

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

### **Disseny d'una guia ràpida d'ANSYS Fluent per l'assignatura de Termodinàmica. Casos pràctics**

#### **MEMÒRIA**

**Autor:** Xavier Espeja Franques

**Director:** Rafael Ruiz Mansilla

**Convocatòria:** Juny 2021



**Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**





## Resum

L'objectiu principal d'aquest projecte era l'elaboració d'una guia ràpida d'ANSYS Fluent per a estudiants de l'assignatura de Termodinàmica impartida a l'ETSEIB durant el Q7. Per poder realitzar dita guia, s'han seguit una sèrie de passos per donar-li rigor i veracitat.

En primer lloc, en la memòria, s'han exposat els dos casos d'estudi dels quals després s'ha fet la guia per a futurs estudiants. La metodologia que s'ha seguit ha sigut la mateixa per ambdós casos: plantejament d'un problema senzill propi de l'assignatura; en segon lloc el seu càlcul analític; després la simulació amb el software en qüestió; i, finalment, la comprovació dels dos resultats per veure si coincidien i d'aquesta manera donar per bona la simulació.

El primer cas d'estudi que s'ha treballat ha sigut l'estudi de les capes límits tèrmiques i hidrodinàmiques sobre una placa plana a diferents velocitats. El principal objectiu d'aquest cas era veure l'evolució de la capa límit en funció de diferents velocitats. Per a comprovar que la simulació, i en conseqüència la guia, eren correctes, s'ha contrastat el valor de la calor obtinguda a l'ANSYS amb el que es correspondria teòricament a aquella velocitat. Al comprovar que els valors eren pràcticament els mateixos (variacions menors al 4%) s'ha donat per bo l'estudi i la primera part de la guia relacionada amb aquest cas.

El segon s'ha basat en l'estudi d'un bescanviador de calor (1,1) a contracorrent. Aquí el que es buscava era poder arribar plasmar de manera gràfica els comportaments teòrics vistos a l'assignatura. S'han extret gràfics de l'evolució de la temperatura dels fluids en diferents plans, s'ha calculat també la temperatura final dels dos fluids... Per donar-li veracitat, com en el cas anterior, s'ha fet un càlcul analític previ per trobar les temperatures finals. Finalment s'han contrastat els valors i s'ha vist que les variacions entre els valors de la simulació i els teòrics eren menors al 1%.

Finalment, al veure que les dues simulacions eren correctes, s'ha elaborat una guia per als futurs estudiants de l'assignatura.

# Sumari

<b>Resum</b> .....	<b>3</b>
<b>Sumari</b> .....	<b>4</b>
<i>Índex de figures</i> .....	6
<i>Índex de taules</i> .....	7
<b>1. Prefaci</b> .....	<b>8</b>
1.1. <i>Origen del projecte i motivació</i> .....	8
1.2. <i>Requeriments i coneixements previs</i> .....	8
<b>2. Introducció</b> .....	<b>10</b>
2.1. <i>Objectius</i> .....	10
2.2. <i>Abast del projecte</i> .....	10
<b>3. Marc teòric</b> .....	<b>11</b>
3.1. <i>Fluxos externs</i> .....	11
3.1.1. Nombre de Reynolds i nombre de Prandtl .....	11
3.1.2. Capa límit hidrodinàmica o de velocitat .....	12
3.1.3. Capa límit tèrmica.....	13
3.2. <i>Fluxos interns. Teoria de conductes</i> .....	14
3.2.1. Característiques geomètriques.....	14
3.2.2. Longitud d'entrada hidrodinàmica .....	15
3.2.3. Longitud d'entrada tèrmica .....	16
3.2.4. Coeficient de fricció promig (0-L).....	16
3.2.5. Nombre de Nusselt .....	17
3.2.6. Coeficient de convecció .....	18
3.2.7. Coeficient de transferència global .....	18
3.3. <i>Introducció als bescanviadors de calor</i> .....	19
3.3.1. Metodologia de càlcul .....	20
3.3.2. Mètode MLDT .....	20
3.3.3. Mètode $\epsilon$ – NTU .....	21
3.3.4. Mètode PRN.....	22
3.4. <i>CFD: mètode de càlcul i característiques del mètode</i> .....	22
3.4.1. Característiques i usos més habituals .....	22

3.4.2. Història, camps d'aplicació i avantatges del CFD.....	23
3.4.3. Equacions de Navier-Stokes.....	24
3.4.4. Introducció als mètodes numèrics.....	25
<b>4. Estudi de casos pràctics.....</b>	<b>26</b>
4.1. Cas 1: Capes límits en placa isoterma .....	26
4.1.1. Càlcul analític .....	27
4.1.2. Càlcul amb ANSYS Fluent .....	28
4.2. Cas 2: Bescanviador (1,1) amb fluids a contracorrent .....	30
4.2.1. Càlcul analític .....	31
4.2.2. Càlcul amb ANSYS Fluent .....	36
<b>5. Planificació temporal .....</b>	<b>43</b>
<b>6. Impacte ambiental i cost econòmic.....</b>	<b>44</b>
<b>7. Conclusions .....</b>	<b>45</b>
<b>Agraïments .....</b>	<b>46</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>46</b>
<b>Annex .....</b>	<b>47</b>
<i>Guia ràpida d'ANSYS Fluent .....</i>	<i>47</i>
<i>Recull de captures de les capes límits i de les calors intercanviades en el cas d'estudi 1 .....</i>	<i>47</i>

## Índex de figures

Figura 1: Fórmula del nombre de Reynolds .....	11
Figura 2: Fórmula del nombre de Prandtl.....	12
Figura 3: Aspecte de la capa límit hidrodinàmica. ....	13
Figura 4: Esquematzació de la capa límit tèrmica.....	14
Figura 5: Longitud d'entrada hidrodinàmica .....	15
Figura 6: Longitud d'entrada tèrmica .....	16
Figura 7: Fórmula del coeficient de fricció promig.....	16
Figura 8: Fórmula qualitativa del nombre de Nusselt.....	17
Figura 9: Fórmula del nombre de Nusselt .....	17
Figura 10: Coeficient corrector de l'efecte entrada .....	18
Figura 11: Fórmula del càlcul del coeficient de Hausen-Düwell .....	18
Figura 12: Fórmula del càlcul del coeficient de transferència global .....	18
Figura 13: Formulació per al càlcul del mètode MLDT .....	20
Figura 14: Fórmules del mètode $\epsilon$ -NTU .....	21
Figura 15: Fórmula del càlcul de $\epsilon$ .....	22
Figura 16: Zones rellevants de la malla d'estudi.....	28
Figura 17: Aspecte final malla d'estudi .....	28
Figura 18: Capes límits tèrmiques i hidrodinàmiques a 1,5 m/s .....	30
Figura 19: Calor intercanviada a la superfície de la placa a 1,5 m/s.....	30
Figura 20: Fórmules PRN .....	34
Figura 21: Fórmula càlcul temperatura final .....	35
Figura 22: Gràfic de la variació de la temperatura dels dos fluids, teòric.....	35

<b>Figura 23: Part frontal de la malla .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 24: Malla visió isomètrica.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 25: Superfícies d'estudi .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 26: Cossos d'estudi.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 27: Resultats de temperatures finals del bescanviador .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 28: Calors intercanviades .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 29: Variació temperatura aigua freda.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 30: Variació temperatura aigua calenta.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 31: Distribució de temperatures a diferents plans transversals del tub .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 32: Gràfic de la variació de la temperatura dels dos fluids .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 33: Diagrama de Gantt .....</b>	<b>43</b>

## **Índex de taules**

<b>Taula 1: Coeficients de correcció.....</b>	<b>17</b>
<b>Taula 2: Geometria bescanviador .....</b>	<b>31</b>
<b>Taula 3: Propietats dels fluids .....</b>	<b>31</b>
<b>Taula 4: Propietats de l'acer .....</b>	<b>31</b>
<b>Taula 5: Càlculs geomètrics del bescanviador .....</b>	<b>32</b>
<b>Taula 6: Taules i fórmules per als càlculs dels paràmetres necessaris .....</b>	<b>33</b>
<b>Taula 7: Valor de les <math>U_o</math> i <math>U_i</math> .....</b>	<b>34</b>
<b>Taula 8: Valors finals de <math>P</math> <math>R</math> <math>N</math> i temperatures finals .....</b>	<b>35</b>
<b>Taula 9: Comparació resultats analític/ANSYS .....</b>	<b>39</b>
<b>Taula 10: Cost econòmic .....</b>	<b>44</b>

# 1. Prefaci

## 1.1. Origen del projecte i motivació

El motiu principal per l'elecció d'aquest tema fou l'interès que em va provocar l'assignatura del Q7 anomenada Termodinàmica. Em va agradar com estava plantejada i li vaig veure moltes utilitats en l'àmbit de l'enginyeria. Després de parlar amb el tutor quins temes sobre l'assignatura podien ser tractats, va sorgir la possibilitat de estudiar casos pràctics mitjançant el programari *ANSYS Fluent*, i, com a element central del projecte, l'elaboració d'una guia pràctica per a futurs estudiants de l'assignatura per facilitar-los l'estudi mitjançant dit software. Com ja havia treballat amb aquest software a les assignatures de Projecte I i Projecte II, estudiant casos d'optimització de perfils per a millorar les seves propietats aerodinàmiques, vaig creure que podria fer una bona tasca en aquest camp.

Com he comentat, un dels objectius principals és elaborar una guia pràctica per a futurs estudiants. Fet que considero que pot donar una utilitat al projecte i que no quedi com un treball obsolet. Aquesta és una de les altres grans motivacions per dur a terme aquest treball: facilitar part de l'aprenentatge de l'assignatura a futurs estudiants.

## 1.2. Requeriments i coneixements previs

Per a la realització d'aquest treball s'han fet ús dels coneixements previs que a continuació es troben llistats:

- Coneixements sobre transferència de calor:

El treball es basa en conceptes vistos a l'assignatura de Termodinàmica: conducció i convecció són temes recurrents en el treball que hom estudia a l'assignatura.

- Coneixements explícits sobre transferència de calor en conductes:

Les simulacions que s'han dut a terme en aquest treball estan estretament relacionades amb conceptes d'intercanvi de calor en conductes. D'aquesta



manera s'haurà de fer èmfasi en aquests conceptes. No obstant, gran part d'aquests conceptes es veuen a Termodinàmica.

- Domini de l'entorn *Solidworks*:

Tot i que el software *Ansys Fluent* dona la possibilitat de dibuixar perfils i sòlids per a estudiar-los posteriorment, és recomanable dominar *Solidworks* ja que aquest facilita molt el treball de definició de geometries, fent possible que es pugui treballar amb geometries més complexes i amb més exactitud.

- Domini de l'entorn *Ansys Workbench (Fluent)*:

Convé tenir certes nocions bàsiques d'aquest programari (les que es treballen a Mecànica de Fluids) per a poder seguir la guia que resulta d'aquest treball.

## 2. Introducció

### 2.1. Objectius

L'objectiu principal i final d'aquest projecte és l'elaboració de d'una guia ràpida d'*ANSYS Fluent* per a futurs estudiants que facin les pràctiques relacionades amb el càlcul numèric de l'assignatura de Termodinàmica.

Per arribar a aquest objectiu final, s'han comprovat els càlculs analítics plantejats a l'assignatura. Tot això amb l'objectiu de poder assegurar una certa coherència i validesa dels resultats obtinguts.

També com a objectiu intermedi, s'ha treballat a fons en l'entorn del software *ANSYS Fluent* per poder dominar els càlculs CFD. Aquesta eina és fonamental en l'enginyeria, però encara més quan es tracta de temes relacionats amb la mecànica de fluids i la transferència de calor. Així doncs, s'han estudiat diferents casos amb diferents condicions de contorn per poder tenir una certa versatilitat i polivalència en l'estudi i resolució de problemes plantejats a l'assignatura.

Aquest treball vol cobrir els camps esmentats, ja que pot ésser de força utilitat en el futur una guia que tingui una solidesa teòrica i pràctica, per a que futurs estudiants puguin introduir-se en el món del càlcul CFD per l'assignatura de Termodinàmica.

### 2.2. Abast del projecte

Com s'ha comentat en capítols previs, aquest projecte té dos objectius clars: per una banda les simulacions, mitjançant les quals s'intentarà comprovar i ratificar els càlculs analítics efectuats en problemes de Transferència de Calor. Per l'altra, l'elaboració d'una guia ràpida d'*ANSYS Fluent* per l'assignatura de Termodinàmica.

Prèviament, abans de presentar les simulacions i la guia pràctica, s'ha treballat en l'elaboració d'un marc teòric que doni les bases per poder seguir les posteriors parts del projecte. Aquest marc teòric dóna unes pinzellades sobre la transferència de calor en conductes, conceptes de capes límits i el càlcul CFD.

Es realitzaran les següents simulacions:

- Temperatures variables en ambdós fluids en bescanviador (1,1) a contracorrent
- Estudi de l'evolució de les capes límits hidrodinàmiques i tèrmiques.

## 3. Marc teòric

En aquest capítol es farà un resum de la teoria necessària per entendre i poder donar validesa a les simulacions posteriors, així com per recolzar en certs punts la guia pràctica final. Aquest marc teòric pretén explicar conceptes que poden ser necessaris i/o útils per tal de seguir la part pràctica del projecte. Així doncs en aquest capítol es tractaran els següents temes:

- Fluxos externs: teoria de les capes límits
  - Fluxos interns. Teoria de conductes: equacions i coeficients.
  - Bescanviadors de calor: tipus i mètodes de càlcul
  - CFD: mètode de càlcul i característiques del mètode.

### 3.1. Fluxos externs

Un flux extern quan aquest no es troba confinat i circula externament a l'objecte. Aquest tipus de fluxos cal considerar-los per al primer cas d'estudi, ja que es treballaran les capes límits hidrodinàmiques i tèrmiques sobre una placa plana. Per aquest motiu, en aquest apartat es definiran els conceptes més rellevants en relació a aquests tipus de fluids.

#### 3.1.1. Nombre de Reynolds i nombre de Prandtl

El nombre de Reynolds és la relació de forces d'inèrcia i les forces viscoses. Es un paràmetre que s'usa per predir si el comportament d'un fluid en relació a una superfície serà laminar o turbulent. Es pot considerar que quan les forces viscoses són dominants, (flux lent, baix Re), són suficients per mantenir totes les partícules del fluid en línia, fent així que fluid segueixi un perfil laminar. Per contra quan les forces d'inèrcia dominen sobre les viscoses (quan el fluid és més ràpid i el Re és més gran) el flux és turbulent. Hi ha varies maneres de calcular-lo, però la més usada per a plaques planes és la següent:

$$Re_x = \frac{u \cdot x \cdot \rho}{\mu}$$

Figura 1: Fórmula del nombre de Reynolds

Pel que fa al nombre de Prandtl, és també un nombre adimensional que dóna idea de la relació entre la difusivitat mecànica i la difusivitat tèrmica. Així doncs indica

l'espessor relatiu entre a capa límit viscosa i la tèrmica. Aquest coeficient és pot calcular amb la següent fórmula.

$$Pr = \frac{\mu(T, P) \cdot Cp}{\lambda(T)} = \frac{\nu}{\alpha}$$

Figura 2: Fórmula del nombre de Prandtl

Val a dir que per a aire a temperatura ambient el seu valor és de 0,7 i per aigua a 18°C és de 7,51. Com a afegit, com es pot apreciar a la fórmula, aquest coeficient depèn, en el cas de l'aire, de la temperatura i la pressió

### 3.1.2. Capa límit hidrodinàmica o de velocitat

És un fet constatat, que quan les partícules de fluid entren en contacte amb una superfície assoleixen una velocitat relativa respecte la superfície de valor 0, explicat per la condició de no lliscament. Aquest conjunt de partícules aturen el conjunt de partícules que es troben en contacte amb aquestes, que a la vegada frenen les que estan en contacte amb les segones, així fins arribar a un punt on aquest fre sigui negligible.

D'aquesta manera la capa límit hidrodinàmica es defineix com la regió de punts que es tenen una velocitat més petita o igual que 0,99 cops la velocitat inicial del fluid. Hi ha varies maneres de calcular-la, no obstant en aquest TFG no s'aprofundirà en aquests mètodes. A la següent figura (3), es pot apreciar de manera gràfica el concepte de capa límit hidrodinàmica o de velocitat

Dins de la capa límit en trobem dues de diferents, depenent del nombre de Reynolds que es tingui en aquell moment. Per a Reynolds baixos, menors a  $5 \times 10^5$  es tindrà capa límit laminar, que per velocitats baixes dintre de la seva regió provocarà un gruix de la capa límit molt elevat; per velocitats pròximes a la de transició, aquest gruix anirà disminuint fins arribar a la zona turbulenta. En aquesta zona el gruix de la capa límit anirà augmentant, mentre que el punt on es doni aquest augment anirà tendint a l'inici de la placa.

A la següent figura es pot observar de manera qualitativa els diferents aspectes de les regions laminars, de transició i turbulentes.

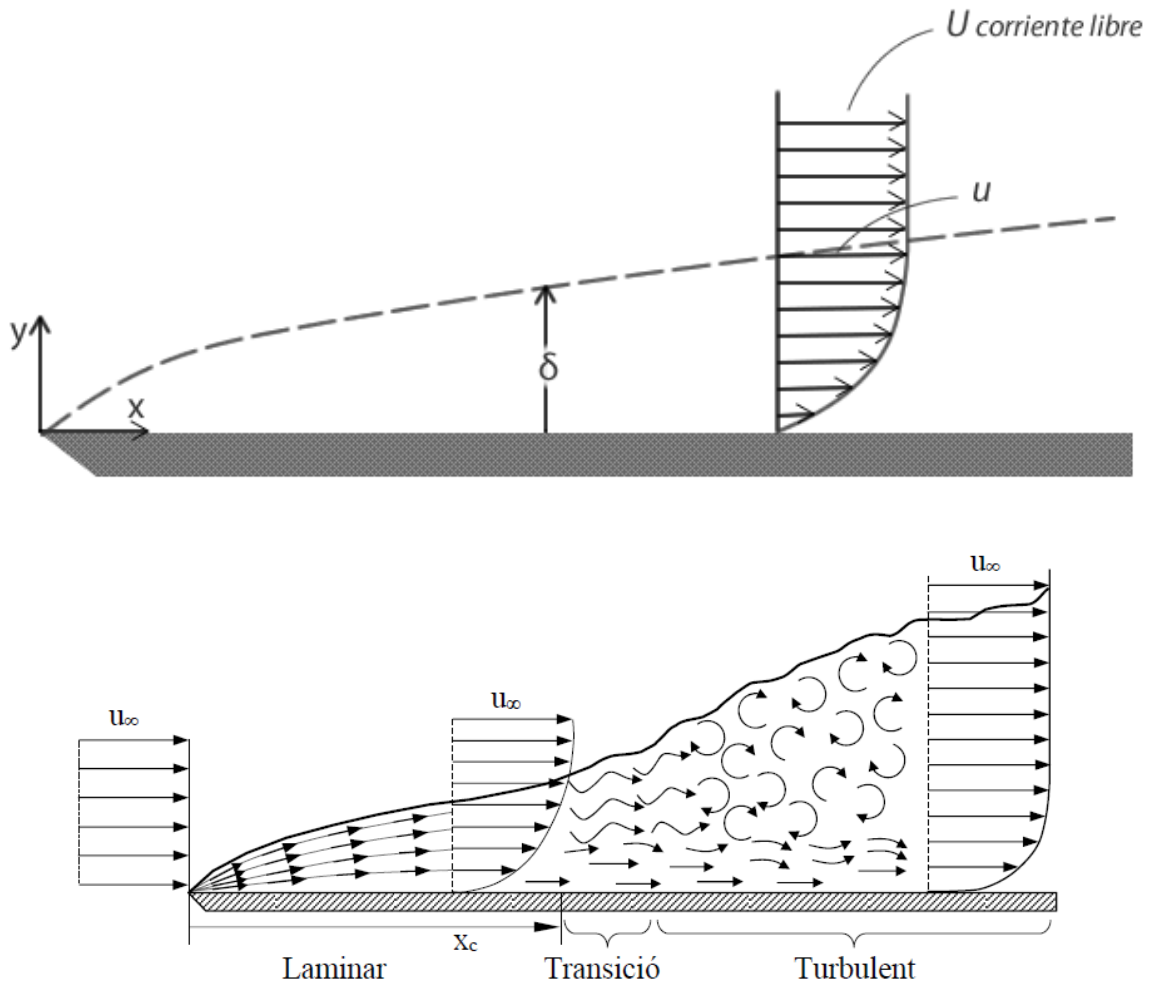


Figura 3: Aspecte de la capa límit hidrodinàmica.

Font: <https://www.textoscientificos.com/fisica/fluidos/flujos-en-capa-limite>

### 3.1.3. Capa límit tèrmica

El concepte de capa límit tèrmica és molt similar al concepte de capa límit hidrodinàmica pel que fa a comportaments i evolucions. No obstant cal redefinir les condicions per les quals es diu que un punt està dins o no de la capa límit. Si en el cas de la hidrodinàmica es definia com la regió de punts que tenien una velocitat igual o inferior a 0,99 la inicial del fluid, en aquest cas es defineix de la següent manera:

- Si la  $T_{aire} \leq T_{placa}$  es defineix a capa límit com la regió de punts que  $\geq 1,01T_{aire}$
- Cas contrari es defineix com la regió de punts que  $\leq 0,99T_{aire}$

A la següent imatge es pot apreciar una esquematització de la capa límit tèrmica.

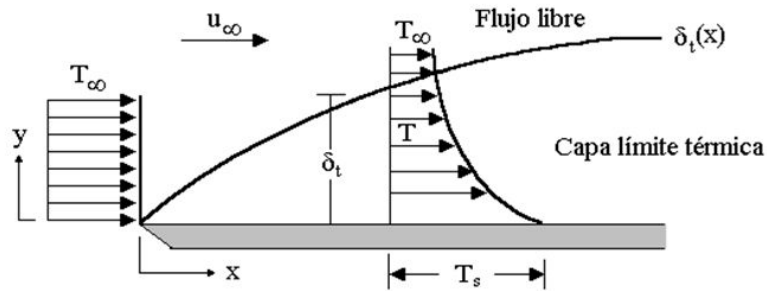


Figura 4: Esquematzació de la capa límit tèrmica

Font: Llibre "TRANSFERÈNCIA DE CALOR" Termodinàmica-240171 Lluís Bonals

## 3.2. Fluxos interns. Teoria de conductes

En aquest apartat del capítol s'explicaran els conceptes necessaris per poder donar una base teòrica a les simulacions posteriors. D'aquesta manera, s'enumeraran i explicaran les diferents fórmules i coeficients. En quant als coeficients, s'explicaran més a fons aquells que són necessaris per al desenvolupament del treball, deixant de banda d'altres que no juguen un paper important en el decurs del projecte.

Es parteix de la base de que els problemes i simulacions realitzades es donen en condicions de règim turbulent ( $Re > 2300$ ). S'assumeixen aquestes condicions del fluid ja que son amb les que es treballa a l'assignatura. A més, un cop feta aquesta particularització, per tal de fer els problemes el més semblants als treballats a classe, es consideren també les següents condicions d'estudi:

- Es suposa una temperatura  $T(x)$  amitjanada per a cada secció del conducte.
- Els coeficients de convecció interiors i exteriors ( $h_i$  i  $h_o$ , respectivament) es consideren constants
- Les propietats dels fluids es consideren constants al llarg del conducte, a una temperatura  $T_m$ .
- Es considera negligible la conducció tèrmica axial.
- Tots els problemes es duen a terme en règim estacionari.

### 3.2.1. Característiques geomètriques

En aquest subapartat es defineixen els paràmetres geomètrics a tenir en compte a l'hora de fer els càlculs d'intercanvi de calor en bescanviadors, tant en la vessant analítica com en el de les simulacions:

- Perímetre hidràulic  $P_h$ : Perímetre de la secció recta en el qual el fluid està en contacte amb el conducte.
- Perímetre tèrmic  $P_t$ : Perímetre de la secció recta on es dona l'intercanvi de calor
- Secció hidràulica  $S_h$ : Secció recta on el fluid està en contacte amb el conducte
- Diàmetre hidràulic  $D_h = \frac{4S_h}{P_h}$ .

### 3.2.2. Longitud d'entrada hidrodinàmica

Aquest concepte està estretament relacionat amb la capa límit hidrodinàmica. No obstant s'explicita més el que es dona dintre d'un conducte. Quan s'introdueix un fluid amb una certa velocitat a un conducte, aquest es frenat a les parets degut al fenomen de fricció. Pel principi de continuïtat, si el fluid pateix una reducció de velocitat en punt propers a la paret, patirà en conseqüència un augment d'aquesta magnitud en altres punts (en aquest cas, punts propers al centre). D'aquesta manera, el fluid pateix variacions de la seva velocitat durant una certa longitud.

S'extreuen d'aquí dos termes importants: perfil de velocitats desenvolupat i perfil de velocitats no desenvolupat. Es defineix un perfil de velocitats com a desenvolupat quan el perfil de velocitats no varia en funció de la longitud. En cas contrari es parla d'un perfil no desenvolupat.

En conseqüència es defineix el terme longitud d'entrada hidrodinàmica com la longitud mesurada des de l'inici del tub fins al punt que el fluid aconsegueix un perfil de temperatures desenvolupat.

En la següent imatge es pot apreciar gràficament el terme longitud d'entrada hidrodinàmica, que és el punt on, efectivament, el perfil de velocitats és el mateix.

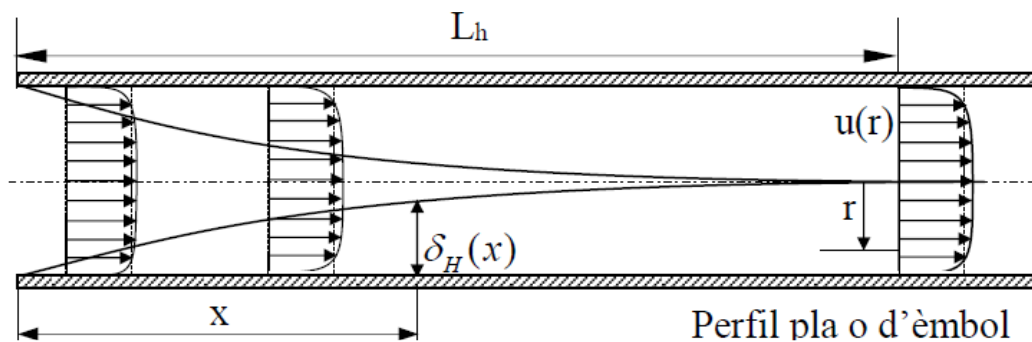


Figura 5: Longitud d'entrada hidrodinàmica

Font: Llibre "TRANSFERÈNCIA DE CALOR" Termodinàmica-240171 Lluís Bonals

### 3.2.3. Longitud d'entrada tèrmica

Pel que fa a la longitud d'entrada tèrmica, el concepte a tractar és el mateix. No obstant, en aquest cas, la variable a analitzar enlloc de ser la velocitat és la temperatura.

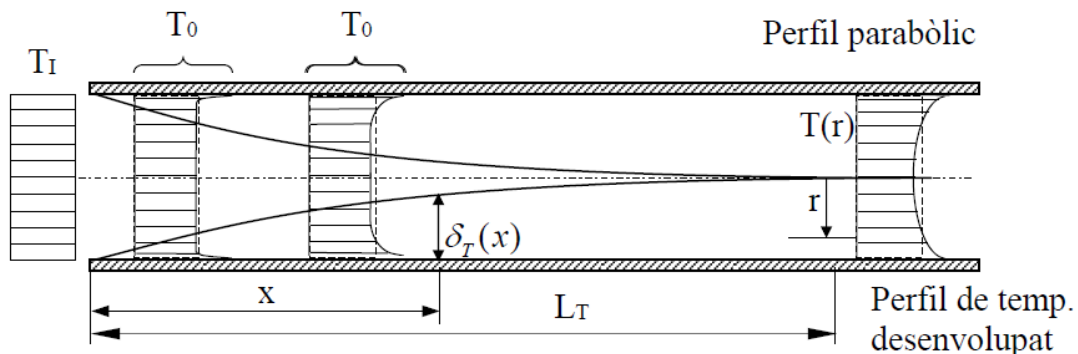


Figura 6: Longitud d'entrada tèrmica

Font: Llibre "TRANSFERÈNCIA DE CALOR" Termodinàmica-240171 Lluís Bonals

### 3.2.4. Coeficient de fricció promig (0-L)

El coeficient de fricció promig mesura el grau de fricció entre el fluid i les parets del conducte. Per poder obtenir-ne un valor versemblant i poder-lo calcular, es suposarà un conducte llis i que la totalitat del fluid es troba a la mateixa temperatura. D'aquesta manera, es farà ús de l'equació de Filonenko.

$$C_f = \frac{1}{(1,58 \ln(Re) - 3,28)^2}$$

Figura 7: Fórmula del coeficient de fricció

Tot i que s'ha utilitzat la suposició de temperatura constant amb l'objectiu d'obtenir la fórmula anterior, és sabut que per una certa longitud, la temperatura a la superfície del conducte varia de la del fluid, i, per això, hi ha una variació de la viscositat del fluid que no s'estava considerant.

Per corregir-ho, es farà ús d'uns coeficients de correcció que es veuran en apartats següents, tot modificant posteriors coeficients necessaris per a poder fer l'estudi analític i numèric. Aquests factors de correcció de la suposició feta, són els següents:



FLUID	$\phi$	PROCÉS	p	n
Gasos	$\left(\frac{T_m}{T_0}\right)$	<i>escalfats</i>	0,52	0,47
		<i>refredats</i>	0,38	0,36
Líquids	$\left(\frac{\mu_m}{\mu_0}\right)$	<i>escalfats</i>	-0,33	0,11
		<i>refredats</i>	-0,24	0,25

Taula 1: Coeficients de correcció

Font: Llibre "TRANSFERÈNCIA DE CALOR" Termodinàmica-240171 Lluís Bonals

### 3.2.5. Nombre de Nusselt

El nombre de Nusselt es defineix a partir de la següent expressió.

$$Nu_D = \frac{h_c \cdot D}{\lambda}$$

Figura 8: Fórmula qualitativa del nombre de Nusselt

Per obtenir-ne el seu valor, s'utilitzarà la fórmula de Gnielinski. La fórmula es pot observar a la Figura 3:

$$Nu_{Dh} = \frac{Cf (Re-1000) Pr \left[1 + \left(\frac{Dh}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \Phi^n}{2 + 17,96 Cf^{0,5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

Figura 9: Fórmula del nombre de Nusselt

Cal remarcar una sèrie de condicionants a l'hora de fer ús d'aquesta expressió per calcular el nombre de Nusselt:

- Només serà vàlida per  $2300 < Re < 5 \times 10^6$  i  $0,5 < Pr < 2000$ , que comprenen la majoria de situacions industrials

Hom observa en la figura anterior el coeficient corrector de l'efecte entrada. Aquest coeficient, com es pot comprovar, tendeix a no influir en el resultat si treballem amb un conducte on la longitud és molt més gran que el seu diàmetre hidràulic. Aquest efecte es deu a que el coeficient de convecció és molt més gran a la xona inicial del conducte comparat amb una x equivalent a 10 diàmetres de distància). El coeficient corrector d'entrada queda explícitament definit en la Figura 4:

$$\left[ 1 + \left( \frac{D_h}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$

Figura 10: Coeficient corrector de l'efecte entrada

### 3.2.6. Coeficient de convecció

Una definició qualitativa del coeficient de convecció podria ser la següent: ràtio de transferència de calor entre un fluid i una superfície sòlida per unitat de superfície i temperatura. Al llarg de les simulacions, amb l'objectiu de poder calcular temperatures finals i/o fluxos de calor, serà necessari calcular prèviament el coeficient de convecció de cada fluid. Com s'ha comentat en la introducció del capítol del marc teòric, es suposaran aquests coeficients constants al llarg del conducte per a cada fluid.

Per a poder trobar-ne un valor, s'usarà el coeficient de Hausen-Düwell, que es pot observar en la Figura 5:

$$h_c = \frac{Nu \lambda}{D_h} \left[ 1 - \left( \frac{0,75}{1+Pr} \right) \left( 1 - \frac{P_t}{P_h} \right) \right]$$

Figura 11: Fórmula del càlcul del coeficient de Hausen-Düwell

Així doncs, es pot apreciar que sempre que es tingui un perímetre tèrmic diferent a l'hidràulic, el terme corrector modifica el valor del coeficient de convecció.

### 3.2.7. Coeficient de transferència global

En aquest subapartat s'abordarà un dels conceptes més decisius a l'hora d'entendre el càlcul de transferència de calor a través de conductes. A grans trets, el coeficient de transferència global (U) és un valor que indica com d'eficient és el conducte a l'hora de transferir la calor.

És important remarcar el fet que aquest coeficient va associat a una superfície, és a dir, no és un coeficient transversal a tot el tub, sinó que cada superfície té un valor de coeficient diferent. És per aquest motiu que a l'hora d'expressar-lo, cal indicar a quina superfície està associat. Així doncs, la fórmula que ens permet calcular-ho és la següent:

$$U_i = \frac{1}{A_i \cdot \sum R_i}$$

Figura 12: Fórmula del càlcul del coeficient de transferència global

### 3.3. Introducció als bescanviadors de calor

Un bescanviador de calor és un dispositiu que permet transferir calor entre 2 fluids. Tot i això també hi ha bescanviadors que permeten transferir calor entre sòlid i fluid. El principi de funcionament és bàsic i intuïtiu: el fluid calent transfereix calor al fluid fred, fent així que el fluid calent es refredi i el fred s'escalfi.

Els intercanviadors de calor són altament utilitzats en el món industrial, ja que són elements indispensables en qualsevol sistema o màquina en el qual hi hagi fluids que variïn la seva temperatura.

Segons el tipus de bescanviador que s'utilitzi, la transferència de calor segueix un procés determinat. Com és de preveure, existeixen molts tipus de bescanviadors de calor. No obstant aquí se'n citaran una petita selecció, els més importants.

- Intercanviadors de contacte directe: són aquells en els quals els dos fluids estan en contacte directament i en conseqüència la calor es transfereix per la pròpia mescla física dels fluids
- Intercanviadors de contacte indirecte: són bescanviadors on els fluids no estan en mescla física, sinó que els separa un material sòlid fent així que ambdós fluids tinguin el seu propi espai. En aquest cas la calor es transfereix per convecció i conducció a través de les parets. Dins d'aquest grup d'intercanviadors es poden distingir-ne de diferents:
  - Intercanviadors paral·lels: intercanviadors on els fluids tenen la mateixa direcció de circulació. N'hi ha de contracorrent, on els fluids tenen sentits diferents, o de equi-corrent, on els fluids comparteixen direcció i sentit
  - Intercanviadors creuats: bescanviadors on els fluids no comparteixen direcció ni sentit, el cas més vist per exemple a l'assignatura és dels creuats a 90°
  - Intercanviadors alternatius: en aquests intercanviadors els fluids recorren el mateix volum en instants de temps diferents, de manera que rep calor/fred del primer i seguidament li cedeix/agafa al segon. No s'usen gaire en el món de la indústria.
  - Intercanviadors de superfície: són els intercanviadors més comuns. Cada fluid té el seu propi espai i no entra en contacte amb l'altre. Hi hauria una altra subdivisió d'aquests intercanviadors, però s'ha decidit

no aprofundir més ja que no és necessari en el desenvolupament del treball.

En l'àmbit de l'estudi d'intercanviadors de calor, generalment hi ha dos tipus de càlculs diferents segons com s'afronti el problema: càlcul directe o disseny. En el primer cas, de comprovació, es tenen les dades geomètriques del bescanviador i l'objectiu és conèixer les temperatures finals dels fluids, així com la potència bescanviada entre ells. En canvi, la segona metodologia de càlcul es utilitzada per obtenir les mesures del bescanviador. Per realitzar els càlculs esmentats anteriorment, existeixen diferents mètodes que a continuació seran resumits per entendre la metodologia de càlcul.

### 3.3.1. Metodologia de càlcul

Per a resoldre aquests tipus de problemes hi ha varis mètodes. No obstant, aquí s'explicaran el vist a l'assignatura (per poder comparar-lo després amb els que s'usen al TFE) i els que s'usen en aquest TFE.

### 3.3.2. Mètode MLDT

El mètode LMTD, provinent de l'anglès "Logarithmic Mean temperature Difference" o traduït al català MLDT (Mitja Logarítmica de la Diferència de Temperatures) és un mètode molt utilitzat per realitzar càlculs en l'àmbit dels intercanviadors. Normalment s'usa per a dimensionament de bescanviadors no per a càlculs de comprovació. És un mètode que destaca en casos senzills com per exemple bescanviadors (1,1) a contracorrent. És pot usar en casos mes complexes, però es recomana per aquests la metodologia NTU.

És un mètode indicat per al càlcul de potències ja que té en compte les temperatures d'ambdós fluids, agafant com a temperatura màxima la calenta del fluid calent i la mínima, la freda del fluid fred. Seguidament es pot veure la formulació del terme MLDT.

$$MLDT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$\Delta T_1 = T_{i_h} - T_{f_c}$$

$$\Delta T_2 = T_{f_h} - T_{i_c}$$

Figura 13: Formulació per al càlcul del mètode MLDT

Així doncs podem definir la calor intercanviada entre els dos fluids com a:

$$q = U \cdot A \cdot MLDT$$

Per finalitzar, però cal mencionar les suposicions que s'han fet per a aquest mètode: s'ha considerat la  $U$  constant al llarg del bescanviador, la  $C_p$  dels fluids constant i règim estacionari.

### 3.3.3. Mètode $\varepsilon$ –NTU

El mètode  $\varepsilon$  –NTU, o també conegut com el mètode del nombre d'unitats de transferència, és un mètode molt utilitzat sobretot per determinar les temperatures finals dels fluids i en conseqüència, la calor bescanviada per aquests.

Així doncs, aquest mètode es basa inicialment en el càlcul de dos coeficients adimensionals; NTU i  $Cr$ . A partir d'aquests dos coeficients es pot obtenir el valor d'un tercer;  $\varepsilon$  el qual permet calcular les temperatures finals dels fluids. A continuació estan exposades les equacions per calcular els coeficients esmentats:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{m \cdot Cp_{min}}$$

$$Cr = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{m \cdot Cp_{min}}{m \cdot Cp_{max}}$$

$$\varepsilon = \max\left(\frac{\Delta T_h, \Delta T_c}{T_{hi} - T_{ci}}\right) = \frac{1 - \exp[-NTU(Cr - 1)]}{1 - Cr \cdot \exp[-NTU(Cr - 1)]}$$

Figura 14: Fórmules del mètode  $\varepsilon$  –NTU

Cal mencionar, que tal com s'indica a les equacions, per calcular el primer coeficient s'ha d'escollir el fluid que tingui la capacitat calorífica, és a dir el resultat de la multiplicació de  $m \cdot C_p$ , més baixa, no la calor específica més baixa.

Pel càlcul del tercer coeficient, es pot observar com és una funció que depèn dels 2 primers coeficients. Aquesta funció depèn del tipus de bescanviador que s'estigui tractant. En aquest cas, es mostra la funció corresponent al bescanviador de doble tub a contracorrent ja que és el cas amb que es realitzaran les simulacions.

Per obtenir la temperatura final, al numerador es té la diferència de temperatures entre entrada i sortida del fluid amb capacitat calorífica mínima i al denominador apareix la diferència de temperatures d'entrada dels dos fluids. La fórmula es té a la figura 16.

$$\varepsilon = \max\left(\frac{\Delta T_h, \Delta T_c}{T_{hi} - T_{ci}}\right)$$

Figura 15: Fórmula del càlcul de  $\varepsilon$

Obtinguda la temperatura final d'un fluid, s'obté la del segon de manera fàcil, calculant la calor total perduda/guanyada del fluid amb temperatura final coneguda i substituir el valor a l'equació de transmissió de calor. Finalment i ja que només es té una incògnita, es podrà calcular el valor de la temperatura final.

$$m_h \cdot C p_h \cdot \Delta T_h = m_c \cdot C p_c \cdot \Delta T_c$$

### 3.3.4. Mètode PRN

Aquest és un mètode derivat del mètode  $\varepsilon$  –NTU, que ja s'ha vist a l'apartat anterior. El procediment a seguir és força semblant al del  $\varepsilon$  –NTU. De manera anàloga, també s'han de calcular 3 paràmetres.

El que diferencia aquests mètodes és el fet que per el PRN, hom és capaç de calcular els paràmetres del fluid que desitgi, no com en el  $\varepsilon$  –NTU, que s'havia de començar pel que tenia una capacitat calorífica menor.

Així doncs, aquest mètode pot ser considerat més senzill, ja que evita fer les comprovacions prèvies per començar a calcular els coeficients P, R i N. Tota la formulació relacionada amb aquest mètode, s'ha decidit exposar-la junt amb el càlcul analític, a fi de no repetir les fórmules de càlcul al treball.

## 3.4. CFD: mètode de càlcul i característiques del mètode

En aquest apartat s'intenta donar uns apunts teòrics bàsics del què és el càlcul CFD, passant per les seves característiques més bàsiques, les seves avantatges més significatives, les equacions en les que es basa i la seva relació amb els mètodes numèrics.

### 3.4.1. Característiques i usos més habituals

El CFD (“Computational Fluid Dynamics”) és la branca de la mecànica de fluids que es dedica a la simulació numèrica de diferents camps. No obstant, els camps que més es

veuen involucrats en el CFD són els de transferència de calor, estudi de fluxos i reaccions químiques.

Tot i que pot haver-hi variacions segons el software que s'usi, inicialment i actualment, el CFD es basa en les següents seccions:

- Pre-procés: al llarg d'aquesta etapa es realitzen totes les tasques relacionades amb la configuració de la geometria i el mallat de la mateixa
- Configuració: aquí es defineixen les condicions de contorn del problema i la tipologia de la solució que es vol
- Resultats: en aquesta última etapa es basa principalment en la comprovació i observació dels resultats obtinguts .

### **3.4.2. Història, camps d'aplicació i avantatges del CFD**

Com a apunt històric remarcar el fet que la indústria aeroespacial fou la primera en fer-ne ús, ja fos per fabricar motors d'avió com per el disseny d'ales. Tot i que les primeres experiències el 192 foren dolentes, van servir per posar els ciments per a que el 1940 finalment es polís el mètode i fos exitós i rigorós. A la indústria aeroespacial s'han anat sumant molts camps científics i ara és una eina transversal en el món STEM:

- Anàlisi aerodinàmic i aeroespacial
- Meteorologia
- Enginyeria elèctrica i electrònica
- Enginyeria ambiental, biomèdica i naval
- Fluxos de fluid i transferència de calor

La principal avantatge d'aquest mètode és l'estalvi de temps i de diners. És per aquest motiu que s'ha imposat en la majoria de sectors industrials a causa de la seva bona relació cost-resultats. És a dir, el CFD proporciona una solució completa i eficient comparada amb la magnitud dels problemes a resoldre i els seus costos. Les indústries han trobat en aquesta eina, una alternativa a les experimentacions que havien d'efectuar per tal de trobar els seus resultats. Pel que fa als costos de les dues opcions, cal remarcar que són diferents depenent de cada problema, però en termes generals acaben sent més elevats en l'experimentació.

D'altra banda, també caldria mencionar altres avantatges com podrien ser: la reducció de terminis, la capacitat per estudiar sistemes on la realització d'experimentació controlada és difícil de realitzar, la possibilitat que ofereix d'estudiar sistemes sota condicions perilloses i el alt nivell de detall que ofereix a l'usuari.

### 3.4.3. Equacions de Navier-Stokes

L'objectiu de tot estudi dut a terme amb el mètode CFD és el de resoldre, mitjançant mètodes numèrics, el conjunt d'equacions amb les quals es regeix la mecànica de fluids i la transferència de calor. Aquest conjunt d'equacions s'anomenen equacions de Navier –Stokes.

Malgrat que actualment la capacitat computacional dels ordinadors ha augmentat exponencialment, és necessari fer una discretització del volum d'estudi, ja que no és suficient, de moment, per resoldre les equacions de manera precisa. Així doncs, es farà una breu introducció als mètodes numèrics, que ens permeten discretitzar-ho i arribar a una solució correcta.

Aquestes equacions de Navier-Stokes neixen de l'aplicació de tres grans principis: la conservació de la massa (equació de continuïtat), l'equació de quantitat de moviment i l'equació de conservació de l'energia. Cal mencionar també que aquestes tres equacions es poden expressar en la seva forma diferencial i/o integral. Així doncs, a continuació es presenten dites equacions amb consideracions sobre elles:

- Equació de continuïtat o de conservació de la massa:

Es basa en el principi que la massa continguda en un volum de control (en règim estacionari) no varia en el temps. L'expressió diferencial d'aquesta equació és la següent:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Així, es poden observar dos termes: el primer que representa la variació temporal mentre que el segon representa el flux convectiu de massa per unitat de volum.

- Equació de conservació de l'energia

En el camp de la mecànica de fluids, el principi de la conservació de l'energia afirma que l'energia mecànica d'un fluid és la mateixa a través de tots els punts del corrent

$$\nabla(K\nabla T) - \rho \cdot (\nabla \vec{v}) + \phi = \rho \frac{d\hat{u}}{dt}$$

En dita equació es poden observar els termes K (referent a la conductivitat tèrmica); el terme  $\phi$ , que representa la dissipació viscosa i  $\hat{u}$ , que expressa l'energia interna.

- Equació de la quantitat de moviment



L'equació de la quantitat de moviment que governa la mecànica de fluids prové de la segona llei de Newton. Aquesta llei afirma que la variació de la quantitat de moviment d'un objecte està originada per forces que actuen sobre aquest. Després de seguir una sèrie d'operacions matemàtiques s'arriba a la següent expressió:

$$\rho \vec{g} + \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} = \rho \frac{d\vec{v}}{dt}$$

D'esquerra a dreta es poden observar els següents termes: forces gravitatòries, viscoses, de pressió i d'inèrcia. Cal posar de relleu el fet que aquesta equació està considerada per fluids amb densitat i viscositat constants.

Així doncs, s'han de resoldre en total un conjunt de 5 equacions : l'equació de continuïtat, conservació de l'energia i la de quantitat de moviment.

#### 3.4.4. Introducció als mètodes numèrics

Els mètodes numèrics són una eina matemàtica que permet formular problemes complexos en uns de més assequibles de manera que sigui possible trobar una solució. El procediment que segueix aquest mètode és transformar unes equacions molt complexes sense solució analítica en altres més senzilles que són resolubles mitjançant el càlcul CFD. En el món de la mecànica de fluids, aquest mètode suposa un gran avantatge ja que s'utilitza per resoldre les equacions de Navier-Stokes.

Aquest mètode es basa en la transformació d'equacions en una discretització d'aquestes. Per avançar, cal primer però detallar el funcionament dels mètodes numèrics una mica més.

El domini del problema, o domini de càlcul, és dividit en diferents elements que són delimitats per punts de mallat. L'objectiu doncs, és resoldre el conjunt d'equacions que defineixen el comportament d'aquests punts de mallat. En aquests punts es transforma la informació de les solucions contínues de les equacions en solucions discretitzades. Tot aquest procés es realitza per cadascun dels elements del domini, obtenint d'aquesta manera les equacions discretitzades del problema.

Hi ha diverses maneres de discretitzar aquestes equacions: sèries de Taylor, que aproximen les equacions fent ús des truncaments de les sèries; formulació de volums finits, es divideix el domini en volums de control més petits englobant els punts de mallat; i per últim la formulació a partir de variacions, que calcula les variacions que es donen en diferents punts del mallat.

## 4. Estudi de casos pràctics

En aquest capítol es volen posar de manifest les diferents conclusions i/o experiències que s'han obtingut a mesura que es portaven a terme les diferents simulacions dels diferents casos pràctics.

En primer lloc es presenta el cas de la placa plana, on el que es vol simular és l'evolució de la capa límit hidrodinàmica sobre una placa plana, i veure si l'evolució és coherent amb el que es veu a la realitat. En segon lloc, s'ha dut a terme l'estudi d'un bescanviador de calor (1,1) a contracorrent. En aquest cas s'ha volgut comprovar les distribucions de temperatura a diferents seccions del tub, l'evolució de la temperatura al llarg del tub i la validació dels càlculs analítics comparats amb els obtinguts a partir de la simulació.

### 4.1. Cas 1: Capes límits en placa isoterma

Com ja s'ha comentat en la introducció d'aquest capítol, en aquest cas es vol mostrar l'evolució de la capa límit hidrodinàmica en funció de la velocitat del fluid. Abans, però, d'exposar els diferents gràfics i imatges de contorns i velocitats, es detallarà les condicions en les que el cas s'ha estudiat.

Val a dir que els aspectes més tècnics de com fer anar el programa per a què els estudiants de l'assignatura puguin fer aquest cas es troben més detallats en l'annex d'aquest Treball de Final de Grau.

Així doncs, per començar l'estudi, cal fer una petita valoració del mètode que s'usarà per plasmar la capa límit de velocitats. ANSYS Fluent dóna la possibilitat de resoldre, per Reynolds baixos i per tant capes laminar, amb una metodologia especial per aquest tipus de problemes. Així doncs, es decideix per a Reynolds baixos, fins als pròxims a la transició, treballar amb la metodologia *Laminar*, ja que és més precís si s'està treballant en zona laminar. Per velocitats iguals o superiors a la de transició, es treballarà amb el model k-epsilon, un model robust i que ofereix un alt grau de precisió.

Així doncs, cal saber el valor de la velocitat, que fa que es deixi d'estar en zona laminar per passar a estar en zona turbulenta. Hi ha molta varietat pel que fa aquest Reynolds de transició, ja que depèn també de la rugositat de la superfície. Tot i això la majoria de la bibliografia coincideix en què es produeix la transició, al final de la placa, al voltant d'un  $Re_{x=1} = 5 \cdot 10^5$ . Així prenent el aquest valor del Reynolds, la fórmula

exposada a la Figura 1 i les característiques del fluid, s'arribà a un valor de la velocitat que s'exposa seguidament:

$$\left. \begin{aligned} Re_x &= \frac{u \cdot x \cdot \rho}{\mu} = 5 \cdot 10^5 \\ \rho &= 1,225 \text{ kg/m}^3 \\ \mu &= 1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m s)} \end{aligned} \right\} \quad \mathbf{u = 8 \text{ m/s}}$$

D'aquesta manera, en velocitats més baixes es treballarà amb el mètode laminar i per velocitats pròximes i superiors amb el mètode k-epsilon

#### 4.1.1. Càlcul analític

Per a donar veracitat a la simulació efectuada amb ANSYS, cal en primer lloc, efectuar un càlcul analític. En aquest cas s'ha optat per calcular la potència bescanviada entre la placa i l'aire mitjançant diferents fórmules sobre la placa plana i les seves capes límits. S'ha efectuat el càlcul per a cada velocitat per així saber la calor que s'intercanvia per a cada velocitat. Les fórmules, extretes del llibre de Termodinàmica del Lluís Bonals, són les següents:

La primera, serveix per a calcular el Nusselt mig, aquesta, es deriva de la solució de Blasius.

Un cop es té el Nusselt calcula s'obté el coeficient de convecció, també mig. Finalment es calcula la calor intercanviada.

$$Nu_{0-L} = 0,664 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re_L^{0,5}$$

$$h_{0-L} = Nu_{0-L} \cdot \lambda_{fluid} \cdot x \quad \text{on } x = 1\text{m i } \lambda_{fluid} = 0,0242 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$q' = L \cdot h_{0-L} \cdot (T_{placa} - T_{aire})$$

Així doncs per a cada velocitat, es tindrà un Reynolds i de manera iterativa s'anirà calculant la calor per a cada velocitat. S'exposaran els resultats del càlcul al final d'aquest apartat, junt amb el valor obtingut a la simulació, efectuant així la comprovació i validació de la metodologia seguida.

#### 4.1.2. Càlcul amb ANSYS Fluent

Abans de començar amb l'anàlisi, cal comentar que s'ha estudiat només els fenòmens que apareixen a la part superior de la placa ja que es tracta d'un cas simètric on el que passés a la part inferior seria exactament igual al que trobem a la part superior.

En les dues figures a continuació es poden veure les característiques del mallat proposat per al cas d'estudi i les diferents zones d'interès de la malla. Cal comentar que l'estudi d'aquest cas s'ha fet sobre un domini de 1 m de llarg i 0,5 m d'alt, amb un gruix negligible.

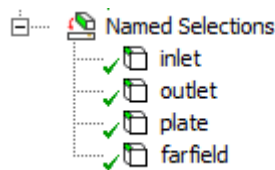


Figura 16: Zones rellevants de la malla d'estudi

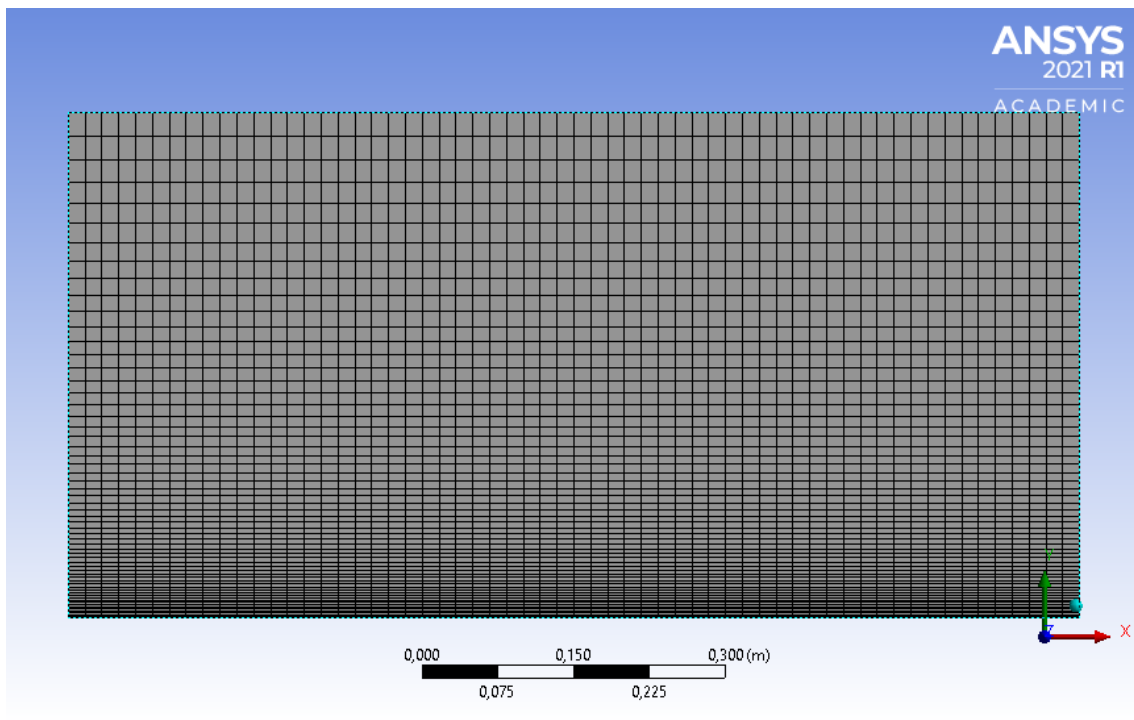


Figura 17: Aspecte final malla d'estudi

La malla d'estudi té un total de 3600 elements. Com es pot apreciar a la figura, hi ha una concentració més elevada d'elements al voltant de la zona de "plate", la zona inferior que es consideraria la placa plana. A mesura que ens allunyem de la mateixa (cap a la zona superior "farfield"), no ens calen tants elements, ja que el fenomen de l'aparició de la capa límit es dona a zones pròximes a la placa. Per últim comentar que

el flux d'aire va d'esquerra a dreta (en el sentit positiu de les  $x$ ). Així doncs s'anomena "inlet" a la part esquerra del domini i "outlet" a la part dreta del domini.

Un cop aclarides les zones i presentada la malla, cal posar de manifest ara les condicions de contorn del problema que s'usaran per tal d'obtenir els gràfics i imatges finals.

Com l'objectiu del cas d'estudi és estudiar l'aspecte de la capa límit hidrodinàmica i tèrmica, s'han hagut de fer varies simulacions canviant cada cop una condició de contorn. No obstant, seguidament es presenten les condicions de contorn del problema:

- Inlet: s'ha imposat que el material d'entrada sigui l'aire. Com ja s'ha comentat, la velocitat anirà variant segons la simulació, no obstant si que hi ha paràmetres constants com la temperatura, la densitat i la viscositat. Les dues últimes ja han estat detallades anteriorment, pel que fa a la temperatura, s'ha considerat de 300°K.
- Outlet: es defineix com a pressure-outlet, no s'imposa cap condició de contorn sobre aquesta part del problema.
- Plate: s'ha escollit l'alumini com a material. S'ha imposat una temperatura constant de 400 °K i una rugositat constant de 0,5 (per defecte del programa).
- Symmetry i farfield: no cal modificar res, ja que el programa interpreta correctament la seva funció en el cas d'estudi.

Definides les condicions de contorn, s'ha procedit a la simulació de les diferents velocitats per tal de veure l'evolució de la capa límit i la comprovació amb un comportament teòric.

A l'annex 2, es veuen totes les fotografies de les capes límits tèrmiques i hidrodinàmiques. En aquest apartat es mostrarà un exemple per una velocitat amb les seves capes límits i la seva calor intercanviada, comparada amb la calculada teòricament. En les següents figures (19 i 20) es poden veure les capes límits i la calor intercanviada.

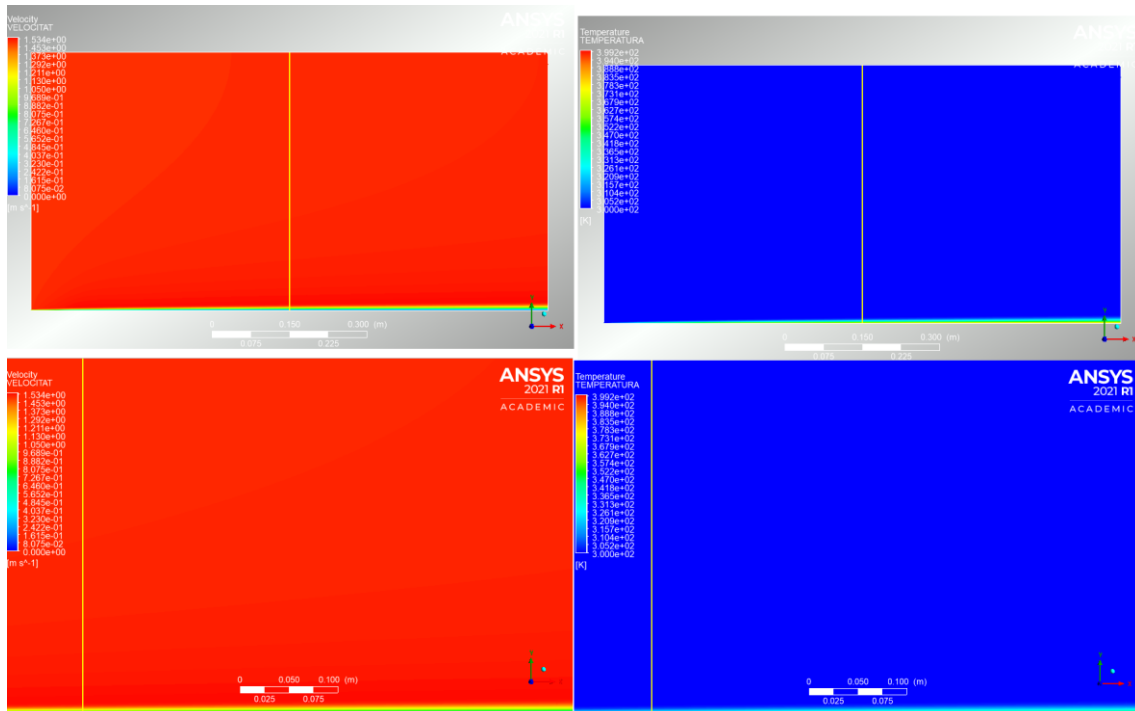


Figura 18: Capes límits tèrmiques i hidrodinàmiques a 1,5 m/s

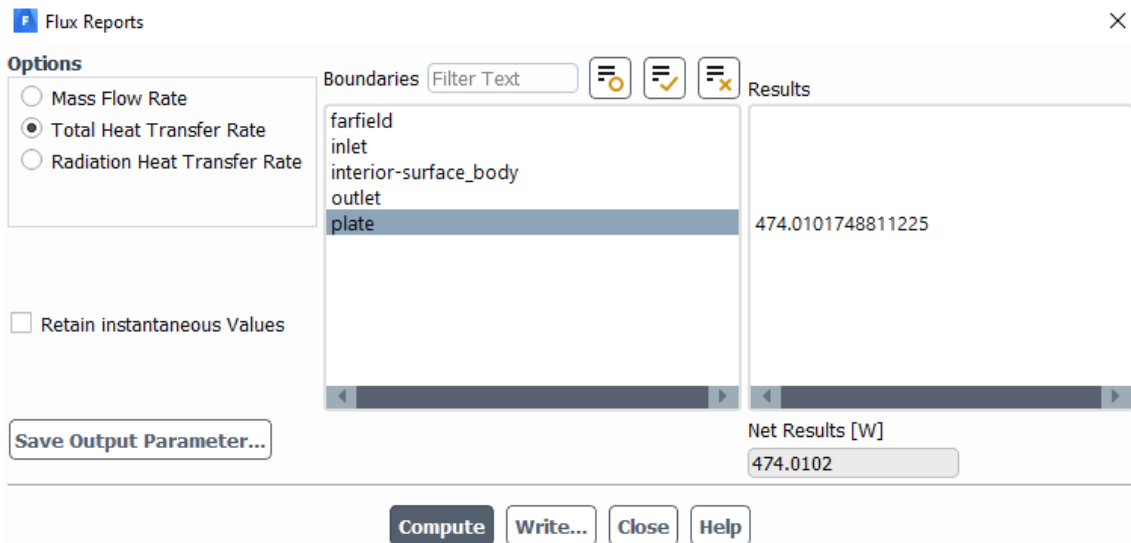


Figura 19: Calor intercanviada a la superfície de la placa a 1,5 m/s

## 4.2. Cas 2: Bescanviador (1,1) amb fluids a contracorrent

Com s'ha comentat a la introducció del capítol, en aquest cas es volen fer un seguit de comprovacions en relació a un bescanviador. Per a l'estudi d'aquest cas s'ha seguit el següent procediment: en primer lloc es presentaran les propietats termodinàmiques dels materials que hi intervenen i la geometria del bescanviador.. Seguidament

s'exposarà el càlcul analític i en tercer i últim lloc el procediment dut a terme amb el software.

El bescanviador d'estudi és un bescanviador (1,1) amb fluids a contracorrent amb temperatura variable. És alhora un bescanviador indirecte ja que l'intercanvi de calor entre els dos fluids es dona a través d'un tub intern d'acer.

Pel que fa a la geometria del tub, a la següent taula s'exposen les mesures rellevants.

<b>Costat</b>	<b><math>D_{interior}</math> [m]</b>	<b><math>D_{exterior}</math> [m]</b>	<b>Longitud [m]</b>
<i>Interior</i>	0,05	0,055	10
<i>Exterior</i>	0,08	0,085	10

Taula 2: Geometria bescanviador

Comentar que la geometria s'ha importat en format .iges, ja que s'ha fet amb el software de dibuix en 3D *Solidworks*.

En la següents taules es poden veure els diferents materials que s'han escollit per dur a terme l'estudi del cas i les seves propietats termodinàmiques.

<b>Fluid</b>	<b><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>C_p</math> [kJ/Kg·K]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/m·K]</b>	<b><math>\mu</math> [kg/m·s]</b>	<b><math>Pr</math></b>	<b><math>m'</math> [kg/s]</b>	<b><math>T_i</math> [K]</b>
<i>Aigua calenta</i>	932,5	4,268	0,687	$2,07 \cdot 10^{-4}$	1,28	0,87	415
<i>Aigua freda</i>	998,2	4,180	0,607	$8,41 \cdot 10^{-4}$	5,77	0,9	300

Taula 3: Propietats dels fluids

<b>Material</b>	<b><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>C_p</math> [kJ/kg·K]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/m·K]</b>
Acer	8030	502,48	52

Taula 4: Propietats de l'acer

#### 4.2.1. Càlcul analític

Abans de procedir al càlcul amb ANSYS *Fluent* cal fer uns càlculs previs per tal de donar validesa a l'estudi. Per fer-ho s'ha fet un càlcul analític, del tipus que es fa a l'assignatura de Termodinàmica.

En primer lloc s'han fet els càlculs geomètrics per determinar les característiques del tub necessàries per fer el càlcul. A la següent taula es poden veure les característiques necessàries per començar el càlcul.

<i>Costat</i>	$P_t[m]$	$P_h[m]$	$S_h [m^2]$	$D_h[m]$
<i>Interior</i>	0,157	0,157	$1,96 \cdot 10^{-3}$	0,05
<i>Exterior</i>	0,421	0,172	$2,65 \cdot 10^{-3}$	0,025

Taula 5: Càlculs geomètrics del bescanviador

Un cop realitzats els càlculs, cal posar en consideració quin tipus de problema afrontem. En aquest cas es vol estudiar un bescanviador (1,1) a contracorrent on les temperatures dels dos fluids varien. Encara que el mètode MLDT seria vàlid per a calcular les temperatures finals en aquest casos "senzills", val a dir que és una mica enrevessat i que n'hi ha d'altres que funcionen millor. Per aquest motiu s'ha decidit fer ús del mètode PRN, un mètode que funciona millor quan les incògnites són les temperatures finals dels fluids que intervenen en el bescanviador. D'aquesta manera es procedeix seguint el mètode comentat.

El següent pas seria començar el procés iteratiu per a trobar les temperatures finals dels fluids. Per aquest cas, els paràmetres dels fluids, no depenen de la temperatura. Conseqüentment no cal seguir un procés iteratiu per a trobar-los.

En les següents fórmules i a la següent taula es poden observar els coeficients per a cada fluid.

$$Re_{Dh} = \frac{m \cdot Dh}{Sh \cdot \mu}$$

$$Cf = \frac{1}{(1,58 \cdot \ln(Re) - 3,28)^2}$$

$$Nu = \frac{Cf (Re - 1000) Pr \left[ 1 + \left( \frac{Dh}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \Phi^n}{2 + 17,96 Cf^{0,5} \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}$$



$$h_c = \frac{Nu \lambda}{D_h} \left[ 1 - \left( \frac{0,75}{1 + Pr} \right) \left( 1 - \frac{P_t}{P_h} \right) \right]$$

<i>Fluid</i>	<i>Re</i>	<i>Cf</i>	<i>Nu</i>	<i>hc [W/m²·K]</i>
<i>Interior</i>	<i>1,07·10<sup>5</sup></i>	<i>4,43·10<sup>-3</sup></i>	<i>280</i>	<i>3854,1</i>
<i>Exterior</i>	<i>10093,1</i>	<i>7,85·10<sup>-3</sup></i>	<i>76</i>	<i>1724,5</i>

Taula 6: Taules i fórmules per als càlculs dels paràmetres necessaris

El procés a seguir es força mecànic, de totes maneres es detallarà per donar un marc teòric complet a l'estudi. Inicialment es calcula el nombre de Reynolds i es posa de manifest que ens trobem en un cas turbulent. Seguidament el coeficient de fricció, aprofitant el nombre de Reynolds calculat prèviament.

El següent coeficient a calcular és el nombre de Nusselt, que també depèn del nombre de Reynolds, del coeficient de fricció, del nombre de Prandtl, del diàmetre hidràulic la longitud i del coeficient de correcció. En treballar amb fluids amb propietats constants, el factor corrector val 1.

Calculat el nombre de Nusselt, es calcula el coeficient de convecció dels fluids. Com s'aprecia apareix el terme de Hausen-Düwell, el qual s'haurà de tenir en compte sempre que el perímetre hidràulic sigui igual que el tèrmic. Si tenen el mateix valor, val 1.

Arribats a aquest punt, ja s'han calculat els coeficients de convecció per a cada fluid. Cal ara calcular el coeficient de transferència global. Aquest coeficient es calcula segons les resistivitats tèrmiques que apareguin al problema, tant de convecció com de conducció. A la següent figura es pot veure una esquematització de les resistivitats, per tal de que quedi més clar quines apareixen a la fórmula.

Cal considerar que aquest coeficient es refereix a una superfície, fet que s'ha de tenir en compte, tot i que després s'acaba arribant al mateix resultat final. A la següent taula es poden apreciar aquets valors.

$$U_o = \frac{1}{\frac{\pi \cdot D_{int,o}}{h_{co} \cdot \pi \cdot D_{int,o}} + \frac{\ln\left(\frac{55}{50}\right)}{2 \cdot \lambda} + \frac{D_{int,o} \cdot \pi}{D_{int,i} \cdot \pi \cdot h_{ci}}}$$

<i>Superfície tub interior</i>	<i>U [W/K]</i>
<i>Interior (i)</i>	<i>1193,64</i>
<i>Exterior (o)</i>	<i>1085,13</i>

Taula 7: Valor de les Uo i Ui

A continuació es procedeix amb el càlcul de les temperatures finals utilitzant el mètode PRN. Per realitzar el càlcul, es necessari conèixer els següents coeficients

$$N_h = \frac{U_o \cdot \pi \cdot D_{to} \cdot L}{m_h \cdot Cp_h}$$

$$R_h = \frac{m_h \cdot Cp_h}{m_c \cdot Cp_c}$$

$$P_h = \frac{1 - \exp[N_h \cdot (R_h - 1)]}{1 - R_h \cdot \exp[N_h \cdot (R_h - 1)]} = \frac{T_{hf} - T_{hi}}{T_{ci} - T_{hi}}$$

Figura 20: Fórmules PRN

El primer dels tres coeficients a calcular és el N, on es pot veure que depèn del coeficient U amb la seva superfície associada i del flux màssic i calor específic del fluid seleccionat. A continuació cal calcular el coeficient R que, com s'ha comentat en l'explicació del mètode, les propietats del numerador són les del fluid seleccionat i les del denominador són de l'altre fluid.

Finalment es calcula el coeficient P, que es el que ens permetrà calcular la temperatura final del fluid en qüestió. Cal recordar, que l'equació d'aquest coeficient varia en funció del tipus de bescanviador i que aquesta es l'equació del coeficient que s'utilitza per a bescanviadors de doble tub a contracorrent.

Un cop s'obté el valor de coeficient, es pot obtenir la temperatura final del fluid seleccionat amb la següent equació:

$$P_h = \frac{T_{hf} - T_{hi}}{T_{ci} - T_{hi}}$$

Figura 21: Fórmula càlcul temperatura final

Un cop es té la temperatura final d'un dels dos fluids, hi ha dos camins a seguir per obtenir la temperatura final de l'altre. La primera opció es simplement seguir el mateix procediment que s'ha seguit pel primer fluid. Per realitzar la segona opció, és necessari realitzar un balanç d'energia al bescanviador i ja d'aquest balanç obtenim l'altre temperatura final, ja que com es pot observar, es l'única incògnita.

$$m_h \cdot C_{p_h} \cdot \Delta T_h = m_c \cdot C_{p_c} \cdot \Delta T_c$$

A continuació, estan expressats els valors dels coeficients del mètode i les temperatures finals:

<i>Fluid</i>	<i>N<sub>h</sub></i>	<i>R<sub>h</sub></i>	<i>P<sub>h</sub></i>	<i>T<sub>i</sub> [K]</i>	<i>T<sub>f</sub> [K]</i>
<i>Interior</i>	<i>0,508</i>	<i>0,987</i>	<i>0,338</i>	<i>415</i>	<i>376,15</i>
<i>Exterior</i>	<i>0,501</i>	<i>1,014</i>	<i>0,333</i>	<i>300</i>	<i>338,31</i>

Taula 8: Valors finals de P R N i temperatures finals

Seguidament, es poden veure els perfils exponencials de temperatures dels dos fluids al llarg del bescanviador.

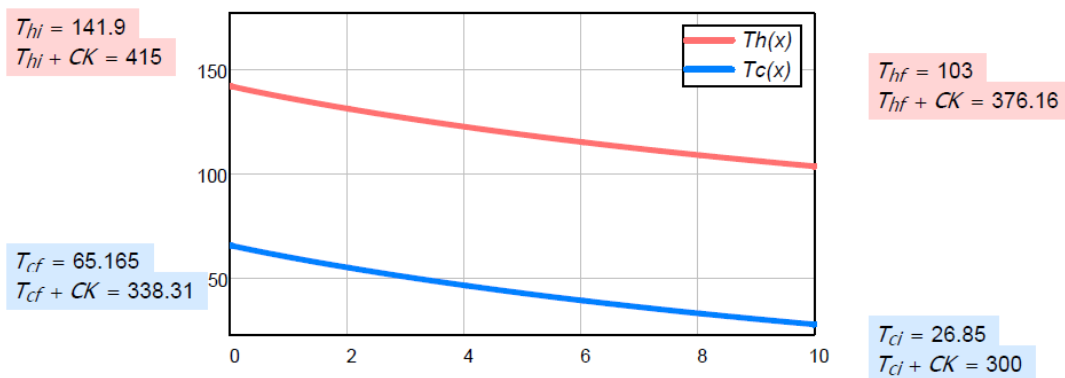


Figura 22: Gràfic de la variació de la temperatura dels dos fluids, teòric.

Un cop es tenen les dos temperatures finals, es calcula la mitja logarítmica de la diferència de temperatures, amb la següent fórmula.

$$MLDT = 76,4$$

Finalment, per calcular la potència total bescanviada es pot utilitzar la següent expressió

$$q = U \cdot A \cdot MLDT$$

Resultant un valor de  $q=1,4 \cdot 10^5 \text{ W}$

#### 4.2.2. Càlcul amb ANSYS *Fluent*

Vist el càlcul analític del cas, es presenta en aquest apartat el procediment i conclusions extretes a partir de l'estudi del cas amb el software

En aquest cas, s'ha hagut de simplificar la geometria i treballar amb  $\frac{1}{4}$  del tub per tal de poder fer servir l'ANSYS amb les seves limitacions per a estudiants. El cert és que es podria haver fet l'estudi amb una obertura del tub de pocs graus, ja que tots els plans que passen pel centre del tub, per les condicions del problema, són plans adiabàtics. No obstant, s'ha decidit representar  $\frac{1}{4}$  del tub per tal de poder visualitzar millor els fenòmens que es volen estudiar.

En les següents figures es poden observar l'aspecte de la malla.

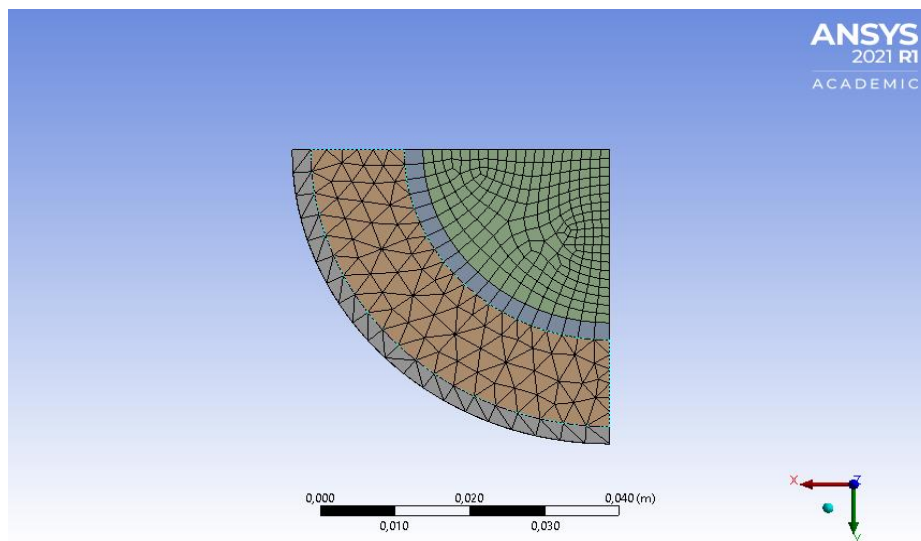


Figura 23: Part frontal de la malla

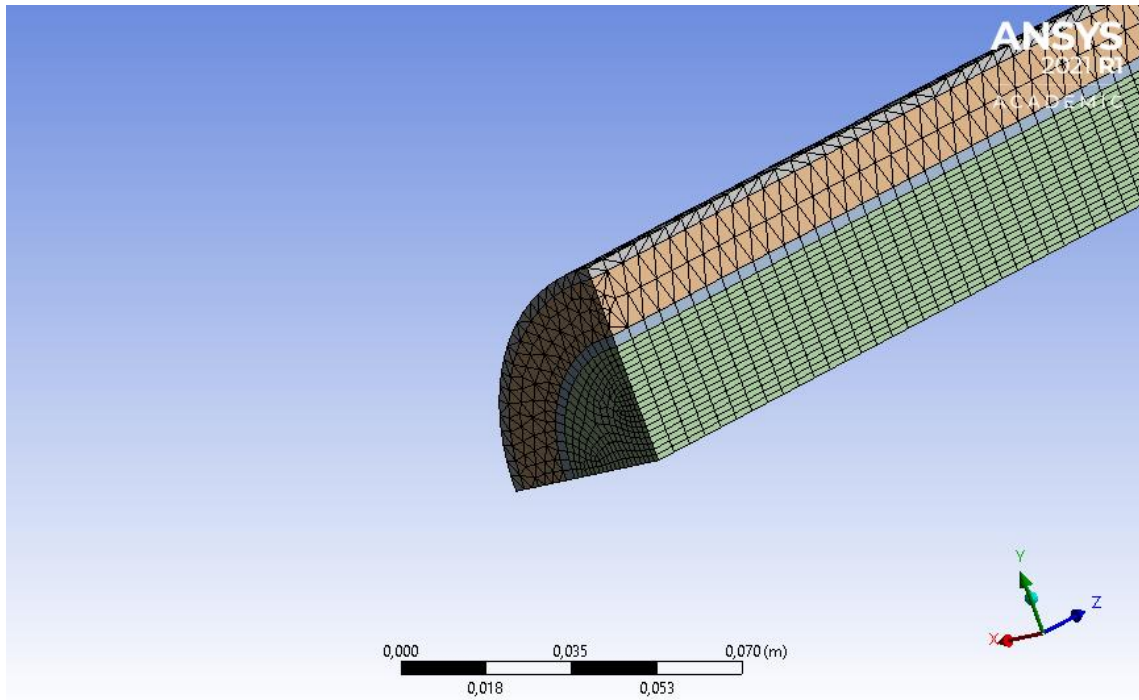


Figura 24: Malla visió isomètrica

Pel que fa a la malla comentar que té un total de 270000 elements. Es per això que s'ha optat per treballar amb simetries. Si s'hagués treballat amb el tub sencer no s'hagués pogut treballat amb tanta precisió ja que la qualitat del mallat s'hauria d'haver vist reduïda per tal d'acomplir les limitacions de la versió estudiantil.

El següent pas, definida la malla i comprovat que s'adequa a les limitacions de la versió estudiantil, es presenten en les següents figures la ubicació de zones d'interès d'estudi, amb les condicions aplicades a la llista que segueix a les figures.

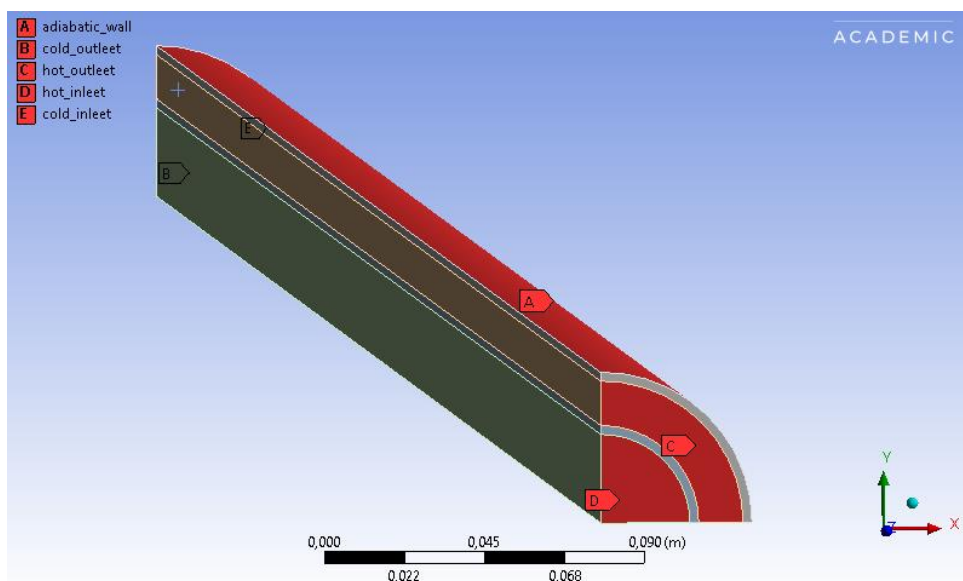


Figura 25: Superfícies d'estudi

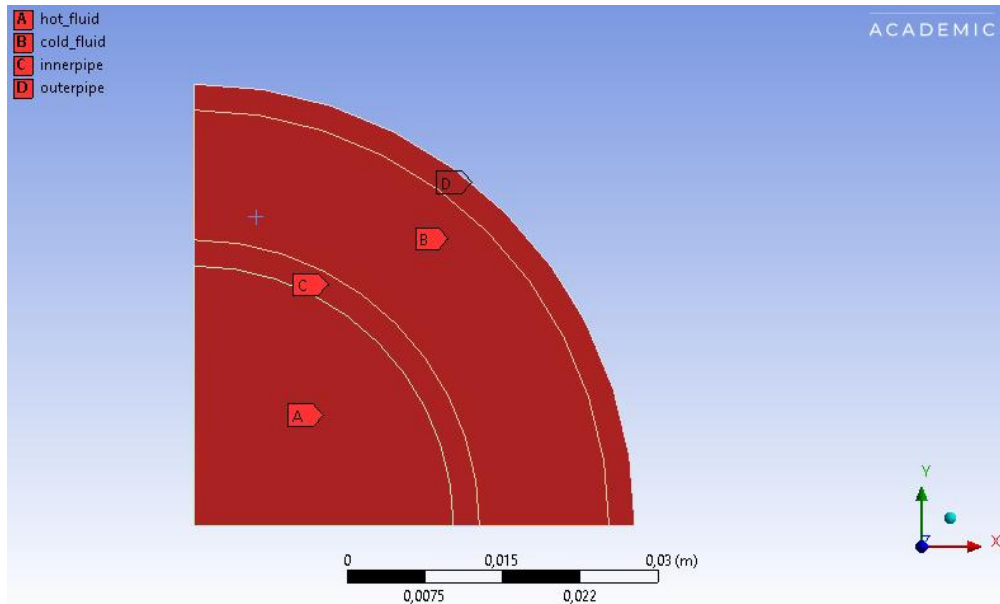


Figura 26: Cossos d'estudi

Les condicions de contorn que s'han aplicat a les diferents superfícies i cossos presentats en les imatges són les següents:

- Hot inleet: és l'entrada d'aigua calenta (s'ha introduït les característiques al software) a 415°K amb un flux màssic de 0,87 kg/s. Cal remarcar que al tenir una simetria que fa que només es representi  $\frac{1}{4}$  del tub, s'ha introduït també només  $\frac{1}{4}$  del flux total.
- Cold inleet: és l'entrada d'aigua freda (s'ha actuat de la mateixa manera que amb l'aigua calenta) a 300 °K i un flux màssic de 0,9 kg/s.
- Adiabatic wall: s'ha assignat la condició de flux de calor igual a 0.
- Innerpipe/outerpipe: han rebut les característiques del material pel qual estan formats els tubs.
- Zones de contacte fluids+tubs: aquestes zones del bescanviador se'ls ha assignat la propietat de "coupled". És a dir, se'ls ha assignat la propietat de transmetre la calor tal i com ho farien normalment, sense cap condició de generació de calor, ni de temperatura ni de superfície adiabàtica.

Un cop definides les condicions de contorn, s'han configurat les condicions de computació de la solució (explicades prèviament). Al tractar-se d'un cas d'estudi amb el nombre d'elements molt pròxim al màxim estipulat per les versions estudiantils, és assumible que sigui una simulació no molt ràpida (també dependrà de la capacitat computacional de cada dispositiu).

Havent assolit la solució final (on tots els residus han superat el nivell de  $1e-06$ ), s'han obtingut una sèrie de resultats que s'han comprovat immediatament amb els obtinguts de manera analítica.

A les següents figures i taules es pot comprovar les temperatures i calors obtingudes a *ANSYS Workbench* i al càlcul analític.

Static Temperature	[K]
cold_inleet	300
cold_outleet	342.82223
hot_inleet	415
hot_outleet	372.51474

Figura 27: Resultats de temperatures finals del bescanviador

Total Heat Transfer Rate	[W]
adiabatic_wall	-0
cold_inleet	1739.8711
hot_inleet	128470.82
hot_outleet	-69032.039
wall-cold_fluid-innerpipe-shadow	39726.895
wall-cold_fluid-outerpipe	0.0014076005
wall-cold_fluid-outerpipe-shadow	-0.017586634
wall-hot_fluid-innerpipe	39726.914
wall-innerpipe	-0
wall-outerpipe	-0
Net	140632.44

Figura 28: Calors intercanviades

Recuperant els resultats obtinguts amb el càlcul analític, es pot comprovar a la següent taula com l'error relatiu es prou petit com per considerar l'execució del cas d'estudi correcte.

	Analític	ANSYS	Error relatiu
<b>Temperatura final freda [°K]</b>	338,31	342,882	1%
<b>Temperatura final calenta [°K]</b>	376,16	372,514	1%
<b>Calor intercanviada [W]</b>	1,40E+05	1,41E+05	3%

Taula 9: Comparació resultats analític/ANSYS

Vista l'anterior taula es pot considerar l'estudi com a correcte ja que els errors relatius són força petits. Així doncs, podem considerar l'estudi com a correcte.

Comprovada la validesa de l'estudi, s'ha procedit a extreure una sèrie de gràfics i imatges que poden ser d'interès per entendre com es dona l'intercanvi de calor al llarg del tub i la variació de temperatures que es dona.

A les següents figures es pot veure la variació de temperatures del fluid fred i calent, en contacte amb els respectius tubs.

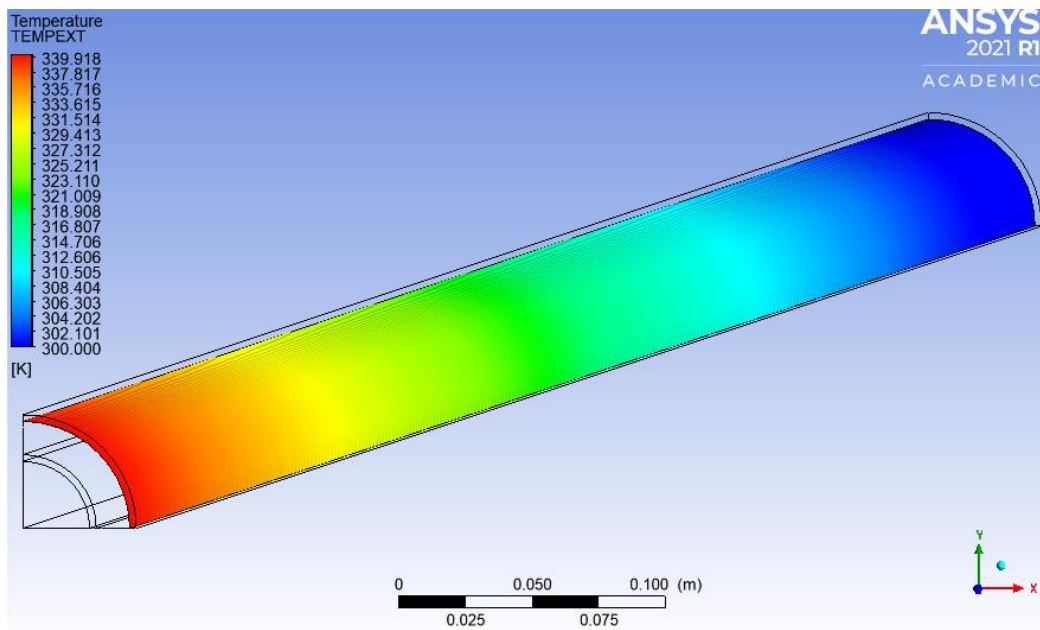


Figura 29: Variació temperatura aigua freda

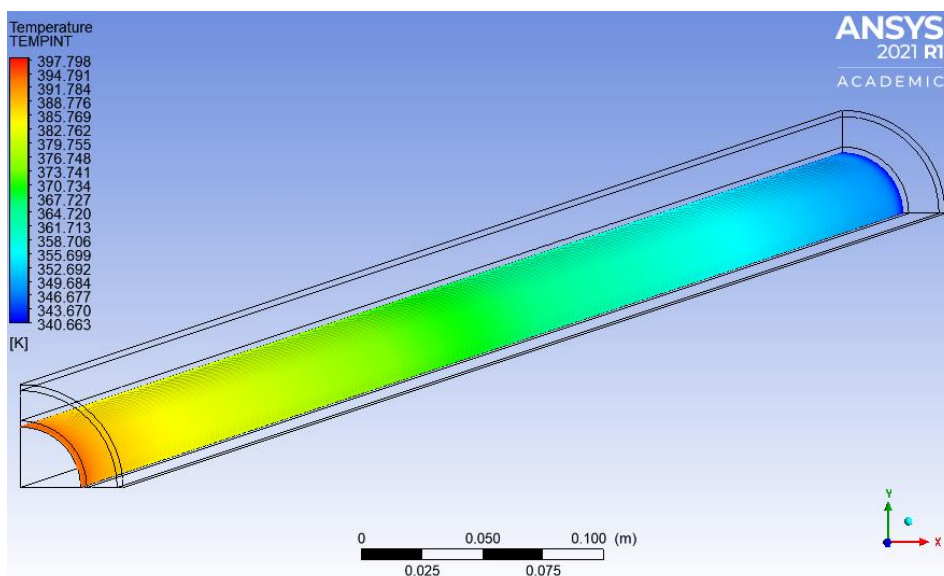


Figura 30: Variació temperatura aigua calenta



Exposada aquesta manera de veure el canvi de temperatura sofert pels dos fluids es presenta a la següent figura i gràfic, on es veu més explícitament com s'ha donat el canvi de temperatures al llarg del bescanviador.

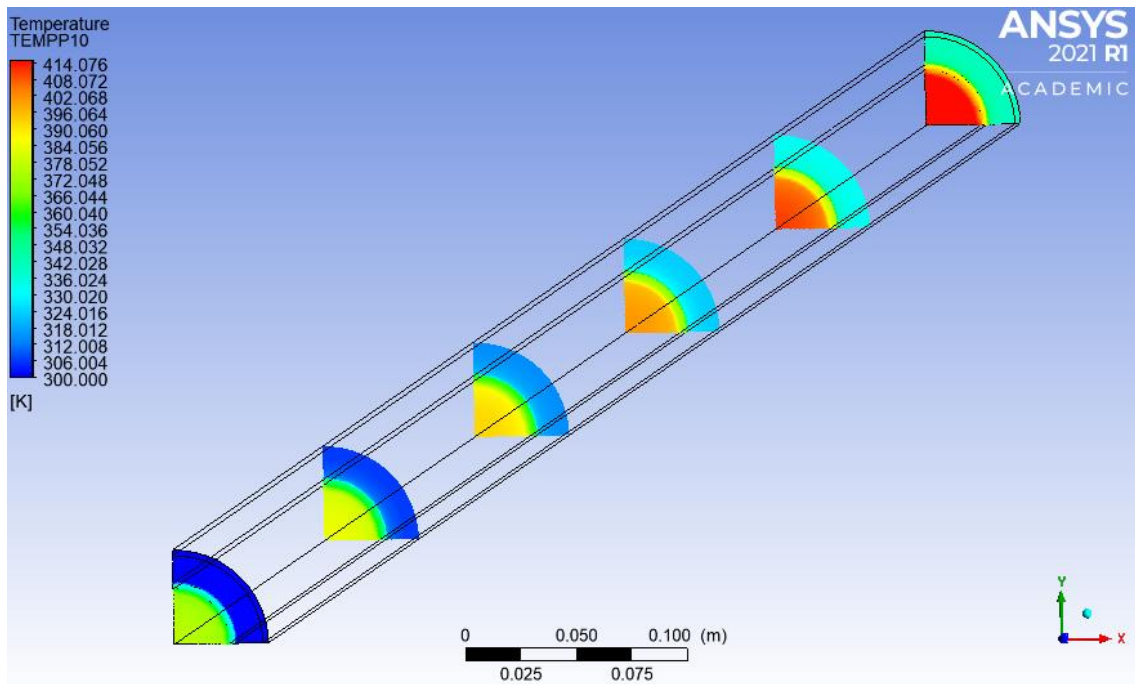


Figura 31: Distribució de temperatures a diferents plans transversals del tub

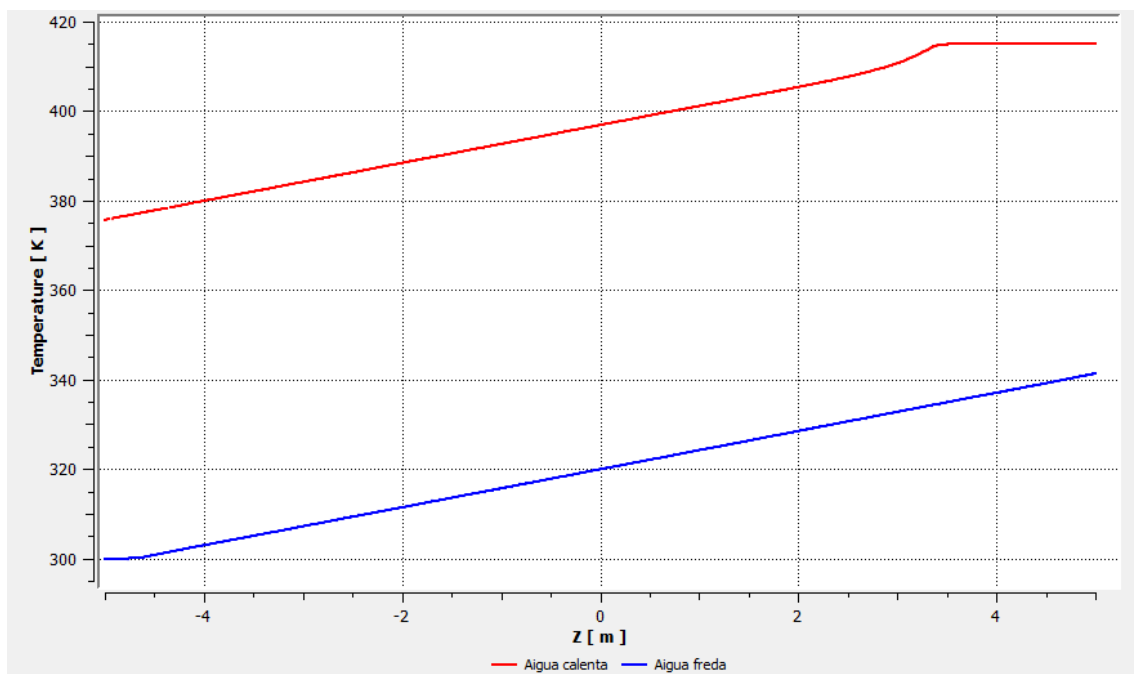


Figura 32: Gràfic de la variació de la temperatura dels dos fluids

Cal mencionar que la gràfica de variació de temperatura no té la forma exponencial que la teoria ens defineix. Això es deu a que la versió estudiantil no permet posar tants

elements, fent així que s'hagués de reduir el nombre d'elements al llarg del tub, baixant la precisió o la continuïtat de la variació al llarg del tub. Tot i això, com s'ha vist a la taula anterior, les variacions entre l'estudi teòric i el computacional és assumible per dir que s'ha efectuat un bon estudi.

De la mateixa manera, cal mencionar el fet que aquest gràfic no mostra exactament la variació de la temperatura dels dos fluids. Aquest gràfic mostra l'evolució de la temperatura al llarg de dues línies situades, respectivament, als volums corresponents als fluids freds i calents. En cas que es volgués graficar exactament l'evolució de la temperatura mitjana dels dos fluids caldria fer un gran nombre de plans i computar les seves temperatures mitjanes, de la mateixa manera com s'ha fet a per a les temperatures finals i inicials de cada fluid.

## 5. Planificació temporal

En aquest capítol del Treball de Final de Grau, s'exposa la planificació temporal que s'ha seguit durant la realització del treball. A la següent figura es veu exposat el diagrama de Gantt que mostra dita distribució.

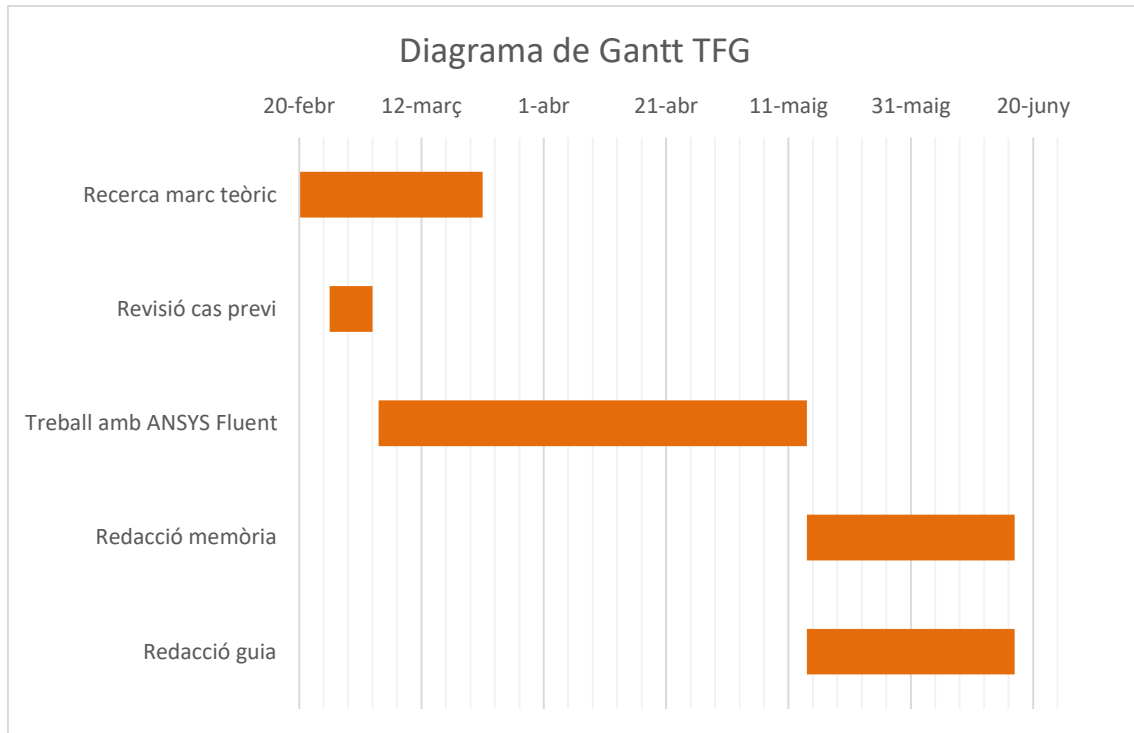


Figura 33: Diagrama de Gantt

## 6. Impacte ambiental i cost econòmic

Pel que fa a l'impacte ambiental, aquest TFG no està enfocat en la producció del quelcom material que impliqui una despesa de material o un impacte sobre el clima. Per aquest motiu l'impacte ambiental d'aquest TFG es limita a la despesa energètica durant el temps en el qual s'ha realitzat aquest treball.

En relació al cost econòmic, s'han computat en el pressupost les hores d'enginyeria destinades i el preu dels softwares que s'han usat. En la següent taula s'exposen la relació d'ítems que s'han tingut en compte a l'hora de fer el càlcul del cost econòmic.

Operacions	Unitats	Preu (€)/u	Total (€)
Llicència SolidWorks	5 mesos	58,00 €/mes	290 €
Llicència ANSYS	5 mesos	0€/mes(v. Estudiantil)	0
Llicència Office	5 mesos	22,00 €/mes	110 €
Ordinador	5 mesos	27,00 €/mes	135 €
Anàlisi	180 hores	20,00 €/h	3.600 €
Redacció memòria	80 hores	20,00 €/h	1.600 €
Redacció guia	50 hores	20,00 €/h	1.000 €
		<b>Total</b>	<b>6.735 €</b>

Taula 10: Cost econòmic

## 7. Conclusions

L'objectiu principal i inicial era elaborar una guia per als futurs estudiants de l'assignatura de Termodinàmica. Després d'haver comprovat els casos proposats, s'ha aconseguit finalment l'elaboració de dita guia.

S'ha començat per la realització d'un marc teòric que donés les bases necessàries per a després poder executar els problemes proposats amb el software. Posteriorment, s'han fet els càlculs analítics, amb els que posteriorment s'han comprovat les simulacions.

Un cop executades les diferents simulacions, s'han contrastat amb els càlculs previs que s'ha fet. Cal posar remarcar també el fet que, al tenir errors relatius menors al 4-5%, s'han donat per bones les simulacions. Aquest error en alguns casos es pot deure a:

- Discretització de les equacions de Navier-Stokes
- Versió estudiantil del programa, amb la limitació al nombre d'elements disponibles

No obstant això, s'ha considerat que ambdós casos eren correctes. D'aquesta manera s'ha procedit a la realització de la guia.

La guia, que es troba a l'annex, intenta mostrar, de manera detallada, els passos a seguir.

## Agraïments

M'agradaria aprofitar aquest espai per agrair l'atenció i ajuda del Rafael Ruiz Mansilla. Ha estat un plaer poder treballar amb ell. De la mateixa manera també m'agradaria mencionar a amics i familiars que m'han donat suport durant aquests mesos.

## Bibliografia

En aquest apartat es s'exposen les diferents fonts d'informació on s'han consultat els conceptes teòrics necessaris per a dur a terme el projecte. Val a dir que la majoria de conceptes s'han extret o bé del llibre de l'assignatura o dels apunts facilitats pels docents.

Pel que fa a les figures, les que no són pròpies s'indica la font.

- [1] Llibre "TRANSFERÈNCIA DE CALOR" Termodinàmica-240171 *Lluís Bonals*
- [2] <https://es.andilog.com/Definicion-coeficiente-friccion.html>
- [3] <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-coeficiente-de-transferencia-de-calor-por-conveccion-definicion/>
- [4] <http://alojamientos.us.es/deupfis1/Tecfluyc/CoefTrans.pdf>
- [5] <https://es.andilog.com/Definicion-coeficiente-friccion.html>
- [6] <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-nusselt-definicion/>
- [7] Apunts sobre convecció del professor Enrique Garcia Velo
- [8] <http://epsem.upc.edu/intercanviadorsdecalor/castella/E-NTU.html>
- [9] [Microsoft Word - DEI\\_07\\_comp.DOC \(hidroterm.com.ve\)](#)
- [10] [Article02.pdf \(upc.edu\)](#)
- [11] [Métodos numéricos aplicados a la mecánica de fluidos - Repositorio Institucional de Documentos \(unizar.es\)](#)
- [12] [pfc.dvi \(us.es\)](#)
- [13] <https://forum.ansys.com/>

## **Annex**

### **Guia ràpida d'ANSYS Fluent**

#### **Recull de captures de les capes límits i de les calors intercanviades en el cas d'estudi 1**