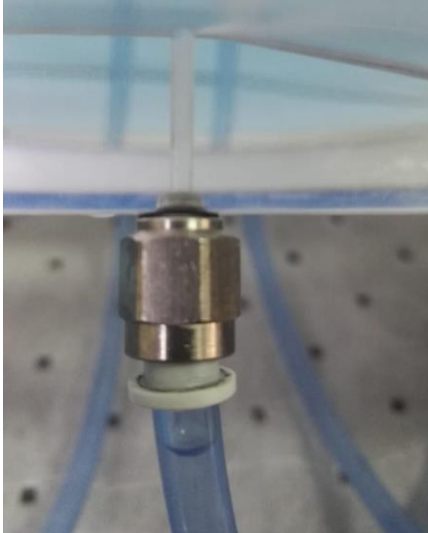


Figura 37. Connexió entre el venturi i els aparells de mesura de pressió mitjançant un ràcord

Bàsicament, es va posar especial atenció a les columnes manomètriques i a la seva unió amb el venturi ja que era l'únic lloc per on podia entrar aire. Tots els forats estan connectats a una columna mitjançant un tub blau com el de la Figura 37. Les columnes disposen d'una vàlvula que permet el pas de la circulació per aquests tubs. En estar la vàlvula tancada, el tub és com s'hi no existís.

Primer, es va analitzar la presència de cavitació tenint en compte si les vàlvules que controlen el funcionament de les columnes es trobaven obertes o tancades. Ràpidament es va entendre que hi havia un canvi de comportament enorme. En estar totes les vàlvules obertes, es produïen recirculacions entre els punts dels forats i apareixia un deixant de bombolles com el de la Figura 38.

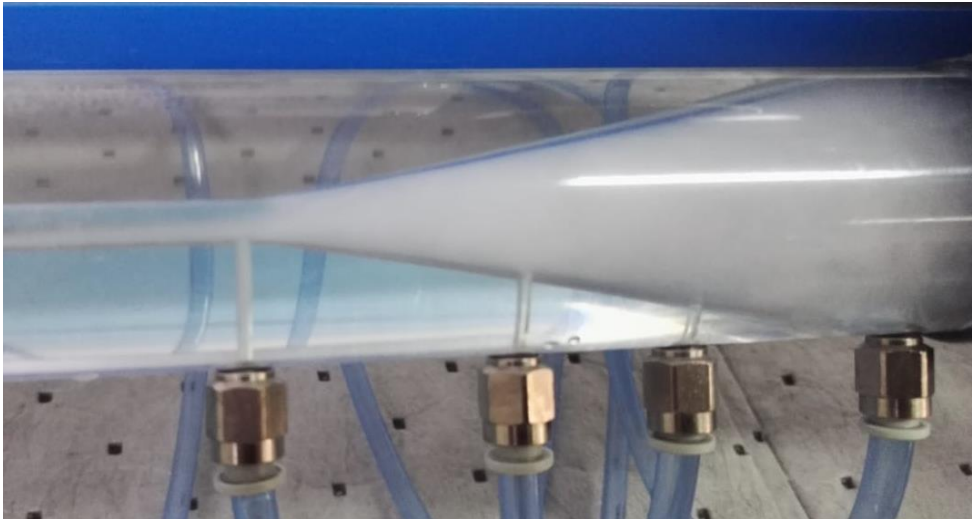


Figura 38. Estel de bombolles d'aire que apareixen quan les columnes manomètriques estan connectades (vàlvules obertes)

Tancades ja totes les vàlvules, la següent causa a investigar era la mala estanqueïtat dels ràcords situats a les sortides dels capil·lars a l'exterior. En situacions de pressions molt negatives, els fluids de l'entorn són aspirats amb molta força. En casos extrems pot ser que la seva operativitat es vegi afectada.

Per tal d'anul·lar els possibles efectes derivats de la mala estanqueïtat dels ràcords, es van tapar totes les sortides dels forats situades al lateral del venturi amb una cinta de tefló i es va estudiar novament la situació.



Figura 39. Estel de bombolles amb els forats aïllats amb cinta tefló

L'estel de bombolles continua veient-se i escoltant, motiu pel qual es considera que els ràcords són suficientment aïllants. Tot i això, bé podria ser que l'aire, en casos de depressió tant extrems, s'escoli per llocs no contemplats. La solució per verificar la hipòtesi de mala estanqueïtat de forma definitiva seria l'eliminació dels forats, és a dir, amb una paret de metacrilat completa.

L'estanqueïtat ha estat provada tant amb ràcords com amb cinta aïllant i l'efecte no ha variat significativament. Per tant, es pot assegurar que hi ha cavitació a l'interior del venturi. La localització de la secció on apareix el fenomen és coherent amb el principi de Bernoulli, doncs és el punt del venturi on hi haurà una pressió negativa més gran. Petites partícules d'aire ja presents en el fluid o que hagin aconseguit entrar pel forat poden mesclar-se amb les de vapor d'aigua, lleugerament amplificant la quantitat de bombolles observades.

A fi de concloure l'estudi de cavitació i tenint en compte les finalitats docents del projecte, s'han pres les següents decisions. Es considera que el fenomen observat sí és cavitació i permetrà a l'estudiant entendre com a pressions molt baixes i en condicions de temperatura controlada, les molècules d'aigua vaporitzen i es converteixen en petites bombolles.

4.2. Ompliment i buidatge de dipòsits

El moviment dels fluids ve condicionat en gran part per les diferències de pressions que es pateixen. En el cas estudiat, el fluid es dirigirà cap a zones amb menor càrrega ($P/\gamma + z$).

La geometria del venturi facilita l'aparició de zones amb altes depressions que poden ser utilitzades per tal d'aspirar un fluid extern. Aquesta secció està plantejada per a observar la capacitat de succió que pot tenir el venturi en condicions de treball normals. El banc incorpora dos petits dipòsits que es van col·locar per tal de poder complir amb aquest propòsit.

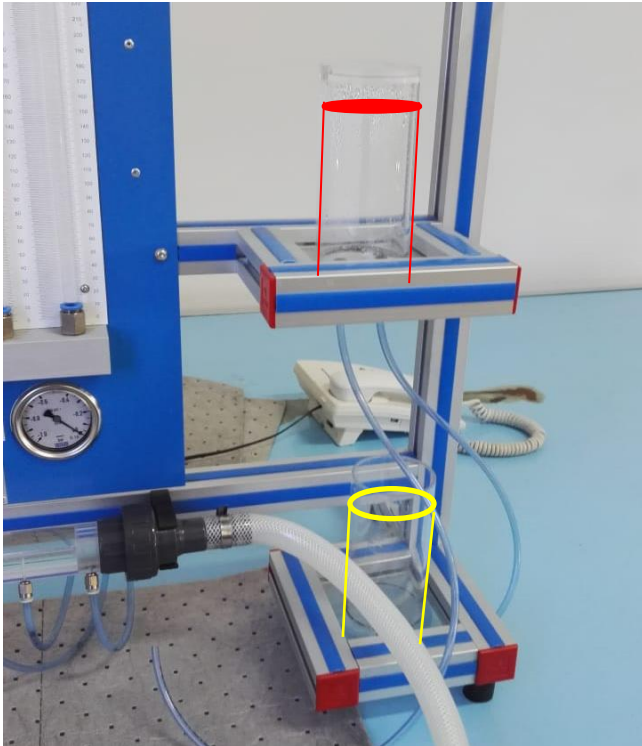


Figura 40. Dipòsit volumètric 1 (resseguit en groc) i dipòsit volumètric 2 (resseguit en vermell)

Els dipòsit 1 té la cara superior descoberta per a permetre el seu emplenament. A la zona inferior, disposa d'un adaptador que permet la connexió d'un tub. El segon dipòsit, en canvi, té una tapa a la cara superior i dos forats a la inferior. Aquestes dues entrades al dipòsit tenen incorporats de forma permanent dos dels tubs esmentats.

El venturi serà l'encarregat de produir pressions molt negatives gràcies al seu canvi de secció tant pronunciat en sentit divergent. Al final del tram lineal hi trobem el punt 4, on hi haurà la major depressió de tot el muntatge. En aquest forat s'introdueix un dels dos tubs del dipòsit 2, mentre que l'altre es connecta amb el dipòsit 1, el qual s'haurà omplert prèviament amb un volum conegut d'aigua.

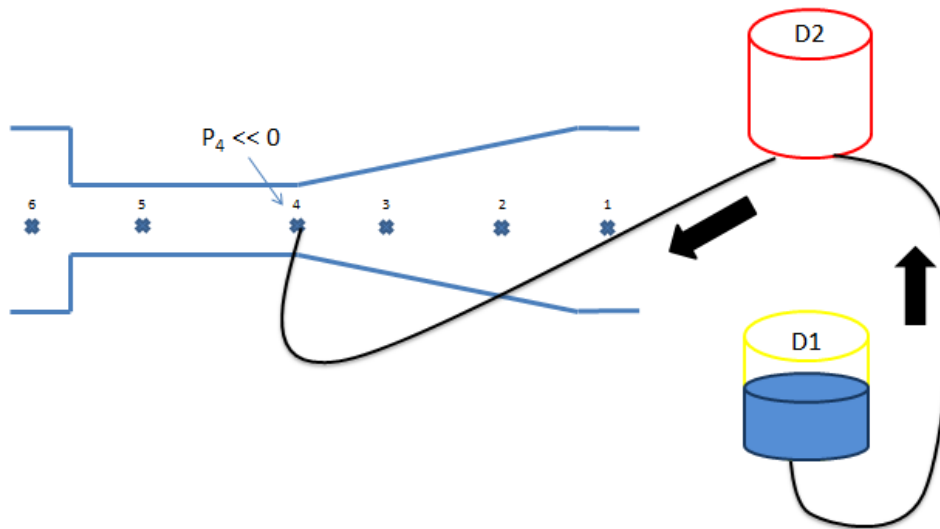


Figura 41. Esquema del funcionament del buidatge del dipòsit 1

D'aquesta manera, quan el venturi entri en funcionament, la pressió del punt 4 serà molt petita. Hi haurà una diferència de pressions que farà circular el fluid del dipòsit 1 cap al segon.

4.3. Línies de càrrega

Uns dels conceptes fonamentals de la mecànica de fluids que es tracten en aquest projecte són les pèrdues de càrrega i el principi de Bernouilli. Una visualització gràfica sobre la distribució de l'energia o càrrega al llarg del circuit ajuda a tenir un millor enteniment sobre els conceptes explicats.

Les següents línies permeten una representació gràfica de l'aportació de cada un dels termes del teorema de Bernouilli en cada secció^[7].

- **Línia d'altura geomètrica:** representa les diferències de pressió en modificar l'altura geomètrica (z). En el cas estudiat, tots els punts del venturi es troben a la mateixa altura i per tant únicament es situarà una línia de referència.
- **Línia piezomètrica:** combina la pressió guanyada per l'altura z i per la pressió estàtica
- **Línia de càrrega:** també anomenada línia d'energia, dibuixa l'energia total en cada punt i va disminuint segons les pèrdues de càrrega. En un cas ideal, seria horitzontal ja que tota pèrdua de pressió o velocitat seria completament compensada

A l'apartat 3, s'han calculat les pèrdues de càrrega en diferents punts de treball, ja sigui modificant el cabal o el sentit de circulació i els resultats numèrics ja s'han analitzat. La

representació de les línies de càrrega serà utilitzada no només per entendre millor el seu comportament sinó que servirà per determinar la coherència dels resultats obtinguts.

S'ha seleccionat una de les situacions de convergència com a candidata a ser representada. Així doncs, l'estudi es realitzarà quan la màquina treballa en sentit convergent amb un cabal de $Q=732,151 \text{ dm}^3/\text{h}$. Seguidament es recullen les característiques del seu funcionament, que engloben les pressions i velocitats en cada secció. Les pressions de la següent taula són absolutes. El procediment per obtenir-les consisteix en afegir 1 bar a la pressió relativa mesurada. A més a més, es desglossen les diferents altures energètiques generades per cada paràmetre.

	1	4	5	6
$P_{\text{abs}}(\text{bar})$	2,42	1,25	0,95	0,88
$v \text{ (m/s)}$	0,45	14,00	14,00	0,45
$\frac{p}{\gamma} \text{ (m)}$	24,67	12,74	9,68	8,97
$\frac{v^2}{2g} \text{ (m)}$	0,01	9,99	9,99	0,01
Altura total (m)	24,68	22,73	19,67	8,98

Taula 11. Condicions de pressió i velocitat i cotes piezomètriques

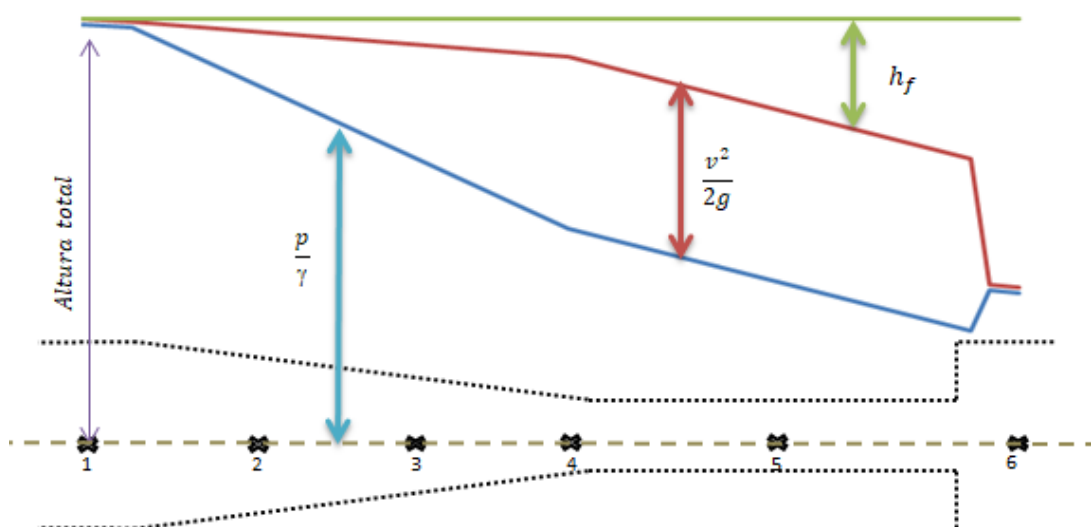


Figura 42. Evolució de les línies de càrrega

La representació de la Figura 42 ajuda a comprendre més profundament els conceptes explicats. Abans de procedir al seu anàlisi, convé ressaltar que les línies són simplificacions del comportament real del fluid. Les mesures han estat preses únicament en 4 punts. Malgrat les cotes en les seccions 1, 4, 5 i 6 són les reals, entremig s'han hagut d'ajustar adequadament i així obtenir representacions suficientment correctes com per a poder extreure conclusions. Finalment, ressaltar el fet que les cotes no estan a escala i s'han disposat de la següent manera per tal de millorar la visualització de les gràfiques. Malgrat això, les diferències entre cotes sí que ho estan.

Les tres línies són la cota piezomètrica, la línia de càrrega i la cota horitzontal d'energia constant. La cota piezomètrica ajuda a comprendre la disminució de la pressió estàtica al llarg del circuit. En el punt 1, la velocitat és molt baixa i la seva aportació és menyspreable respecte l'aportació de la pressió estàtica. La velocitat es manté constant i la pressió disminueix molt lleugerament per les pèrdues de càrrega. Sempre que la velocitat es mantingui constant, les dues línies seran paral·leles.

A mesura que avança el tram cònic, la velocitat va augmentant i, conseqüentment, la pressió disminueix, fenomen traduït en un tram de pendent negatiu de la cota piezomètrica. Per altra banda, la velocitat guanya pes i separa la línia d'energia total de la línia piezomètrica. Les pèrdues de càrrega són lleugerament més grans que en el tram inicial.

Acabat el tram cònic, la velocitat ha arribat al seu valor màxim, valor que es manté al llarg del tram lineal. La fricció disminueix l'energia del sistema progressivament i de forma més pronunciada que en el tram cònic. En altres paraules, les pèrdues de càrrega augmenten notablement al llarg de l'etapa.

Finalment, el canvi de secció brusc fa disminuir la velocitat de forma ràpida fent que el pes de la seva cota sigui gairebé nul. Quant a les pèrdues de càrrega, es confirma que el canvi geomètric produeix una pèrdua d'energia molt considerable. La reducció de velocitat provocarà un augment de la pressió que es tradueix amb una línia piezomètrica amb pendent positiu.

4.3.1. Línies piezomètriques en el banc d'assaig

Fins ara s'han pres mesures de pressió i velocitat a partir de les quals s'han realitzat càlculs i, en el darrer apartat, s'ha simulat el comportament de les seves línies d'energia. S'ha plantejat la possibilitat de representar en el banc d'assaig actual alguna d'aquestes línies de forma directa.

El banc d'assaig disposa d'un seguit de columnes manomètriques per a poder estimar les diferències de pressions entre seccions. El seu funcionament, però, ha estat qüestionat a les conclusions del banc d'assaig (veure apartat 3.6) quan s'ha vist que no es podien determinar

aquestes diferències de pressions en totes les condicions de treball. Per exemple, quan el fluid circula en sentit divergent i les diferències de pressions són massa grans.

Ara bé, malgrat no poder ser utilitzades en aquests casos, podrien ser útils de cara a visualitzar la línia piezomètrica en el mateix banc d'assaig. La representació d'aquesta línia s'ha efectuat amb la mateixa situació de treball en sentit convergent que a l'apartat anterior.

Per tant, al laboratori es situa el venturi en el punt de treball anterior ($Q=732,151 \text{ dm}^3/\text{h}$ i sentit convergent) i es connecten ordenadament els punts 1, 2, i 3 amb les columnes manomètriques del banc. El manòmetre determina la pressió al punt 1 i es calcularan les següents dues pressions a partir de les diferències de cota piezomètriques. Cal destacar que les altures vistes a la Figura 43 no poden ser utilitzades pel càlcul de la pressions en cada punt, és a dir, $P_1/\gamma \neq 356 \text{ mm}$. De fet, una pressió en el punt 1 de 1,42 bar suposaria una alçada de columna de:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h_1 \rightarrow h_1 = \frac{1,42 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 14,5 \text{ m} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Per tant, només serveixen per a determinar diferències de pressió. En disposar de sols 0,5 m d'alçada, les columnes estan connectades a una manxa que aplicarà pressió fins que les columna d'aigua siguin visibles.

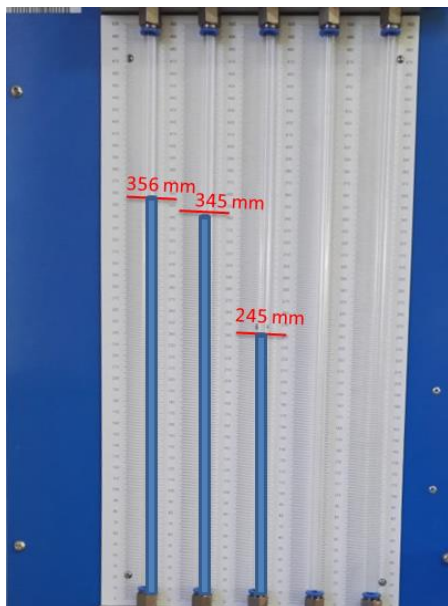


Figura 43. Representació de les columnes manomètriques d'aigua i les diferències d'alçada

Així doncs, un cop coneguda la pressió en el punt 1 i les diferències de cota entre columnes, es poden calcular els valors de les pressions 2 i 3.

$$P_2 = P_1 - \rho \cdot g \cdot \Delta h_{1-2} = 1,4189 \text{ bar} / P_3 = P_1 - \rho \cdot g \cdot \Delta h_{1-3} = 1,4091 \text{ bar} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

En resum, les línies de càrrega solen ser un concepte a vegades complex pels estudiants, si més no de forma teòrica. Les pràctiques universitàries ajuden a contemplar el fenomen estudiat des d'un altre punt de vista. En haver entès el funcionament del venturi i poc a poc haver conegut els motius pels quals la pressió va disminuint al llarg del recorregut, una comparació entre les diferències d'alçada a les columnes juntament amb la visualització de la línia piezomètrica provocarà en la majoria dels casos un millor arrelament del concepte.

4.3.2. Càlcul d'àrees

Una altra aplicació de les cotes piezomètriques és la de la determinació de les àrees 2 i 3 del venturi de forma ràpida. Per la forma geomètrica del venturi, pot ser difícil determinar la secció en punts intermedis.

Aplicant el teorema de conservació de l'energia (considerant les pèrdues de càrrega negligibles com es pot concloure observant la Figura 42) i l'equació de continuïtat, i sent conegut el cabal, es poden determinar les velocitats a cada un dels punts. A partir de les velocitats, s'obtenen els diàmetres del punt 2 i 3.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \\ v = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2} \end{array} \right. \rightarrow \begin{cases} D_2 = 17,82 \text{ mm} \\ D_3 = 12,64 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.22})$$

A l'inici del projecte es van mesurar les distàncies entre tots els punts de mesura (veure Figura 3). Coneixent aquestes longituds i els valors dels diàmetres a l'inici i al final del tram cònic, es poden comprovar els resultats aplicant el Teorema de Tales o mitjançant càlculs trigonomètrics. Els diàmetres calculats són de $D_2=18,4 \text{ mm}$ i $D_3=12,81 \text{ mm}$, força semblants als determinats experimentalment.

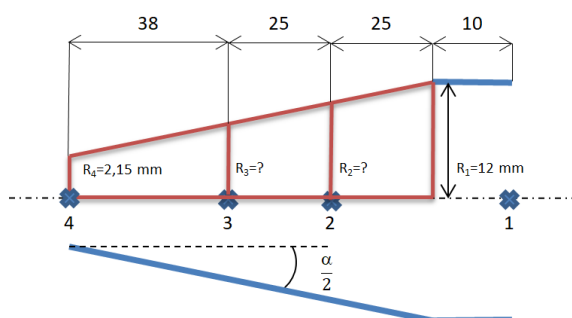


Figura 44. Teorema de Tales per a la determinació dels radis 2 i 3

5. Disseny i condicions d'un nou venturi

El banc d'assaig s'ha analitzat profundament: s'han valorat les seves propietats amb tres metodologies diferents i s'han buscat les seves possibles aplicacions. Malgrat tenir errors, el banc és vàlid per a poder ser utilitzat a l'assignatura de Mecànica de fluids.

Tot i això, es troba interessant el fet de dedicar una secció del treball a valorar quines propietats hauria de complir el disseny del nou venturi per a ser encara més adequat a l'hora de realitzar les pràctiques. En futurs projectes, es podria arribar a construir aquest banc d'assaig ideat i pensat únicament per a la realització de les pràctiques de la universitat.

5.1. Geometria

La geometria del venturi és el principal terme a redissenyar atès que altera els valors de les pèrdues de càrrega, de les velocitats i de les pressions.

Una de les principals característiques del venturi actual és la relació d'àrees tant gran que té, és a dir, el diàmetre exterior difereix molt de l'interior. Aquest fet té els seus avantatges i els seus inconvenients. En primer lloc, la principal virtut d'aquest canvi de seccions brusc és que força al fluid del tub interior a velocitats molt altes. Aquestes velocitats comporten unes depressions molt altes, afavorint fenòmens com la cavitació. Per altra banda, el canvi extrem de seccions crea uns forts deixants just després de les singularitats que malmeten la uniformitat del flux a estudiar.

Per aquest motiu, fóra bo plantejar noves relacions d'àrees que milloressin alguns aspectes del disseny actual. Ara bé, tenint en compte que un dels objectius de les pràctiques és el càlcul de les pèrdues de càrrega, s'hauria de trobar un quocient de seccions que permetés alhora unes pèrdues de càrrega suficientment significatives com per a ser estudiades.

Per exemple, una de les múltiples alternatives de geometries possibles podria ser un venturi amb una relació de diàmetres més baixes que compensés la disminució de pèrdues de càrregues singulars amb l'augment de pèrdues de càrrega lineal. Per a fer-ho, es podria o bé allargar la longitud del tram lineal o bé fabricar les parets del venturi amb un material més rugós que el metacrilat. En aquesta secció s'analitzen ambdós casos.

Els diàmetres actuals del venturi són 24 mm el gran i 4,3 mm el diàmetre petit. S'ha decidit mantenir el diàmetre de 24 mm i s'ha analitzat un primer disseny amb un nou diàmetre petit de 8 mm.

Per tal de demostrar la utilitat dels estudis anteriors, els coeficients de fricció utilitzats

s'estimaran segons les expressions citades a l'anàlisi teòrica. A més a més, es tindrà en compte la corba característica de la bomba.

La corba característica representa l'energia transferida per unitat de pes en funció del cabal. Per tal d'assegurar que la bomba és capaç de proporcionar el cabal suficient per a aquest nou disseny, s'imposarà la corba característica trobada i es determinarà la pressió que hi haurà en el punt 6 en aquestes condicions de treball màxim.

5.1.1. Càlcul de la longitud mínima del tram lineal

Les dimensions conegudes del nou venturi serien les següents:

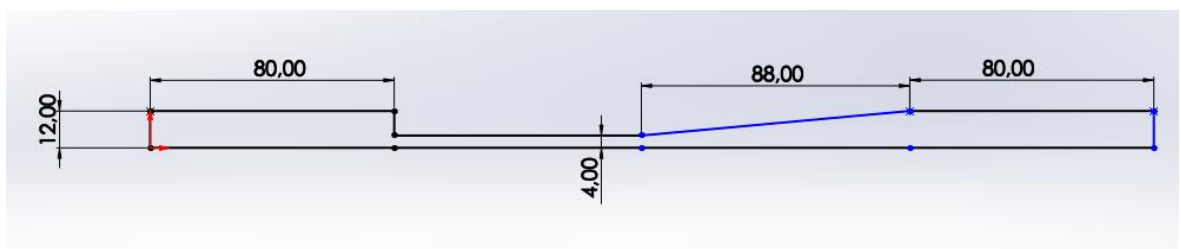


Figura 45. Croquis del predisseny del nou venturi (Longitud del tram lineal desconeguda)

Els diàmetres són coneguts i per tant s'estimen els valors dels coeficients de fricció K_6 i K_{con} . El valor de f es mantindrà amb la seva expressió en funció del nombre de Reynolds (veure apartat 3.2.3.1. i es solucionarà un cop es conegui la velocitat.

$$\left[K_6 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right) \approx 0,45 \right] ; \left[K_{con} \cong \varphi_{\text{élarg}} \cdot \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^2 \approx 0,15 \right] \quad (\text{Eq. 5.23})$$

Per altra banda, s'aproxima el valor de la pressió de sortida a 0 bar relatius. A més a més, es vol que en el nou disseny es pugui cavitat, per això s'ha col·locat en sentit divergent i s'imposarà que la pressió en el punt 4 sigui igual a la pressió de cavitació:

$$[P_1 \sim 0 \text{ bar}] ; [P_4 = P_{\text{cavitació}} \approx -0,97 \text{ bar}] \quad (\text{Eq. 5.24})$$

Per tal d'evitar confusions amb la numeració dels punts estudiats, es torna a adjuntar l'esquema del venturi amb els punts numerats.

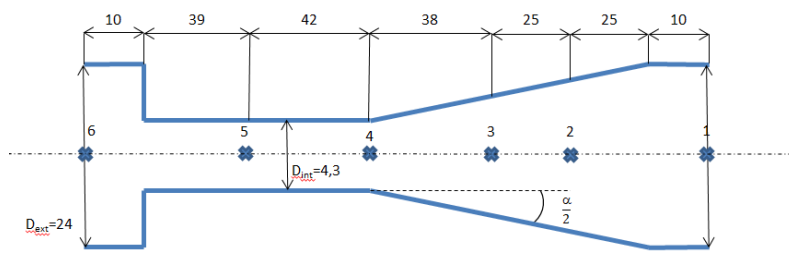


Figura 46. Dimensions del venturi del banc d'assaig (unitats de distància en mm) i numeració dels punts d'estudi

- Bernouilli 4-1:

S'aplica el principi de Bernouilli entre els punts 4 i 1, imposant les condicions de pressió esmentades a l'equació 5.24 i l'equació de la continuïtat. Així, s'obtenen les velocitats del tram de secció petita i gran.

$$\begin{cases} \frac{P_4}{\gamma} + \frac{v_4^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{f4-1} \\ h_{f4-1} = K_{con} \cdot \frac{v_4^2}{2g} \end{cases} \rightarrow (v_4 = 8 \text{ m/s} \mid v_1 = 0,895 \text{ m/s}) \quad (\text{Eq. 5.25})$$

- Corba característica:

A l'apartat 3.3.6. s'ha trobat la H_m de la bomba i s'ha relacionat amb el cabal màxim que es pot proporcionar. Per a trobar la relació entre l'altura manomètrica H_m i les pèrdues de càrrega totals del venturi, s'aplica el principi de Bernouilli en el circuit tancat del sistema, començant i acabant en el mateix punt 0.

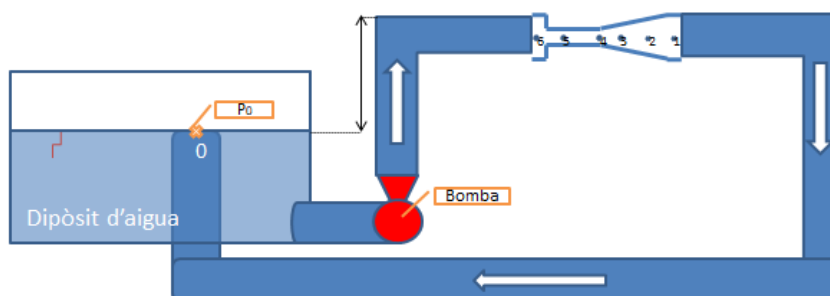


Figura 47. Circuit sencer del muntatge

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} + z_0 + H_m = \frac{P_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} + z_0 + h_{f0-0} \quad (\text{Eq. 5.26})$$

Tots els termes menys H_m i h_f s'eliminen i per tant es pot concloure que l'altura que proporciona la bomba és igual a les pèrdues de càrrega totals en tot el circuit. Tenint en compte que les velocitats a les canonades que connecten el banc hidràulic amb el circuit són molt baixes, es negligeixen totes les pèrdues de càrrega dels elements auxiliars. Així doncs, la pèrdua de càrrega total del banc d'assaig es simplifica a les pèrdues de càrrega en el venturi.

$$h_{f6-1} = H_m = -10^{-6}Q^2 + 0,0015Q + 17,34 \quad (\text{Eq. 5.27})$$

- Bernoulli 6-1:

Tornant al sistema venturi, ara s'aplica el teorema de Bernoulli entre els punts 6-1, on P_6 és desconeguda, les velocitats 1 i 6 són iguals i conegudes i la pressió 1 ronda els 0 bar. Per tant, s'igualava el terme de pressió 6 a les pèrdues de càrrega totals, que s'ha demostrat com són iguals a l'altura que proporciona la bomba.

$$\begin{cases} \frac{P_6}{\gamma} + \frac{v_6^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{f6-1} \\ h_{f6-1} = -10^{-6}Q^2 + 0,0015Q + 17,34 \end{cases} \rightarrow P_6 = 1,71 \text{ bar} \quad (\text{Eq. 5.28})$$

- Bernoulli 6-4:

Finalment, es fa el mateix entre els punts 6 i 4. La pressió 6 acaba de ser determinada, les velocitats es coneixen, el coeficient de fricció lineal depèn de la velocitat i per tant és conegut i la pressió 4 és la pressió de vapor. El terme de pèrdues de càrrega només té com a incògnita la longitud del tram lineal L .

$$\begin{cases} \frac{P_6}{\gamma} + \frac{v_6^2}{2g} = \frac{P_4}{\gamma} + \frac{v_4^2}{2g} + h_{f6-4} \\ h_{f6-4} = f_{lin} \frac{L}{D_{petit}} \frac{v_4^2}{2g} + K_6 \frac{v_4^2}{2g} \end{cases} \rightarrow L_{min} = 351,75 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 5.29})$$

En conclusió, les pèrdues de càrrega singular que s'han perdut en augmentar l'àrea petita han de ser compensades amb un augment de les pèrdues de càrrega singular. La longitud que abans era de 81 mm hauria de valdre 351,75 mm per a complir amb les condicions imposades.

El nou cabal de funcionament seria de 2931,48 dm³/h, molt més apropiat per a l'escala del cabalímetre que arriba fins als 6000 dm³/h.

5.1.2. Càlcul del coeficient de fricció mínim

En el cas de voler mantenir les dimensions longitudinals del venturi i amb la mateixa relació d'àrees que en el primer disseny (24 mm i 8 mm els dos diàmetres), es podria determinar el valor de f necessari per a compensar les pèrdues de càrrega singulars perdudes.

En apartats anteriors, el coeficient de fricció f_{lin} s'havia determinat a partir de l'expressió $f_{lin} = \frac{0,3164}{\sqrt{Re}}$. Aquesta expressió és vàlida considerant la hipòtesi de parets llises. No obstant, es pot determinar el valor de f real seguint els mateixos passos que en l'apartat 5.1.1. En fer l'últim Bernouilli, de 6-4, la incògnita passa a ser f en comptes de L .

$$f_{lin} = 0,07 \tag{Eq. 5.30}$$

Evidentment, el valor del coeficient de fricció lineal és major que el determinat en les anàlisis anteriors. El diagrama de Moody permet determinar el valor d'un coeficient de fricció a partir de la rugositat relativa del material i del nombre de Reynolds.

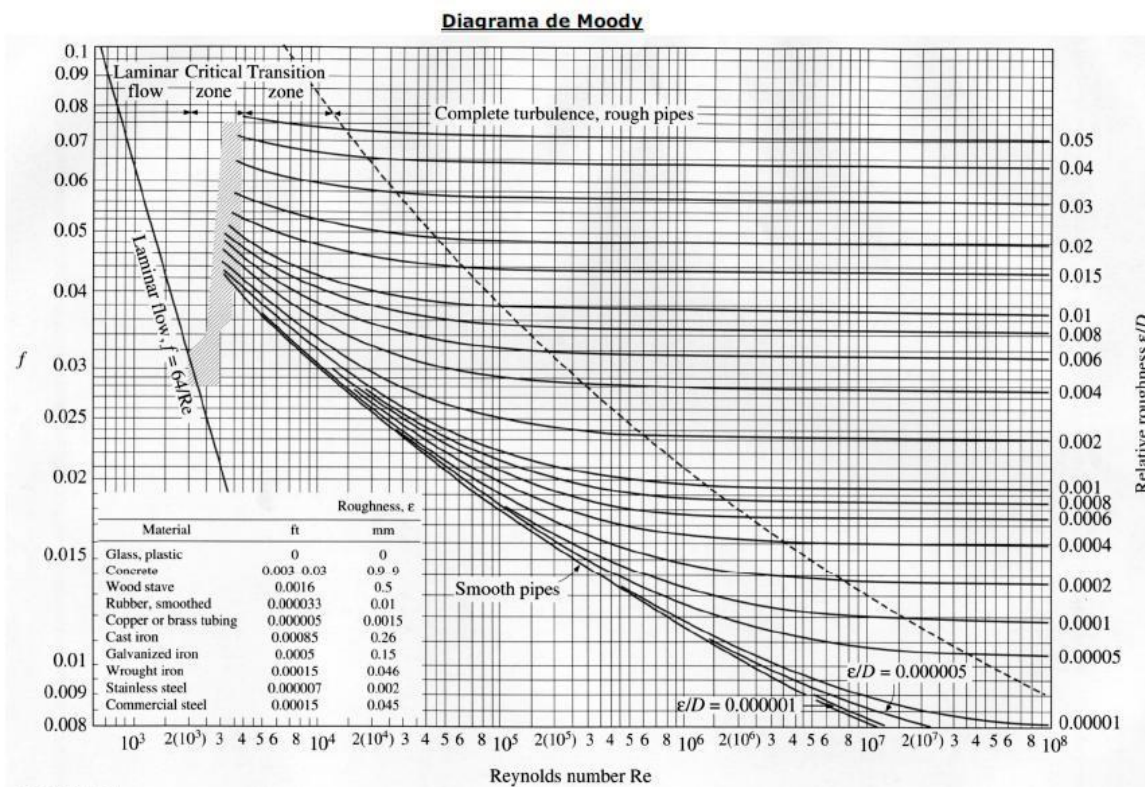


Figura 48. Diagrama de Moody (Font: [4])

$$\begin{cases} f_{lin} = 0,07 \\ Re \approx 1,5 \cdot 10^5 \end{cases} \rightarrow \frac{\varepsilon}{D} = 0,045 \rightarrow \varepsilon = 0,36 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 5.31})$$

Per tant, una segona proposta de nou disseny seria mantenir les dimensions de l'original però augmentar la fricció amb un nou material. La Figura 48 ofereix una taula on es veuen alguns materials amb les seves rugositats absolutes. El valor trobat de rugositat s'aproxima al comportament que té el formigó. Lògicament, s'està fent un predisseny d'un nou venturi. En fer el disseny complet s'hauria d'analitzar la viabilitat de realitzar les dues propostes, tenint en compte el pes, el cost del material i els avantatges i inconvenients de cada un. Rugositats d'aquest valor es podrien provar d'obtenir amb acabats de la mecanització del forat amb menor qualitat.

5.1.3. Augment de la secció petita mantenint les altres dimensions

Per últim, cal esmentar una alternativa més senzilla que les altres, ja que no requeriria la construcció d'un nou venturi sinó solament la mecanització de l'actual. El nou disseny consisteix en mantenir totes les dimensions i el material excepte el diàmetre interior. Aquest pot ser mecanitzat fàcilment amb l'ajuda d'un trepant.

Totes les dimensions es mantenen excepte el diàmetre petit que augmentarà. Sigui quin sigui el diàmetre escollit, les pèrdues de càrrega totals seran menors per a cada una de les situacions analitzades en l'estudi experimental. Segons el que dicta la corba característica, en tenir menors pèrdues de càrrega totals, el cabal podrà assolir valors més alts. El cabalímetre del banc d'assaig té una escala que arriba als 6000 dm³/h i fins ara només s'havia treballat amb cabals al voltant dels 1000 dm³/h. Aquest disseny permetria incrementar el rang de treball per a adequar-lo als aparells de mesura com ara el cabalímetre.

5.2. Localització dels punts de mesura

El venturi adquirit a l'empresa Edibon disposa de 6 capil·lars que foraden la carcassa exterior i permeten la mesura de pressions quan es connecten a un manòmetre o un vacuòmetre. La seva localització i presència s'ha qüestionat al llarg del treball i, en algunes ocasions s'ha demostrat com s'havien distribuït de forma equívoca.

El cas més alarmant és el dels capil·lars extrems, situats tots dos en el tram de diàmetre gran i a 10 mm de la unió amb les connexions amb el banc hidràulic. En fer la simulació s'ha conclòs que no estaven suficientment separats de les singularitats i per tant mesuraven en zones on la distribució de velocitats no és uniforme.

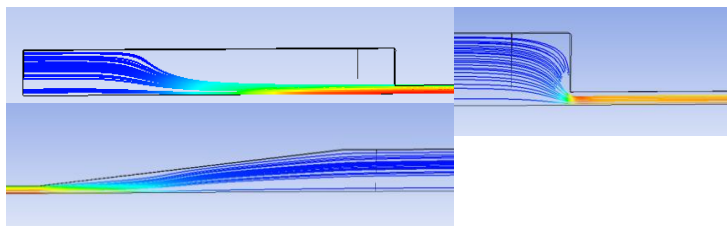


Figura 49. Localitzacions inadequades dels capil·lars (Punt 1 a la imatge superior i punt 6 a la inferior).

A fi d'assegurar la uniformitat del flux, el punt 6 de mesura de pressions s'hauria de col·locar a una distància mínima de 80 mm del canvi de secció brusca. Moure el punt 1 uns 10 mm més lluny de la singularitat ja asseguraria una millor distribució de velocitats del les partícules del fluid.

Els forats, a part d'estar situats en regions inadequades són a vegades innecessaris. En concret, la utilitat dels punts 2 i 3 del tram cònic s'ha posat en dubte. En el procés de determinació de pèrdues de càrrega i dels seus coeficients cap dels dos punts s'usa. És més, les pressions en aquestes seccions són molt semblants, tal i com s'ha demostrat a l'apartat 4.3.1. En aquest apartat, on s'estudiava la línia piezomètrica, s'ha contemplat la seva única funcionalitat en tot el treball.

En la majoria dels casos, els punts 2 i 3 no són usats i de ben segur que afegeixen petites singularitats completament prescindibles. Així doncs, la seva eliminació podria ser contemplada en futurs dissenys, assegurant així també una millor estanqueïtat pel fet d'haver menys cavitats en el venturi.

5.2.1. Condicions de cavitació

A l'apartat 4.1 s'ha explicat i analitzat el fenomen de cavitació en el venturi. Les conclusions han estat positives, doncs realment s'ha conclòs que el fenomen observat és cavitació. Nogensmenys, s'ha deixat cert marge de dubte que pot ser eliminat en futurs treballs. De totes maneres, en dissenyar el nou venturi es podrien eliminar incerteses plantejades, com és el cas de possibles escolaments de partícules d'aire que s'escolen i que poden ser confoses per vapor d'aigua. Eliminant tots els capil·lars excepte el del punt d'entrada en sentit divergent (Punt 6), on sempre hi haurà pressió positiva, es podria operar de la mateixa manera sense la incertesa produïda pels forats atès que la paret del venturi es trobaria completament coberta per metacrilat. Si bé és cert que no es podria determinar la pressió de cavitació de forma directa, aquest treball ha analitzat els coeficients de pèrdua de càrrega en les diferents geometries. Així doncs, coneixent la pressió del punt 6 a partir de l'únic capil·lar restant en el venturi es podria aproximar el valor de la pressió en el punt 4 on es produeix el fenomen.

5.3. Aparells de mesura

A l'anàlisi de sensibilitat i al posterior calibratge del cabalímetre s'introdueix la necessitat d'obtenir un cabalímetre més precís. En cas de mantenir l'actual cabalímetre, es pot afegir un coeficient corrector del cabal. En veure que la desviació dels cabals tendeix a ser d'un 14% a la baixa, es poden multiplicar els cabals per 0,86 per a l'obtenció de resultats més correctes.

Els altres aparells de mesura també han d'estar més ben adaptats a les condicions de treball del venturi. Per exemple, les columnes manomètriques per a mesurar diferències de pressions són quasi bé inservibles en tot el treball. Les cotes manomètriques quan el fluid és un líquid com l'aigua són molt grans i no es pot esperar que totes les pressions, sobretot en la situació de divergència, puguin ésser definides a partir de les columnes. Dit això, hi ha punts de treball a la zona de convergència on el punt 4 situat al final del tram cònic pren pressions positives però força més baixes que en els punts 1, 2 i 3. L'alçada mínima que haurien de tenir les columnes per a la possible visualització de les cotes de tots 4 punts alhora es calcula de la següent manera (s'ha escollit el punt de treball del sentit convergent amb menor diferència de pressions, que és $Q=538,792 \text{ dm}^3/\text{h}$).

$$[P_1 = 0,8 \text{ bar}]; [P_4 = 0,12 \text{ bar}] \rightarrow \Delta h_{1-4} = \frac{P_1 - P_4}{1000 \cdot 9,81} = 6,93 \text{ m} \quad (\text{Eq. 5.32})$$

Amb la geometria actual, l'alçada de les columnes hauria de ser molt elevada i seria poc pràctica la visualització de les cotes. En nous dissenys com el proposat en apartats anteriors, la relació d'àrees seria més petita. Així, les variacions de pressió entre els punts 1-4 disminuirien, arribant a una alçada de columnes més baixa. Una altra solució és la incorporació de columnes d'un altre fluid, com és el cas de mercuri, que necessitessin assolir una menor alçada en les mateixes condicions de pressió. Tanmateix, s'haurien d'analitzar el cost econòmic i l'impacte ambiental d'aquesta opció.

6. Finalitats docents

Per finalitzar el projecte i concloure tots els objectius proposats a la introducció del treball, aquesta secció contempla la preparació d'un guió de pràctiques per a l'alumnat de l'assignatura de Mecànica de Fluids.

L'estructura de la pràctica està dividida en tres grans blocs, així com ho ha estat l'anàlisi del banc d'assaig en el treball. Els tres blocs estan formats per:

1. Anàlisi teòrica del venturi (preparació no presencial)
2. Simulació amb Ansys (preparació no presencial)
3. Anàlisi experimental (Laboratori)

6.1. Teoria

La proposta és que els estudiants comencin la pràctica amb una petita preparació teòrica que hauran de portar preparada de casa. Es farà un breu recordatori dels diferents conceptes (pèrdua de càrrega, principi de Bernoulli o cavitació) que cal haver entès per aprofitar al màxim l'experiència. Després es farà una descripció del muntatge i es recolliran les expressions dels coeficients teòrics. La preparació de la pràctica finalitza amb un senzill exercici on s'indicaran unes condicions de treball determinades i l'estudiant haurà d'aplicar les expressions dels coeficients juntament amb el principi de Bernoulli per a determinar les incògnites. S'estima que el temps necessari per a la realització del primer bloc sigui de no més de 20 minuts.

6.2. Simulació

En segon lloc i un cop s'hagi realitzat l'anàlisi teòrica, els alumnes hauran de realitzar una simulació amb Ansys. Aquesta simulació persegueix dues grans metes. En primer lloc, es vol que l'alumne tingui una millor noció sobre el comportament del fluid en el venturi abans de realitzar l'experiment. La simulació juntament amb la preparació teòrica formaran a l'estudiant de tal manera que l'experiència sigui molt més productiva. En segon lloc, es vol introduir a l'estudiant al món dels "Computational Fluid Dynamics (CFD)". Amb altres paraules, en base a una petita simulació l'estudiant es familiaritzarà amb l'anàlisi a partir d'elements finits, que molt possiblement haurà d'aplicar en estudis o situacions laborals posteriors.

El guió de la pràctica contindrà la seqüència de passos que l'alumnat haurà de seguir per tal d'obtenir la simulació final. La geometria i la malla ja estaran convenientment definides i

importades. Per tant, l'alumne disposarà del fitxer de "Fluent" amb el mallat creat. A partir d'aquí, s'aniran aplicant les condicions necessàries per a la inicialització de la simulació, on es definiran paràmetres com el material, les condicions de contorn o el tipus d'anàlisi que es farà. Així mateix, s'indicarà el nombre d'iteracions a efectuar que es seleccionarà de tal manera que es compleixin els criteris de convergència de la solució però que alhora, el temps de càlcul total sigui el menor possible. Finalment, es visualitzaran els resultats i es farà una petita anàlisi dels mateixos. L'alumne haurà de presentar el dia de la pràctica un petit document per verificar la comprensió de la simulació. En un global, s'espera que el temps emprat en aquesta simulació sigui d'uns 20 minuts.

6.3. Experiment

En últim lloc, els alumnes seran citats al laboratori de Mecànica de Fluids de l'ETSEIB (UPC), situat a la primera planta del pavelló D. Per tal de cohesionar la nova pràctica amb les vigents pràctiques de l'assignatura, es pot incloure en un dels tres dies en què es realitzen les actuals. Aquest fet també ve condicionat pel nombre màxim de persones que pot realitzar l'experiència de forma simultània, que no pot sobrepassar les 4. Així, els alumnes es distribuïran adequadament en els diferents exercicis de forma cíclica.

L'experiència es dividirà en dos estudis, un de quantitatiu i un de qualitatiu. En el primer, es començarà col·locant el venturi en sentit divergent, s'encendrà el muntatge i s'arribarà al punt de treball demanat. Es prendran les mesures de pressió de diversos punts utilitzant el manòmetre i el vacuòmetre. A partir d'aquestes mesures es poden calcular els coeficients de fricció i de singularitat, que es compararan amb els teòrics determinats a la preparació de la pràctica. Cal destacar que el dia de la pràctica s'espera que el banc d'assaig incorpori un seguit de vàlvules per a poder connectar el vacuòmetre en els diferents punts de pressió negativa sense haver de separar cap tub dels forats.

D'altra banda, s'observaran les aplicacions del banc d'assaig explicades a l'apartat 4 de forma qualitativa. En primer lloc, s'obrirà al màxim la bomba arribant al cabal màxim possible, punt on s'assegura l'aparició de cavitació. Els alumnes hauran de mesurar la pressió en la secció on apareix el fenomen i se'ls hi demanarà una petita reflexió. La segona aplicació a ensenyar serà la del buidatge d'un dipòsit. Per a fer-ho, s'haurà d'omplir prèviament el dipòsit cilíndric 1 i es connectaran les sortides del dipòsit 2 al dipòsit 1 i al punt 4 del venturi, on hi haurà una forta depressió. El fluid serà ràpidament aspirat i els alumnes entendran com un gradient de pressions negatiu pot arribar a impulsar el fluid d'un dipòsit a l'altre.

No s'invertirà el sentit de circulació per motius pràctics, atès que el desgast del venturi seria important. A més a més, s'eviten situacions de venturis mal muntats que poden donar lloc a

fuites d'aigua no desitjades.

6.4. Guió de pràctiques

Seguint els criteris establerts en les unitats anteriors, es pot trobar una proposta de guió de pràctiques a l'Annex 1. L'autor ha pres com a mostra d'un manual de pràctiques de l'escola el de l'assignatura d'electrònica. ^[8]

7. Conclusions

A l'inici del treball es va explicar com el banc d'assaig a estudiar requeria d'un procés de calibratge atès que els resultats obtinguts no eren coherents amb els teòrics. Així doncs, es va plantejar realitzar el seu estudi amb tres tipus de metodologies diferents que oferien una millor contrastació dels resultats. Tots tres mètodes d'anàlisi es van poder dur a terme de manera satisfactòria. Així doncs, s'ha complert l'objectiu principal de calibrar i preparar la posta en marxa del muntatge per a les finalitats docents de l'assignatura.

La mala dimensió dels diàmetres del venturi i la inexactitud eren els causants de les incoherències entre els resultats experimentals i teòrics que van comportar la iniciació d'aquest projecte. El cabal real era menor del llegit, concretament un 14 % menor de mitjana. En el recull de resultats, el cabal de totes les situacions estudiades s'ha obtingut de forma manual, tal i com s'explica a l'apartat 3.3.2. No obstant això, aquest mètode és poc pràctic si es consideren les finalitats docents d'aquest projecte, on l'estudiant haurà d'obtenir valors de cabal de forma ràpida. Sortosament, la desviació del cabalímetre és constant i per tant es va concloure aplicar un factor corrector de 0,86 a totes les lectures del cabalímetre. El departament de Mecànica de Fluids és qui haurà de considerar si adquireix un cabalímetre més precís.

La comparativa entre els tres mètodes un cop corregits els valors del cabal ha estat un èxit. Els tres valors són en tots els casos semblants i en l'apartat 3.6, on s'han realitzat les conclusions del banc d'assaig, ja s'han estimat els seus valors mitjans.

A banda de la comparativa de resultats amb els altres dos mètodes, les simulacions han estat clau a l'hora de detectar el mal disseny de les localitzacions dels forats de mesura d'entrada i de sortida del venturi. Gràcies a les línies de corrent s'ha comprovat com els actuals capil·lars 1 i 6 mesuren en zones de deixant, on el flux no es troba completament desenvolupat.

Finalitzat l'estudi del banc d'assaig, s'han buscat les seves aplicacions on s'ha comprovat la presència de cavitació a l'interior del conducte, s'ha analitzat la funció d'ompliment i buidatge dipòsits a partir de fortes depressions i s'han representat les seves línies energètiques.

Pel que fa al disseny del nou venturi, s'han proposat tres possibles alternatives al disseny actual. Totes contemplaven un augment del diàmetre petit de l'element mantenint el diàmetre de la secció d'entrada i sortida. A les dues primeres propostes s'ha pogut demostrar com es poden determinar els nous paràmetres tals com la longitud del tram recte o el coeficient de fricció per tal de complir una condició imposada. En aquell cas, es va decidir mantenir la condició de cavitació. El tercer cas és el més senzill de tots i no

contempla la construcció d'un nou venturi sinó que requereix simplement d'un mecanitzat del forat interior. Malgrat no s'assegura el manteniment de totes les aplicacions que comprenia el venturi actual, la disminució de les pèrdues de càrrega totals permetrà treballar en un rang de cabals més gran i més adequat pel cabalímetre del banc d'assaig.

Cal ressaltar el fet que tots ells són primers dissenys que donen una primera noció de les possibles millores que es poden incorporar. Es deixa oberta la possibilitat de prosseguir el disseny complert del nou venturi en futurs projectes, on es podria plantejar la seva construcció definitiva.

Pel que fa a les finalitats docents del treball, s'ha aconseguit calibrar i adaptar el banc d'assaig actual per a la implementació d'una pràctica. Posteriorment, s'han descrit els conceptes i l'estructura que haurà de tenir dita experiència, completant així tots els objectius proposats a la introducció del treball. A més a més, no només s'ha creat l'estructura que hauria de tenir la pràctica sinó que s'ha adjuntat un de guió complet d'una pràctica que recull tots els conceptes analitzats en el treball.

8. Planificació i pressupost

A continuació es mostra el Diagrama de Gantt del projecte, on es representa la distribució d'hores dels diferents apartats del treball en el calendari establert. Destaquen la gran quantitat d'hores que s'han emprat per a l'anàlisi experimental i el correcte calibratge del banc d'assaig. Alhora, mostra com les simulacions necessiten un temps molt gran per tal de ser realitzades de forma correcta, sobretot en el procés d'afinament del mallat.

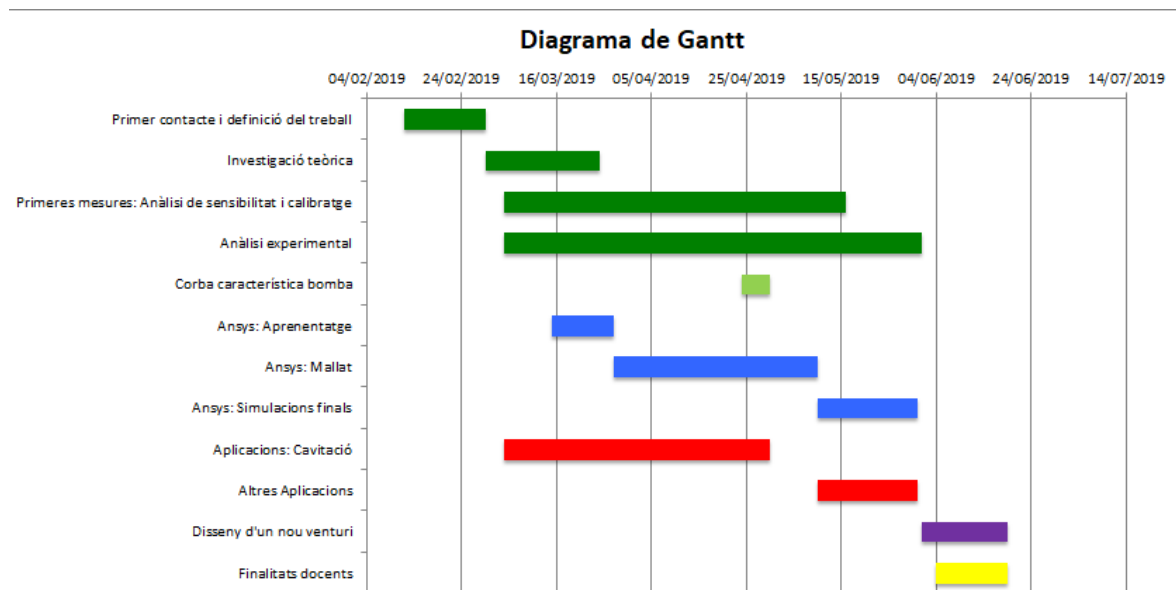


Figura 50. Diagrama de Gantt del projecte

A partir d'aquest diagrama es pot fer un recull de les hores de treball totals, dividides en les diferents seccions.

	Hores
Definició del treball (primeres tutories i introducció del treball)	12 h
Investigació teòrica	30 h
Anàlisi experimental	70 h
Simulacions	100 h
Aplicacions del treball	20 h

Disseny d'un nou venturi	20 h
Finalitats docents	20 h
Conclusions	8 h
Total	280 h

Taula 12. Hores dedicades en el projecte

A la Taula 12 s'observa com la secció on l'autor hi ha dedicat més hores és la simulació. Aquest fet és causat per diversos motius: en primer lloc, hi ha hagut un procés d'aprenentatge del programa que contemplava conceptes tan necessaris com la creació d'un bon mallat o la implementació de les solucions, entre d'altres. A més a més, en augmentar la qualitat dels mallats en el procés de refinament augmentava el temps de generació de la malla i de simulació. El temps emprat en les simulacions depèn també de l'ordinador on s'hagin realitzat, que en aquest treball es tracta d'un portàtil de 12 GB de memòria RAM. Òbviament, ordinadors més potents disminuirien aquest temps. Tot i això, vistos els resultats es conclou que el temps dedicat en les simulacions ha estat profitós i molt útil per a les conclusions del mateix treball.

Un cop s'ha fet el desglossament de totes les hores dedicades, es pot procedir al càlcul del pressupost. El pressupost no inclou el cost del banc d'assaig ja que va ser adquirit pel departament abans d'iniciar el projecte. Aproximadament, el departament de Mecànica de Fluids va fer una inversió que ronda els 5000 € per a la compra d'aquest muntatge.

En canvi, el pressupost sí que valorarà el sou mitjà que hauria cobrat un enginyer júnior si hagués realitzat el treball en una empresa, un càlcul aproximat del cost de l'aigua i de l'energia i el preu de les llicències dels programes utilitzats.

El sou de l'enginyer es calcula considerant un salari mig de l'enginyer júnior espanyol de 9 €/h, tenint en compte les hores totals dedicades. El consum d'aigua ha estat mínim, doncs el circuit és tancat i tota l'aigua que entra al banc d'assaig torna al dipòsit inicial. Per tant, es té en compte el volum d'aigua necessari per omplir el dipòsit, que és de 140 dm³. L'energia gastada en el treball es separa en diferents parts. La potència de l'enllumenat d'una sala ronda els 0,24 kW i el consum mitjà d'un ordinador és de 0,01 kW. En totes les hores de treball s'ha fet ús d'ambdós termes. En el cas particular del treball de laboratori, es suma als dos consums esmentats el de la potència de la bomba del banc d'assaig. El fabricant Edibon especifica al seu catàleg web que la bomba centrífuga emprada té una potència màxima de 0,37 kW i es farà l'estimació del consum energètic a partir d'aquest valor.

Les llicències del software requerit per les simulacions és molt elevada. En el cas d'Ansys, el

preu d'una sola llicència anual és de 26.400 € mentre que la de SolidWorks és de 3400 €/any. Tanmateix, la universitat concedeix als seus estudiants llicències d'ambdós programaris.

	Variable	Cost relatiu	Cost total
Salari Enginyer	280 h	9 €/h	2520,00 €
Consum d'aigua	140 dm ³	2,69 €/m ³	0,38 €
Consum energètic (llum de la sala+ordinador)	(0,01 kW+0,24 kW)·280 h	0,15 €/kWh	10,50 €
Consum energètic (Laboratori)	(0,01 kW+0,24 kW+0,37 kW)·70 h	0,15 €/kWh	6,51 €
Llicència Ansys	100 h	26400 €/any	301,37 €
Llicència SolidWorks	100 h	3400 €/any	38,81 €
			2877,57 €

Taula 13. Pressupost total del projecte

9. Impacte ambiental

L'impacte ambiental que produeix aquest projecte pot semblar gran sobretot per les grans quantitats d'aigua que es fan circular. No obstant, l'aigua és recirculada i reaprofitada en tot moment i per tant el consum és mínim. En el cas del calibratge del cabalímetre, on es connectava la sortida del circuit en un dipòsit volumètric separat, l'aigua es tornava a abocar dins del dispositiu d'alimentació hidràulica en finalitzar el procés. Així és que el consum d'aigua en tot el projecte és de 140 dm^3 , que és el volum del banc hidràulic.

Quant a l'energia consumida en el treball, en l'apartat de pressupost s'ha estudiat el nombre total de kWh gastats al llarg del treball. Únicament s'han valorat els consums de l'enllumenat de la sala, de l'ordinador i de la bomba centrífuga del banc d'assaig. S'han omès consums tals com els ocasionats pel transport, en part perquè el laboratori està dins l'escola i la mobilització havia de ser mínima.

$$\text{Consum energètic} = 0,25 \text{ kW} \cdot 280 \text{ h} + 0,62 \text{ kW} \cdot 70 \text{ h} = 113,15 \text{ kWh} = \mathbf{43,66 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}} \text{ (Eq. 9.33)}$$

El projecte es centra en l'estudi de les pèrdues de càrrega i les seves característiques en diferents geometries. Per tant, s'està formant als estudiants a comprendre el fenomen d'aquestes pèrdues d'energia per tal que, en un futur, els enginyers de l'ETSEIB dominin el funcionament de les pèrdues de càrrega i siguin capaços de reduir els consums energètics i augmentar els rendiments dels mecanismes amb els quals treballin.

10. Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] I. E. IDEL'CIK, *Memento des Pertes de Charge*, Eyrolles, Paris, França: 1969
- [2] ALEGRET, E., *Obtención de modelos matemáticos para los coeficientes de pérdidas de carga en accesorios hidráulicos*, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba: 2012
- [3] BOSSER. J, ETSEIB, *Vademécum de mecànica de fluidos y màquines hidráulicas: tablas y gráficos para las estimacions más frecuentes*, Barcelona, Espanya: 1989
- [4] ANSYS Academic, release 16.0 – ©SAS IP Inc, *Fluid Flow and Heat Transfer in a Mixing Tee*, 2015
- [5] QUINGA, S., *Modelación y Simulación de Cavitación no Inercial Acústica en Fluidos*, UNIR, Logroño, Espanya: 2019
- [6] Martines, E., *Cálculo de la Temperatura de Punto de Rocío a Diferentes Valores de Presión*, Centro Nacional de Metrología
- [7] EUITA, *Hidrodinámica. Generalidades*. Ciudad Real, Espanya
- [8] GONZÁLEZ, M., *Diagrama de Moody*, <https://fisica.laguia2000.com/complementos-matematicos/diagrama-de-moody>: 2011
- [9] BUSQUETS, S. et al., *Manual de pràctiques d'electrònica*, ETSEIB, Barcelona, Espanya: 2019

Bibliografia complementària

ALBERRO. G, et al., *Ábacos y cuadros*, Creative Commons, Gipuzkoa, Espanya

NIETO, A. *Pérdida de carga y eficiencia energética*, <https://www.mundohvacr.com.mx/2012/07/perdida-de-carga-y-eficiencia-energetica/>

IÑIGUEZ, M. et al., *Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional*, Scielo Tecnologías y Ciencias del agua, Vol. 6: 2015

YOUTUBE, *CFD Analysis of Laminar flow in 3D Circular Pipe*,
<https://www.youtube.com/watch?v=MSD1ygGDtL0&t=304s>: 2017

YOUTUBE, *Ansys Mesher – Intro to 2D meshing*,
<https://www.youtube.com/watch?v=CuKHDLOrnlis>: 2013

YOUTUBE, *Ansys Fluent Tutorial: Sudden Contraction with Variations in Outlet Boundary condition*, <https://www.youtube.com/watch?v=EMgjlsydP18>: 2017

YOUTUBE, *Axisymmetric CFD model*, <https://www.youtube.com/watch?v=1Ze07gz-1Bc>:
2018

