

Treball Final de Grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol:

**Modelització de dissipadors d'aletes per a mòduls termoelèctrics
en convecció de forçada**

Document: Número 1: Memòria i annexos

Alumne: Gerard Montserrat Estela

Tutor: Toni Pujol

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria (mes/any): juny 2017

Índex

1. INTRODUCCIÓ	4
1.1. Antecedents	4
1.2. Objecte	5
1.3. Requeriments i abast	5
2. METODOLOGIA.....	7
3. DISSIPADORS DE CALOR.....	9
3.1. Introducció	9
3.2. Utilització segons la transmissió de calor	11
3.3. Categories	13
3.4. Tipus segons mètode de fabricació	15
3.5. Tipus segons forma de les aletes.....	25
4. MÒDULS TERMOELÈCTRICS	28
4.1. Introducció	28
4.2. Procés de conversió de l'energia	30
5. ASSAIG EXPERIMENTAL	32
5.1. Dispositiu	32
5.2. Resultats	40
6. VALIDACIÓ DEL MODEL DE SIMULACIÓ	43
6.1. Metodologia de simulació	43
6.2. Eines de simulació	48
6.3. Resultats	51
7. DISSIPADORS ANALITZATS.....	64
8. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	80
8.1. Introducció	80
8.2. Discussió	82
10. RESUM DEL PRESSUPOST	139
11. RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	139
12. BIBLIOGRAFIA.....	140
ANNEX A: Càlculs.....	143

A.1. CÀLCULS RELACIONATS AMB EL MÒDUL TERMOELÈCTRIC	144
A.2. CÀLCULS RELACIONATS AMB EL VENTILADOR.....	145
A.3. CÀLCULS RELACIONATS AMB EL BALANÇ NET D'ENERGIA	145
 ANNEX B: Simulació en ANSYS	 147
B.1. GEOMETRIA	148
B.2. MALLAT	149
B.3. SETUP.....	150
B.4. SOLUCIÓ	153
B.5. RESULTATS	153
B.6. PARÀMETRES.....	154

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

En el laboratori de Lubricants de l'edifici P-II de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona es compta amb la presència d'un dispositiu experimental per a l'anàlisi de dissenys de dissipadors plans d'aletes que interactuïn amb un mòdul termoelèctric en condicions de convecció forçada (veure la *Figura 1*).

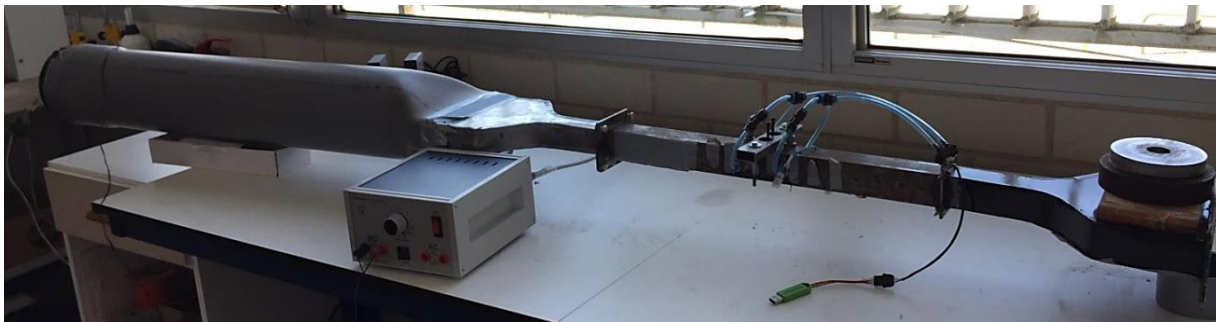


Figura 1: Dispositiu experimental per a l'anàlisi de dissenys de dissipadors d'aletes

Per aquest anàlisi, la transferència de calor és per convecció forçada ja que es fa circular un flux d'aire a través d'un tub d'acer mitjançant una força externa que es tracta, més concretament, d'un ventilador que porta incorporat el dispositiu en un dels seus extrems.

1.1.1. Peticionari

Àrea de Mecànica de Fluids del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona.

Carrer Maria Aurèlia Capmany nº61; 17071 Girona.

1.1.2. Necessitats del peticionari

Disposar d'una metodologia vàlida en ANSYS Workbench per modelitzar el comportament d'un dissipador d'aletes en convecció forçada quan està acoblat a un mòdul termoelèctric i permetre estudiar amb facilitat diferents dissenys amb l'objectiu de determinar el balanç net d'energia elèctrica.

1.2. Objecte

L'objectiu del projecte és validar un model del comportament tèrmic de dissipadors d'aletes amb convecció forçada aplicat a mòduls termoelectrics i proposar dissenys de dissipadors que millorin el balanç net d'energia (electricitat produïda menys electricitat consumida degut a la convecció forçada).

1.3. Requeriments i abast

1.3.1. Requeriments

En el disseny dels dissipadors proposats, s'ha tingut present diferents requisits del peticionari, per tal que es pugui dur a terme la seva fabricació i els quals es mostren a continuació:

- Els assajos dels dissipadors realitzats amb programari informàtic s'han d'efectuar segons condicions que siguin totalment realistes per a l'obtenció de resultats.
- El material de fabricació del dissipador serà l'alumini, ja que és un bon conductor de la calor i, a més, és resistent a la corrosió gràcies a la capa d' Al_2O_3 que té i que farà que no es vegi afectat per l'aire que circularà pel tub d'acer. Així mateix, en comparació amb altres tipus de metalls conductors tèrmics, l'alumini és el més econòmic.

1.3.2. Abast

Aquest projecte té un estudi previ realitzat per altres autors que es van encarregar de dur a terme mesures experimentals en el dispositiu de la *Figura 1*. Cal destacar que els resultats obtinguts del cas real són a través de realitzar l'experiment amb un dissipador de 12 aletes. En aquest projecte es tractarà de validar un model de simulació a través del programa ANSYS i posteriorment utilitzar-lo per proposar dissenys més eficients de dissipadors d'aletes.

La validació del model (apartat 6 del document: *Validació del model*) es complementarà amb el recull de les aproximacions analítiques obtingudes pels autors externs a aquest projecte,

que es podran trobar en l'apartat 5 d'aquest document (*Assaig experimental*). A més, es podran comptar amb els resultats obtinguts de les 120 simulacions amb ANSYS (apartat 8: *Resultats i discussió*), com a conseqüència de realitzar 12 dissenys de dissipadors (apartat 7: *Dissipadors analitzats*), i dels càlculs realitzats per a l'obtenció dels diferents valors de potència neta aconseguida pels diferents casos simulats. Aquests càlculs es recullen en l'*Annex A: Càlculs analítics*.

Així mateix, es presenten els plànols dels diferents dissipadors dissenyats en el *Document 2: Plànols*. Aquest projecte es complementa amb el corresponent pressupost de què costaria una unitat si es fabriquessin els diferents dissipadors d'aletes. A part, es disposa d'un annex en el *Document 3: Pressupost*, anomenat *Annex del Pressupost* en el qual es detalla el cost de redacció, confecció i utilització de diferents factors per a dur a terme el present projecte.

2. METODOLOGIA

El primer pas d'aquest projecte ha consistit a definir i validar una metodologia per simular l'acoblament tèrmic-fluídic en ANSYS Workbench específicament adaptat a mòduls termoelèctrics refrigerats amb aire per convecció forçada.

Per això, la primera tasca que es va dur a terme en aquest projecte va ser la presa de dimensions del disseny experimental que es té en laboratori de Lubricants a l'edifici P-II de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona per a després, a partir d'aquestes dimensions, incorporar la geometria real en format CAD (tenint en compte el dissipador de 12 aletes utilitzat) i llavors poder treballar amb aquest model en 3D amb el programari d'elements finits ANSYS Workbench.

A continuació, es va validar el model dissenyat amb el software de simulació ANSYS. Els resultats experimentals obtinguts per altres autors externs a aquest projecte s'han comparat amb els resultats obtinguts a la simulació.

Posteriorment, es va realitzar el model real en 3D només amb el programa de disseny ANSYS Design Modeler perquè a partir d'aquest model 3D és on es començaria a dissenyar els diferents dissipadors per aconseguir una eficiència global més alta del generador termoelèctric. Això es va aconseguir a través de definir uns paràmetres dimensionals fàcilment modificables del dissipador d'aletes. Així doncs, com a conseqüència d'anar canviant aquests paràmetres, es van aconseguir diferents tipologies de dissipadors d'aletes, on cadascun dels dissenyats, van mostrar un comportament tèrmic que es va visualitzar gràcies a l'ANSYS CFD Post.

El resultat de tot l'anterior va ser el disseny de 12 dissipadors diferents, on 6 d'aquests, han presentat un gruix d'aleta d'1 mm i els 6 restants un gruix d'1,5 mm. Es van escollir aquests tipus de gruixos com a conseqüència de la delimitació d'espai que ens dona el conducte per on circula l'aire forçat.

Una vegada es van obtenir tots els resultats dels dissipadors dissenyats en ANSYS, s'han comparat a partir de l'eina de càlcul EXCEL. En aquest punt s'ha pogut diferenciar de forma numèrica i gràfica els diferents dissenys. Això va portar a una discussió de resultats amb la qual es van escollir els millors dissenys i es van elaborar unes conclusions finals del projecte. A més, dintre de la tria dels millors dissipadors, es van anomenar amb quin tipus de fabricació s'elaborarien aquests i, a part, quin cost unitari podrien tenir.

Finalment, s'han elaborat uns annexos als quals s'hi afegeixen els càlculs realitzats al llarg del projecte (*Annex A: Càlculs analítics*) i l'explicació sobre com s'ha desenvolupat les simulacions (*Annex B: Simulació en ANSYS*). A part, s'ha elaborat uns plànols dels diferents dissenys elaborats (*Document 2: Plànols*), com així, del respectiu document de pressupost del projecte (*Document 3: Pressupost*).

Els següents apartats, 3 i 4, tracten de les generalitats de dissipadors i de mòduls termoelèctrics. A continuació, l'apartat 5, exposa l'assaig experimental. En l'apartat 6, es validarà el model de simulació amb comparació amb els resultats de l'apartat 5. Finalment, els resultats de les simulacions dels nous dissenys exposats a l'apartat 7, es mostren a l'apartat 8. Es finalitzarà el treball amb les conclusions (apartat 9). En els annexos s'inclou informació detallada de les tasques més importants que s'han dut a terme en aquest projecte.

3. DISSIPADORS DE CALOR

3.1. Introducció

En l'actualitat, un dissipador de calor ve molt associat amb la paraula informàtica ja que són elements claus pels ordinadors moderns. Sense un dissipador de calor, aquests ordinadors, no podrien treballar a les velocitats en què ho fan. Per entrar en més detall, el dissipador és l'encarregat de dissipar la calor que genera qualsevol processador d'un ordinador (CPU) a partir d'unes aletes formades sobre la base del mateix dissipador.

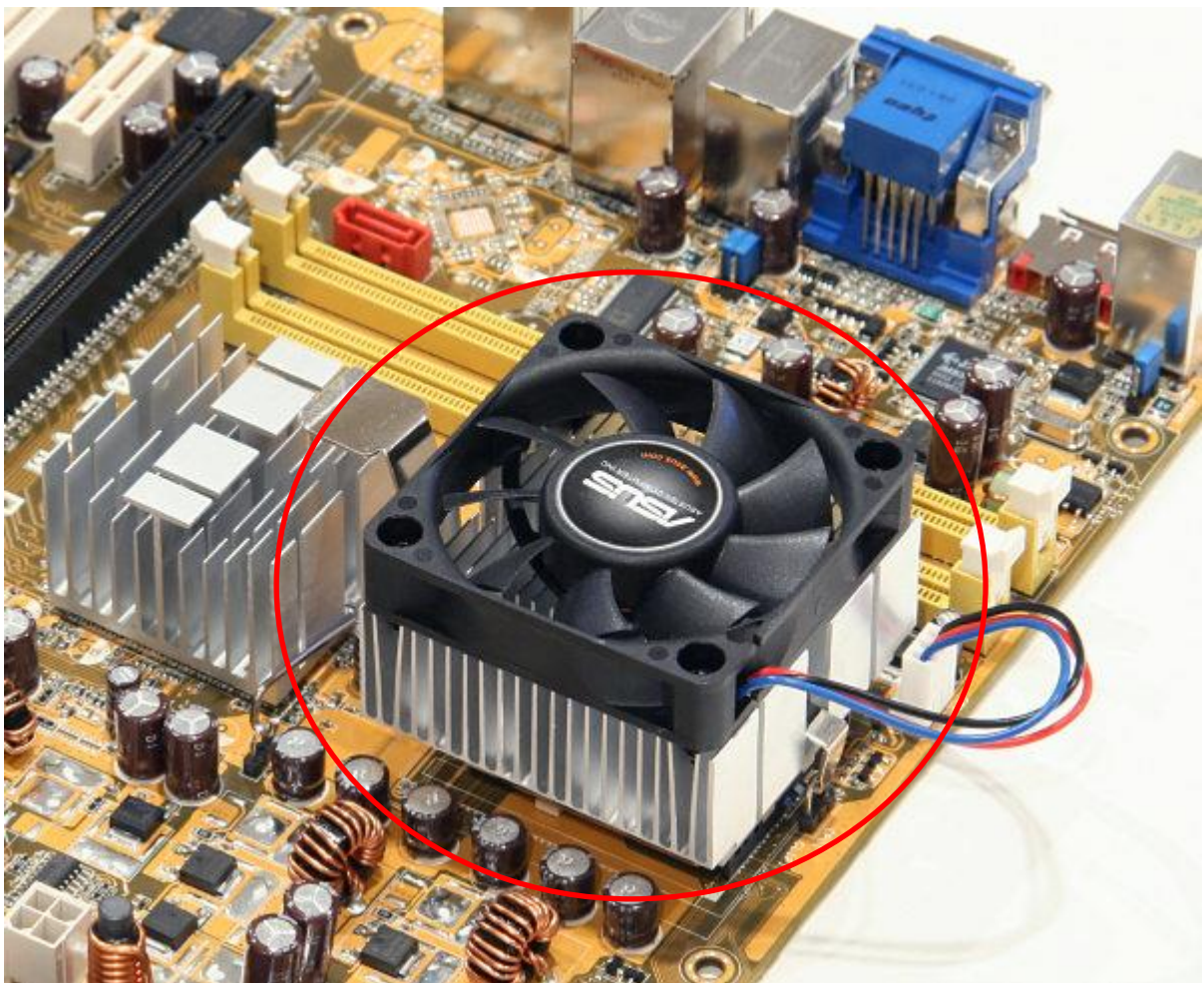


Figura 2: Exemple d'un dissipador de calor d'aletes aplicat en el processador d'un ordinador (Wasson, 2017)

Com es pot apreciar a la *Figura 2*, es visualitza un ventilador sobre el dissipador d'aletes. El ventilador és l'encarregat d'expulsar aquesta calor emesa pel processador i fer que aquest no pateixi tant tèrmicament i acabi fonent-se com a conseqüència de major calor.

En aquest projecte, es té un dissipador de calor d'aletes en contacte amb un mòdul termoelèctric. En el cas previ, el dissipador era l'encarregat de dissipar la calor emesa pel processador des de la base fins les aletes ja que el processador era l'element calefactor. Envers, en el cas estudiat, es té un mòdul termoelèctric que està en contacte, a través de la seva cara calenta, amb una font de calor que manté una temperatura constant (en el nostre cas serà de 250 °C). La calor és absorbida per aquesta cara calenta i és emesa per la cara freda. El dissipador d'aletes, a l'estar amb contacte amb la cara freda, dissipa aquesta calor i és refrigerat per un ventilador que fa circular aire a través del tub d'acer a on està col·locat.

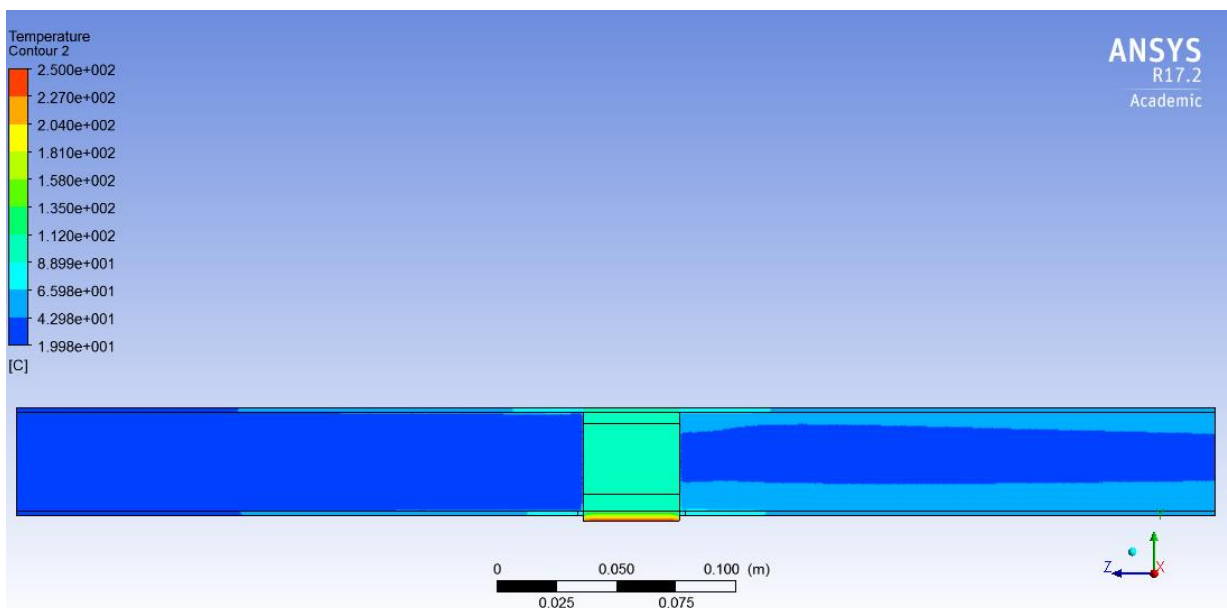


Figura 3: Exemple de dissipació del CAS 11-15-220 (nomenclatura dels casos comentada a l'apartat 7) dissenyat amb ANSYS on es pot veure la temperatura a la qual està sotmès el model

La *Figura 3* representa una vista lateral del model (tallat per la mitat, per tal de poder analitzar que succeeix en el seu interior) realitzat amb ANSYS. En la *Figura 3* es presenta el comportament tèrmic que està assolint el model en una determinada simulació realitzada en el CAS 11-15-220 (nomenclatura dels casos comentada més endavant en l'apartat d'aquest document). La superfície marcada amb blau, representa el flux d'aire que circula a través d'una secció tancada (tub d'acer). Existeix, també, una superfície marcada amb verd i, amb menor intensitat, de color vermell i groc. Aquesta superfície representa les plaquetes de llautó, el dissipador de calor d'aletes i el mòdul termoelèctric que es presentaran a partir de l'apartat 5 d'aquest document. Així mateix, la divergència de colors expressa un comportament tèrmic que està tabulat numèricament, segons la intensitat de la temperatura aplicada, al costat esquerre de la *Figura 3*. Més endavant, en l'*Annex B: Simulació en ANSYS*, s'explica amb quina extensió de l'ANSYS, s'aconsegueix obtenir aquestes animacions de comportament tèrmic.

La implantació d'aquest tipus d'aletes , porta com a conseqüència, un augment de l'àrea per la qual s'intercanvia la calor entre el dissipador i el propi medi. Encara que el flux de calor ha de travessar major quantitat de material com a conseqüència de la implantació de les aletes, es produeix un augment de la resistència tèrmica. Llavors, en moltes aplicacions, les aletes s'utilitzen per dissipar calor per tal d'augmentar la transmissió de calor fins l'entorn més fred.

3.2. Utilització segons la transmissió de calor

En la realització del projecte es té en compte dos tipus de transmissió de calor. El primer tipus és la que s'anomena convecció i la segona, conducció. A part, existeix un altre tipus de transferència de calor anomenada radiació, que no es tindrà en compte per la baixa temperatura assolida en el dissipador.

En aquest apartat del projecte es vol explicar els diferents tipus de transferència de calor amb els quals es pot dur a terme la utilització d'un dissipador de calor d'aletes. Per tant, la radiació, ho descartaríem com a mètode per transmetre calor i a l'hora utilitzar un dissipador de calor. Per radiació no tindria sentit la utilització d'un dissipador d'aletes. Per això, s'estudiaran tant la conducció com la convecció per aquests motius:

- La convecció apareixerà durant la circulació del flux aire que entrarà en contacte amb les aletes del dissipador.
- La conducció es produirà durant el contacte entre la cara freda del mòdul i la base del dissipador.

Cal a destacar que la convecció té tres derivacions: natural, forçada i mixta. En tots tres casos es pot utilitzar un dissipador de calor d'aletes.

3.2.1. Convecció

La calor es transmet a partir del moviment o la circulació de les molècules d'una substància fluida que sol ser líquid o gas. La convecció es pot dividir en 3 tipus :

- **Convecció natural:** el moviment del fluid es produeix com a conseqüència de canvis de densitat del fluid i per l'acció de la gravetat. La convecció natural comença quan el fluid es troba originalment estàtic però de sobte comença a moure's com a conseqüència de l'aparició d'una diferència de temperatura. Aquest moviment es deu als canvis de propietats locals del fluid produïts per la diferència de temperatura, cosa que comporta a la modificació de les forces de flotabilitat a la qual estava sotmès el fluid.
- **Convecció forçada :** pel projecte serà el tipus de transmissió de calor a avaluar ja que aquest tipus de convecció es porta a terme a través de forçar el moviment del fluid per efectes de factor externs com pot ser en el cas del projecte, un ventilador.
- **Convecció mixta :** relaciona la convecció forçada amb la convecció natural ja que a l'hora de produir-se un flux forçat, apareixen també forces de flotabilitat.

3.2.2. Conducció

La transmissió de calor es produeix com a conseqüència de posar dos cossos en contacte directe. El xoc entre les molècules dels cossos produeix que les partícules més energètiques li entreguin energia a les menys energètiques, produint un flux de calor des del cos amb més temperatura fins al cos amb menys temperatura.

En el conseqüent projecte, la cara freda del mòdul termoelèctric (explicat en el següent capítol) emetrà una calor que vindrà previnguda per la cara calenta, que serà l'encarregada d'absorbir la calor emesa per un element a alta temperatura com pot ser una sortida de fums o, com en l'experiment que s'exposa més endavant, una placa calefactora. Posteriorment, com que la base del dissipador estarà en contacte amb aquesta cara freda, es produirà la transmissió per conducció.

S'ha de destacar que la cara calenta i la placa calefactora també presentaran una transmissió de calor per conducció però aquesta transmissió no serà tant important com l'anterior ja que la placa calefactora sempre transmetrà una temperatura constant a la cara calenta del mòdul. Envers, la transmissió de la cara freda a la base del dissipador, no serà mai a una temperatura constant. Això es deurà al fet de comptar amb un dissipador que dissipï de forma precisa aquesta calor generada per la cara freda i de la circulació d'aire que refrigerarà el dissipador.

3.3. Categories

Una manera de classificar els dissipadors de calor és pel mecanisme de dissipació utilitzat per eliminar la calor. Els mecanismes de dissipació es poden englobar en 4 categories (Lee, 2017):

- **Dissipadors de calor passius:** són utilitzats en aplicacions de convecció natural o en aplicacions en les quals la dissipació de calor no depèn d'una generació de flux d'aire. El seu aspecte es presenta a la *Figura 4*.
 - Altura típica total del dissipador: 10 mm
 - Límit de càrrega normal: de 5 fins 50 W



Figura 4: Dissipador de calor passiu (Rodríguez, 2017)

- **Dissipador de calor semi-actius:** aprofiten els ventiladors existents en el sistema.
 - Altura típica total del dissipador: ≈ 10 mm
 - Límit de càrrega normal: de 15 a 25 W
- **Dissipador de calor actiu:** l'exemple seria els dissipadors utilitzats en convecció forçada. Tal i com es pot observar a la *Figura 5*, aquest tipus de dissipador interactuarà amb un ventilador (cas més típic) que li generarà la circulació d'un flux d'aire a través de les seves aletes.
 - Altura típica total de dissipador: de 35 a 80 mm
 - Límit de càrrega aplicada: 10 a 160 W



**Figura 5: Dissipador de calor actiu
(GD Rectifiers, 2017)**

- **Dissipació per refrigeració líquida:** La refrigeració líquida, com el seu nom indica, basa el seu funcionament en les propietats de conductivitat tèrmica dels líquids. Per començar, necessiten una bomba que faci que el líquid es mogui per tot el circuit, canonades, ràcords d'unió, dipòsit de líquid refrigerant i finalment un radiador amb ventiladors per dissipar la calor. Bàsicament, el líquid circula per un circuit que pot passar pel processador, targetes gràfiques, RAM i fins i tot la pròpia placa base. El líquid, gràcies a la seva alta conductivitat tèrmica, s'escalfa i alhora refreda els components pels quals passa, i quan aquest arriba al radiador, els ventiladors s'encarreguen de refredar-ho abans que torni a començar de nou el circuit. A la *Figura 6*, es presenta un exemple d'aquest tipus de dissipador:
 - Altura típica total del dissipador: de 10 a 20 mm
 - Límit de càrrega aplicada: molt elevada



**Figura 6: Dissipació per refrigeració
líquida (Ibertrónica, 2017)**

Aquest últim és de poca importància en el projecte ja que en l'estudi es centra en dissipadors refrigerats per aire.

3.4. Tipus segons mètode de fabricació

Els dissipadors de calor també es poden classificar segons els mètodes de fabricació. Els tipus més comuns de dissipadors de calor refrigerats per aire inclouen :

- **Estampació:** els dissipadors conformats per aquest procés solen utilitzar-se per refrigeració per aire en components elèctrics i ofereixen una solució de baix cost a problemes tèrmics de baixa densitat. Són adequats per la producció a gran volum. Comercialment, solen trobar-se en longituds de 10 cm i acostumen a fabricar-se a qualsevol mida. A més, els metalls utilitzats durant el procés d'estampació solen ser l'alumini o el coure. La *Figura 7*, exposa un seguit d'exemples de dissipador d'aletes per estampació:

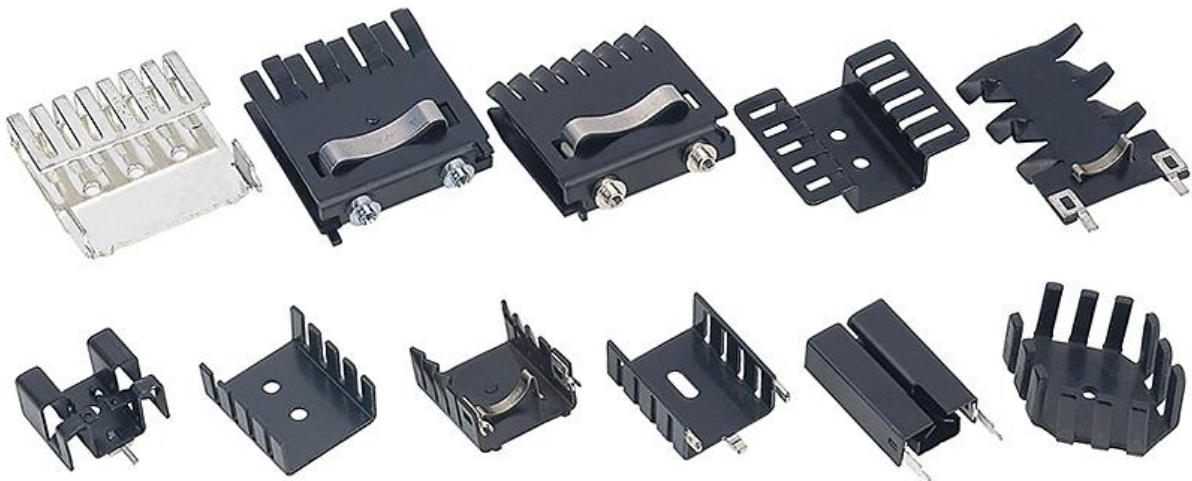


Figura 7: Dissipadors de calor conformats per estampació (Baknor, 2017)

- **Extrusió:** aquest tipus de dissipadors proporcionen una major gamma de solucions pel que fa la transferència de calor per conducció. La forma de les aletes, com es pot veure a la *Figura 8*, es crea a partir d'un bloc de partida al qual es fa passar a través d'una matriu la qual li dona la geometria desitjada al dissipador segons el nombre d'aletes i la forma de les aletes. Aquestes aletes permeten una major dissipació de calor a través d'un augment de l'àrea de superfície. A part, l'extrusió permet eliminar el cost i el temps elevat que comportaria fabricar aquests dissipadors a partir d'una mecanització però té unes certes limitacions de fabricació que es poden consultar a la *Taula 1*:

Taula 1: Condicions recomanades de fabricació per extrusió (T'Jollyn et al., 2017)]

Procés de fabricació	Material (conductivitat)	Separació d'aletes	Espessor d'aleta
Extrusió	Al (200 W/mK)	>3 mm	>1 mm



Figura 8: Dissipador de calor conformat per extrusió (LC Audio Technology, 2017)

Una altra característica important a tenir en compte en un dissipador de calor extruït, és la relació entre l'altura de les aletes per la separació entre aquestes. Una elevada relació condueix a un dissipador de calor amb major rendiment però tenint en compte uns certs límits. Aquest tipus de dissipadors tenen una relació aproximada de 6:1 però com a conseqüència de l'evolució del procés d'extrusió al llarg dels anys, aquesta relació pot oscil·lar de 8:1 fins a 15:1.

- **“Bonding”**: en cert mode, aquest mètode de fabricació es més nou que una extrusió o una estampació. La seva traducció seria “dissipadors de calor d'aletes unides” ja que les aletes són unides a una base d'alumini o de coure extruït a partir d'una resina epoxi farcida amb alumini (conductor tèrmic) o a través d'una soldadura, com es pot veure en la *Figura 9*. Aquesta resina epoxi és molt utilitzada en l'àmbit de fabricació perquè la seva resistència a la tracció pot arribar a superar els 350 kg/cm², cosa que el converteix en un adhesiu molt resistent.

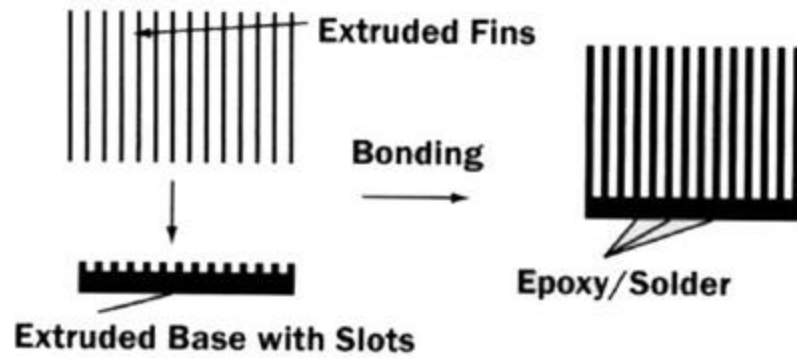


Figura 9: Mètode de fabricació de dissipadors de calor d'aletes per "bonding" (Iyengar, 2017)]

La relació entra l'altura de les seves aletes i la separació entre aquestes, pot arribar a ser de 60:1. Això comporta parlar d'uns tipus de dissipadors que seran ideals quan es vulgui fer circular un flux d'aire bastant elevat. A continuació, a la *Taula 2*, es presenta les condicions de fabricació per a dur a terme el procés de conformació per "bonding":

Taula 2: Condicions recomanades de fabricació per "bonding" (Iyengar, 2017)

Procés de fabricació	Material (conductivitat)	Separació d'aletes	Espessor d'aleta
"Bonding"	Al/Cu (200/385 W/mK)	>0.8 mm	>0,75 mm

El resultat final, seria el que es podria visualitzar a la *Figura 10*:



Figura 10: Dissipador de calor conformat per "bonding" (Thermocool, 2017)

No seria un procés tant ràpid com l'extrusió ja que aquí primer s'hauria d'extrusionar la base i posteriorment col·locar una a una les conseqüents aletes segons el dissipador dissenyat.

- **“Folding”**: la seva traducció al català seria “dissipador de calor amb aletes plegades”. Inicialment, es té una placa de metall (sol ser d'alumini o de coure) que és doblegada en diferents trams al llarg de la seva superfície. Posteriorment, la xapa ja doblegada, s'uneix a la base a través d'una soldadura tova o forta. Es mostra una representació gràfica d'aquest tipus de fabricació a la *Figura 11*:

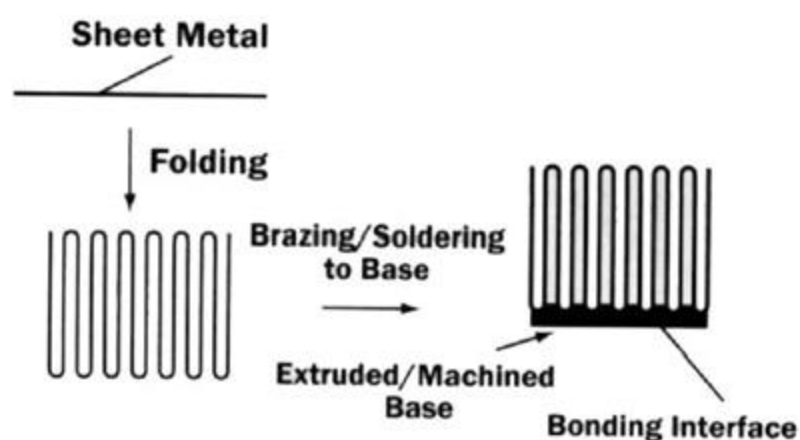


Figura 11: Mètode de fabricació de dissipadors de calor d'ales per “folding” (Iyengar, 2017)

Depenent de la distància entre les aletes i de l'altura d'aquestes, les puntes de les aletes poden ser planes o arrodonides.

La relació entre l'altura de les aletes i la seva separació, pot arribar a ser de 40:1. Així mateix, s'ha de tenir en compte les limitacions de fabricació esmentades a la *Taula 3*:

Taula 3: Condicions recomanades de fabricació per “folding” (T'Jollyn et al., 2017)

Procés de fabricació	Material (conductivitat)	Separació d'ales	Espessor d'aleta
“Folding”	Al/Cu (200/385 W/mK)	>1 mm	>0,2 mm

L'exemplificació de com seria un dissipador d'ales conformat per “folding” seria la mostrada a la *Figura 12*:



**Figura 12: Dissipador de calor conformat per “folding”
(Bluecore, 2017)**

Cal a dir que aquest tipus de fabricació permet tenir dissipadors de calor d'alt rendiment en aplicacions on no és gaire recomanable utilitzar el procés d'extrusió o el “bonding” com a conseqüència de la geometria aconseguir.

- **“Skiving”**: el procés de fabricació es basa en la utilització d'un sistema de control que a través d'una eina de tall realitza diferents talls a un bloc de partida que acostuma a ser d'alumini o de coure. Aquesta eina, a més de tallar, té una geometria que implica que quan realitza el tall al bloc de partida de metall, aixeca aquest tall realitzat implicant que es conformi una aleta tal i com es pot veure a la *Figura 13*. La traducció seria “tallar en fines capes”. És molt recomanable quan es necessita un gruix d'aleta bastant menor, però com a conseqüència, s'ha de tenir un bon sistema de control que pugui garantir el gruix desitjat.

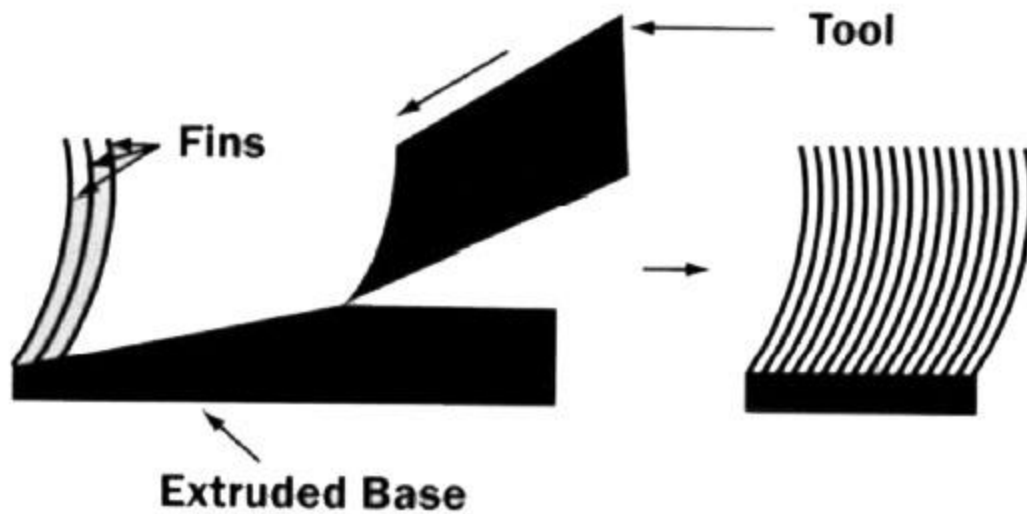


Figura 13: Mètode de fabricació de dissipadors de calor d'aletes per "skiving" (Iyengar, 2017)

La relació entre l'altura de l'aleta i la separació de les aletes pot arribar al voltant d'una relació de 25:1 i les limitacions a tenir en compte durant aquest tipus de fabricació són recollides a la *Taula 4*:

Taula 4: Condicions recomanades de fabricació per "skiving" (T'Jollin et al., 2017)

Procés de fabricació	Material (conductivitat)	Separació d'aletes	Espessor d'aleta
"Skiving"	Cu (385 W/mK)	>0,25 mm	>0,15 mm

La *Figura 14* presenta com seria el resultat final d'un dissipador fabricat a partir d'aquest mètode de fabricació:



Figura 14: Dissipador de calor conformat per "skiving" (Enertron, 2017)

- **Forja** : al principi, es tindria un bloc de metall de partida que posteriorment s'introduiria en un matriu tancada i com a conseqüència d'una pressió exercida resultaria la geometria demanada. El bloc de partida, inicialment, és obtingut per fosa i s'escalfa per tal de no exercir tanta força de pressió. A més, elimina tensions internes i porus provinents de la fosa (es produeixen microsoldadures per contacte durant l'escalfament), així com possibles esquerdes. Posteriorment, una vegada es té la peça creada per forja, passa per diferents tipus de mecanització com poden ser: polir la peça, tallar les aletes o mecanitzar la base. A la *Figura 15* es pot seguir gràficament el mètode de fabricació esmentat:

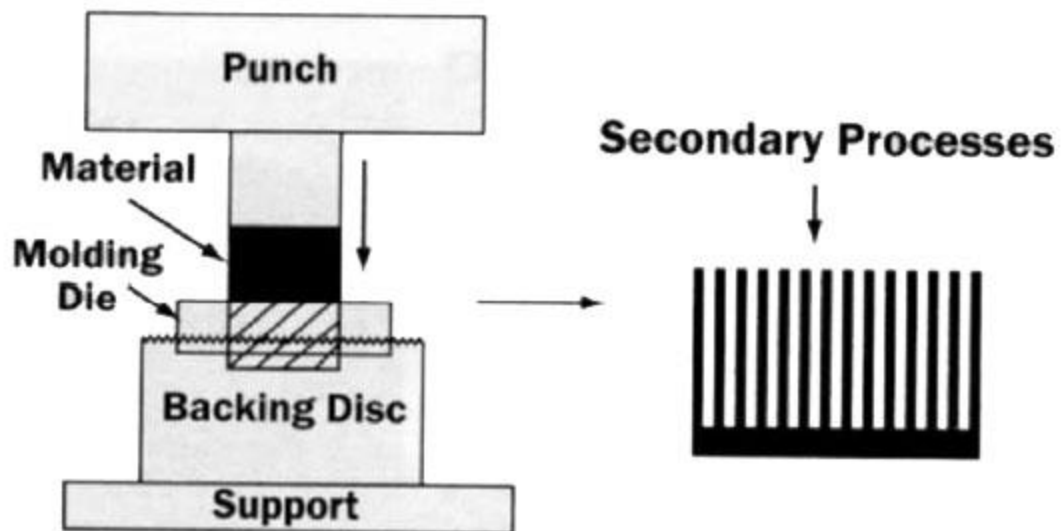


Figura 15: Mètode de fabricació de dissipadors de calor d'aletes per forja (Iyengar, 2017)

La relació de l'altura de les aletes amb la seva conseqüent separació, pot arribar a ser del voltant d'una relació de 50:1. Tant en aquest procés, com en els anteriors, s'haurà de seguir unes condicions de fabricació. La *Taula 5* les exposa:

Taula 5: Condicions recomanades de fabricació per forja [IYENGAR]

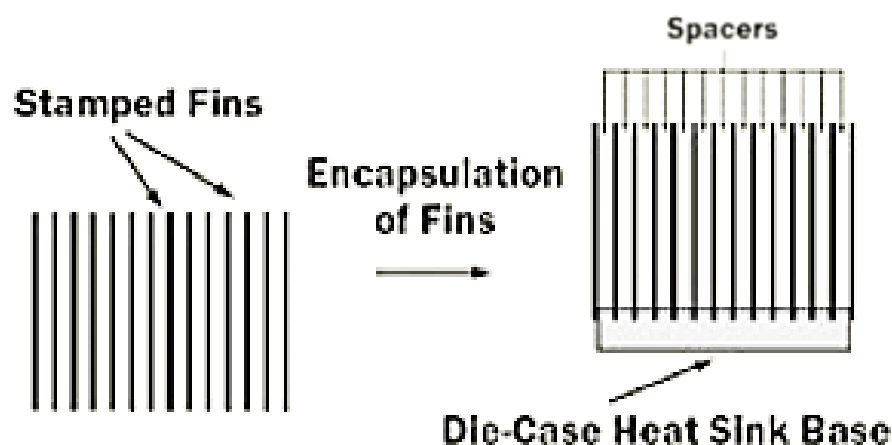
Procés de fabricació	Material (conductivitat)	Separació d'aletes	Espessor d'aleta
Forja	Al (200 W/mK)	>1 mm	>0,4 mm

Pot visualitzar-se el conseqüent resultat per forja a la *Figura 16*:



**Figura 16: Dissipador de calor conformat per forja
(Thermocool, 2017)**

- **“Modified die-casting”**: “die-casting” seria el conegut com a fosa en català. Anteriorment, els dissipadors es podien conformar a través d'un procés de fosa on s'introduïa el metall fos dintre d'un motlle que ja tenia la forma del dissipador desitjat. Com a conseqüència de no aconseguir unes relacions grans d'altura-espai de les aletes, s'ha modificat aquest procés de fosa i actualment s'utilitza més el procés de fosa modificada. En aquest procés, la base del dissipador és l'únic element fos dintre el motlle ja que les aletes es fabriquen prèviament i es col·loquen dintre el motlle separades per separadors per tal que el metall fos introduït no penetri entre les aletes. La *Figura 17* intenta demostrar aquesta explicació gràficament:



**Figura 17: Mètode de fabricació de dissipadors de calor per fosa
(Iyengar, 2017)**

La relació d'altura-espai de les aletes és la més elevada de totes i no hi ha una relació especificada. En canvi, pel procés normal de fosa, aquesta relació és al voltant de 6:1. Les limitacions de fabricació queden explicades a la *Taula 6*:

Taula 6: Condicions recomanades de fabricació per fosa i fosa modificada (Iyengar, 2017)

Procés de fabricació	Material (conductivitat)	Separació d'aletes	Espessor d'aleta
Fosa	Al/Aliatge zinc(200/≈116 W/mK)	>8,3 mm	>1,75 mm
Fosa modificada	Al/Aliatge zinc(200/≈116 W/mK)	>0,2 mm	>0,2 mm

El dissipador d'aletes, obtingut per fosa modificada, és el presentat a la *Figura 18*:



Figura 18: Dissipador de calor conformat per fosa modificada (Global Sources, 2017)

- **Mecanitzat** : inicialment es té un bloc de metall al qual a partir d'un procés d'arrencada de ferritja (fresa per exemple) es crea els espais entre les aletes. La *Figura 19* mostra l'exemple de fabricació. A vegades, l'arrencada de ferritja no és del tot neta, per això es necessita d'operacions secundàries per tal d'aconseguir un acabat correcte.

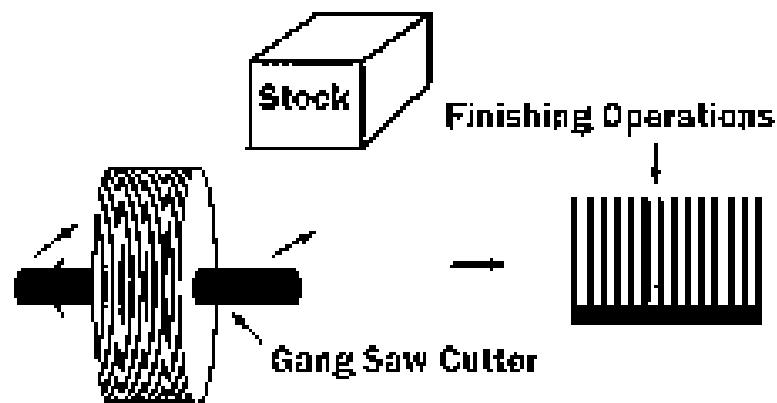


Figura 19: Mètode de fabricació de dissipadors de calor per mecanització (Iyengar, 2017)

La relació altura-separació de les aletes pot arribar a rondar al voltant de 50. La Taula 7 mostra les condicions a tenir en compte a l'hora de mecanitzar un dissipador d'aletes:

Taula 7: Condicions recomanades de fabricació per mecanitzat (Iyengar, 2017)

Procés de fabricació	Material (conductivitat)	Separació d'aletes	Espessor d'aleta
Mecanització	Al/Cu(200/385 W/mK)	>1 mm	>0,5 mm

Després de la mecanització i els seus respectius tractaments secundaris, el resultat final és el vist a la Figura 19:

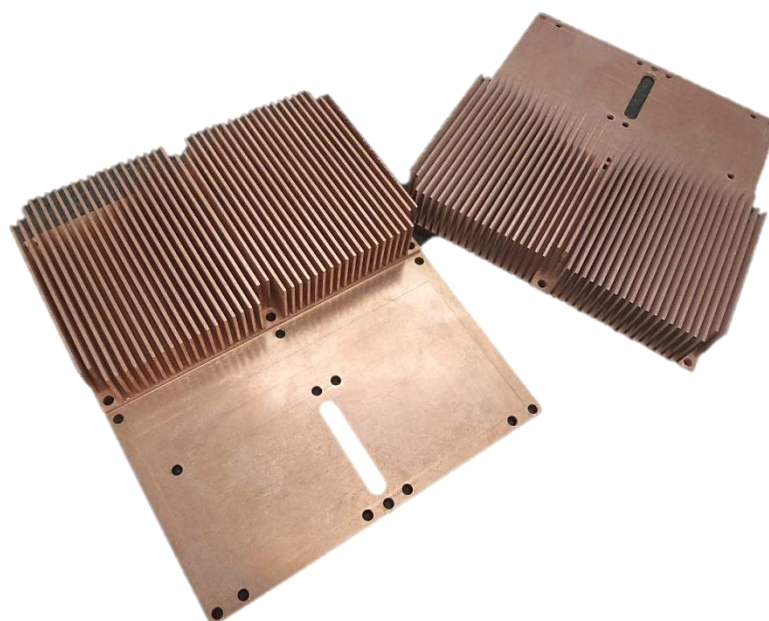


Figura 19: Dissipadors de calor conformatos per mecanització (Specmaster, 2017)

3.5. Tipus segons forma de les aletes

Per últim, s'exposa en la forma que es poden trobar comercialment els dissipadors de calor d'aletes. Hi han 3 tipus :

- **“Pin”**: són els dissipadors que presenten una forma d'aleta cilíndrica o una geometria que no es ben bé rectangular. El seu rendiment es significativament millor quan el fluid flueix axialment a través de les seves aletes. La geometria real es pot veure representada a la *Figura 20*:



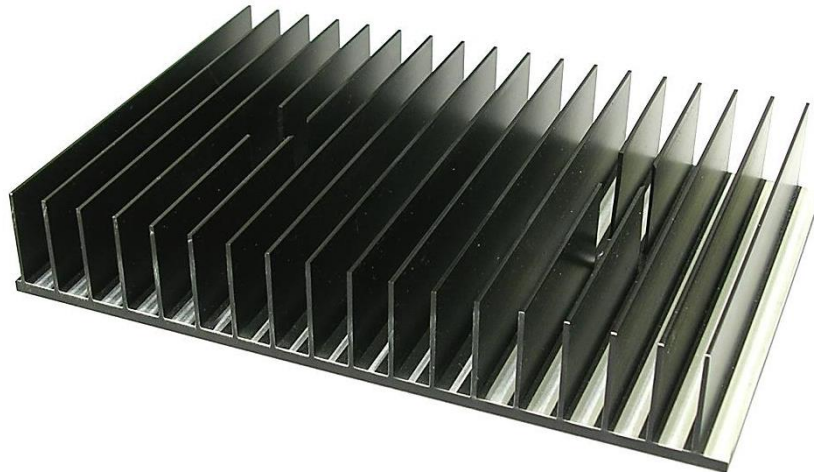
Figura 20: Dissipador de calor amb aletes del tipus “pin” (John, 2017)

Així mateix, a l'hora de fabricar aquest tipus de dissipador, s'ha de tenir en compte amb quins processos de fabricació es pot fabricar. Aquesta dada queda explicada a la Taula 8:

Taula 8: Certificació de fabricació d'un dissipador d'aletes “pin”

Procés de fabricació	Es poden dur a terme aletes “pin” ?
Estampació	No
Extrusió	No
“Bonded”	No
“Folding”	No
“Skiving”	No
Forja	Sí
“Modified die-casting”	No
Mecanització	No

- **“Straight”**: la traducció seria aletes rectes. Són els típics dissipadors d'ales rectangulars com el que s'exposa a la *Figura 21*. Són els més comercialitzats ja que són els que presenten una geometria més senzilla per poder fabricar. Tant en aquest tipus de dissipadors, com els que venen a continuació, presenten un millor rendiment quan el fluid circula de manera tangencial a través de les seves aletes.



**Figura 21: Dissipador de calor amb aletes del tipus “straight”
(Akoss, 2017)**

La *Taula 9* mostra diferents maneres de poder conformar un dissipador amb aletes rectes:

Taula 9: Certificació de fabricació d'un dissipador d'ales “straight”

Procés de fabricació	Es poden dur a terme aletes “straight” ?
Estampació	Sí
Extrusió	Sí
“Bonded”	Sí
“Folding”	Sí
“Skiving”	Sí
Forja	Sí
“Modified die-casting”	Sí
Mecanització	Sí

- **“Flared”** : la forma de les aletes és la mateixa que en el tipus d'ales rectes però aquí les aletes presenten una certa inclinació. La *Figura 22* mostra aquesta inclinació:



**Figura 22: Dissipador de calor amb aletes del tipus “flared”
(Qats, 2017)**

La fabricació d'un dissipador d'aletes rectes inclinades es pot dur a terme a partir d'aquests processos de fabricació que s'exposen a la *Taula 10*:

Taula 10: Certificació de fabricació d'un dissipador d'aletes “flared”

Procés de fabricació	Es poden dur a terme aletes “flared” ?
Estampació	No
Extrusió	Sí
“Bonded”	Sí
“Folding”	No
“Skiving”	Sí
Forja	Si
“Modified die-casting”	Sí
Mecanització	Sí

4. MÒDULS TERMOELÈCTRICS

4.1. Introducció

Els mòduls termoelèctrics són unes plaques que incorporen material semiconductor de tipus P i N, que per mitjà de l'efecte termoelèctric, són capaços de generar una diferència de potencial quan estan sotmeses a un flux de calor. Per això, és essencial disposar d'un focus calent i d'un focus fred, assolint una diferència de temperatures important entre les dues cares de la placa.

L'efecte termoelèctric es basa en un conjunt de tres coeficients:

- **Coeficient de Seebeck:** Thomas Johann Seebeck, al 1821, va realitzar un experiment en el que va observar que quan s'aplicava un gradient de temperatura a una unió de dos materials diferents, A i B, es creava una diferència de potencial en aquesta unió. Per tal d'aclarir l'experiment, s'adjunta la *Figura 23* per tal de fer més entenedora l'explicació:

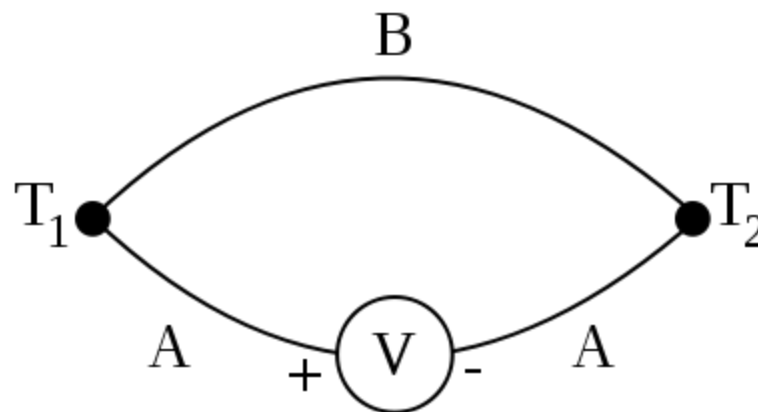


Figura 23: Circuit que representa l'efecte Seebeck
(García, 2016)

Durant l'estudi d'aquest fenomen va concloure que existia una certa relació entre el diferencial de temperatura que es proporcionava al sistema i la diferència de potencial que es creava, determinant l'equació següent (*Eq. 1*) :

$$\Delta V = S \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 1})$$

En l'*Equació. 1*, T. Seebeck determina que la diferència de potencial és igual al producte d'un coeficient S pel diferencial de temperatura del sistema. Aquest coeficient S es va

anomenar coeficient de Seebeck. Pel que fa la unitat de mesura, aquest coeficient es mesura en $V \cdot K^{-1}$.

La cèl·lula termoelèctrica estudiada al llarg del document es basa en aquest efecte. A partir d'aplicar-li una diferència entre les seves cares, s'aconsegueix crear una diferència de potencial.

- **Coeficient de Peltier:** posteriorment, l'any 1834, Jean Charles Athanase Peltier va descobrir que l'experiment de T. Seebeck també funcionava en sentit invers. És a dir, J. Peltier va observar que quan s'aplicava un corrent elèctric, com es mostra a la *Figura 24*, al sistema exposat anteriorment, una de les unions alliberava calor, mentre que l'altra n'absorbia.

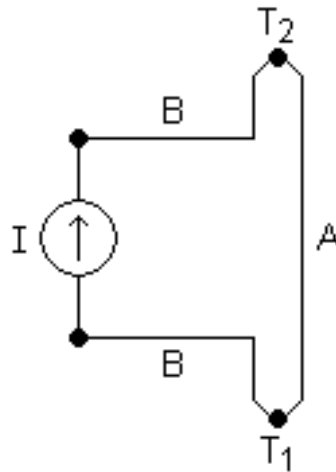


Figura 24: Circuit que representa l'efecte Peltier
(Omegatron, 2017)

Així doncs, va definir un coeficient per avaluar aquesta situació amb la següent expressió (Eq. 2):

$$\pi = \frac{I}{q} \quad (\text{Eq. 2})$$

On π és el coeficient de Peltier, I és la intensitat del corrent elèctric que hi circula i q és el flux de calor del sistema. La unitat de mesura és en $A \cdot W^{-1}$.

- **Coeficient de Thomson:** Al contrari del coeficient de Seebeck i Peltier, William Thomson va concretar un coeficient amb el que es pot definir directament per un únic material. Va determinar que quan existeixen simultàniament un gradient de temperatura i

un corrent elèctric, hi ha una generació o absorció de calor en cada segment del material considerat individualment.

L'equació que ens ajuda a definir aquest coeficient és (Eq. 3):

$$Q = I \cdot \Delta T \cdot \tau \quad (\text{Eq. 3})$$

On Q és el flux de calor del sistema, I és la intensitat del corrent elèctric que hi circula, ΔT és el gradient de temperatura, i finalment, τ és el coeficient de Thomson del material. Pel que fa la unitat de mesura d'aquest coeficient, aquest es mesura en $W \cdot A^{-1} K^{-1}$.

Thomson també va adonar-se que existia una relació entre els tres coeficients i va presentar les següents equacions per tal de relacionar-los (Eq. 4 i Eq. 5):

$$\pi = S \cdot T \quad (\text{Eq. 4}) ; \tau = T \frac{dS}{dT} \quad (\text{Eq. 5})$$

En la primera expressió (Eq. 4), es mostra que el coeficient de Peltier (π) és igual al producte del coeficient de Seebeck (S) per la temperatura (T).

En l'expressió següent (Eq. 5), es dedueix que la diferència de coeficient de Thomson (τ) dels dos materials és igual al producte de la temperatura (T) per la derivada del coeficient de Seebeck respecte la temperatura.

4.2. Procés de conversió de l'energia

Per a poder generar electricitat per efecte termoelèctric, cada mòdul ha d'estar format per un conjunt de molts "parells" P i N connectats elèctricament en sèrie (Figura 25). Cadascun d'aquests parells estan formats per un material semiconductor de tipus P ($S > 0$) i un material de tipus N ($S < 0$), units per un material conductor (del qual es suposa nul el seu poder termoelèctric).

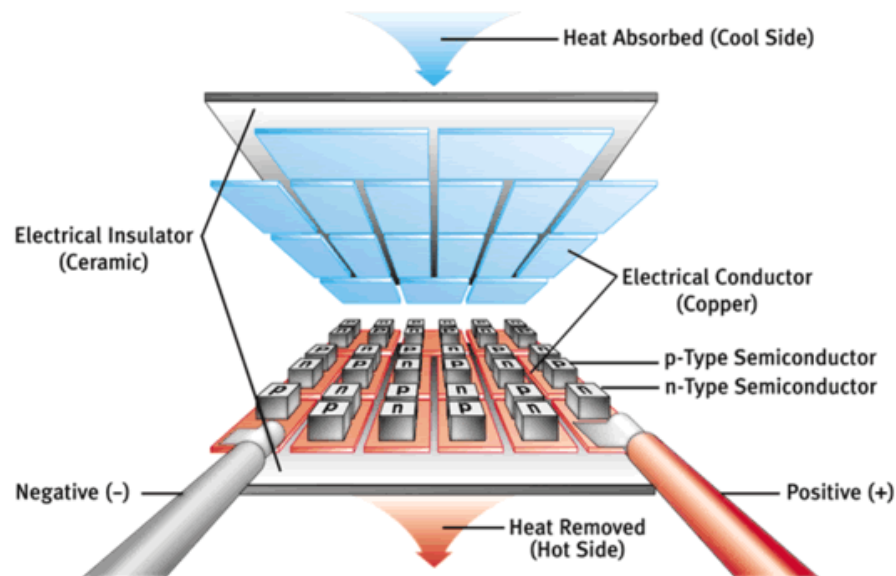


Figura 25: Interior d'un mòdul termoelèctric basat en l'efecte Peltier (Peltier Modules, 2017)

Les dues branques (P i N) del parell i de tota la resta de parells que componen el mòdul es connecten elèctricament en sèrie i, per conseqüència, en paral·lel des del punt de vista tèrmic. Aquesta disposició permet optimitzar el flux tèrmic que travessa el mòdul i la seva resistència elèctrica.

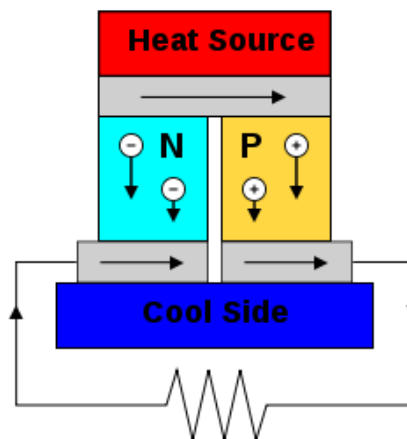


Figura 26: Representació del sentit del corrent (García, 2016)]

Per explicar-ho d'una forma entenedora, a la *Figura 26*, s'aprecia com es connecta un parell en el mòdul. Es pot observar com es connecten els dos materials emprant com a element d'unió les plaques (que són elements de captació de la temperatura) i, a l'hora, aquestes es connecten a una resistència elèctrica per tal de poder obtenir corrent. Es pot apreciar que aquesta disposició correspon fidelment a l'experiment de Seebeck, exposat anteriorment.

5. ASSAIG EXPERIMENTAL

5.1. Dispositiu

Actualment, en el laboratori de Lubricants en l'edifici del P-2 de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona, es compta amb aquesta prototip per a l'anàlisi de disseny de dissipadors d'ales en convecció forçada com es pot veure en la *Figura 27a*:

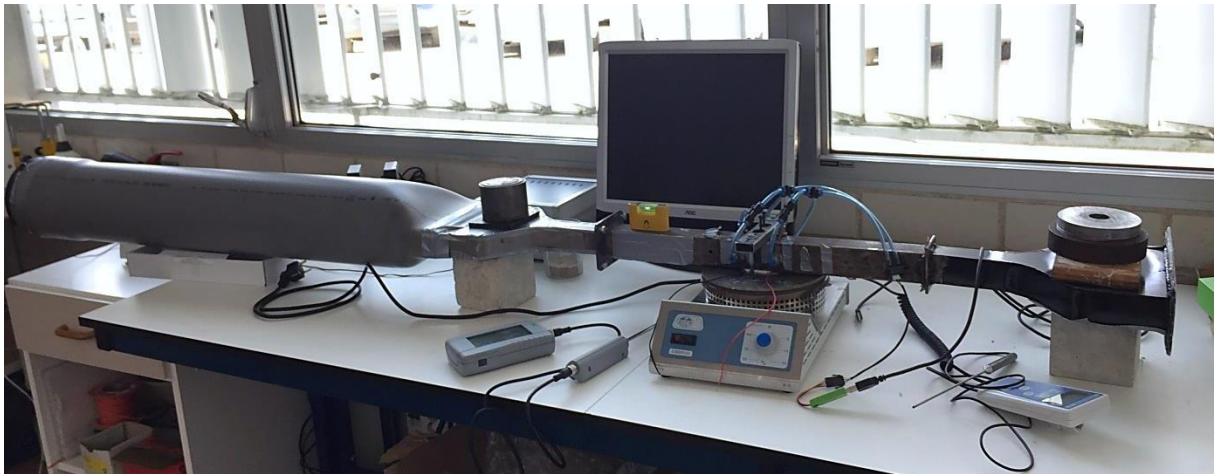


Figura 27a: Visualització del prototip amb tots els components que actuaran en l'anàlisi

Per poder-se dur a terme l'anàlisi de disseny de dissipadors, aquests es col·loquen en un forat que incorpora el tub d'acer en la seva cara inferior, tal i com es pot veure a la *Figura 27b*:

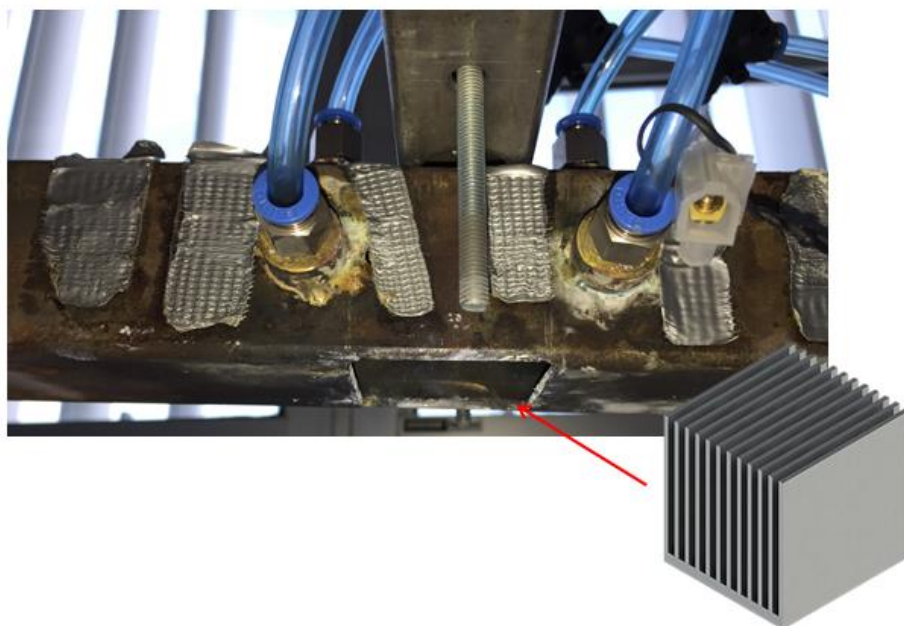


Figura 27b: Col·locació del dissipador dintre el tub d'acer pel posterior anàlisi

Per poder explicar amb claredat com els autors externs a aquest treball van desenvolupar la presa dels resultats analítics, primer es presenta a la *Taula 11* els diferents components elèctrics que conformen aquest dispositiu experimental:

Taula 11: Informació dels components utilitzats durant la presa de resultats experimentals

Component	Marca	Model	Descripció d'ús
Ventilador	HELLA MARINE	2 speed "Turbo" Fan 24V DC, Black Housing	Generar el flux d'aire.
Font d'alimentació	FREDERIKSEN	Power supply 1-12 V AC/DC	Alimentar elèctricament el ventilador.
Sensor de pressió diferencial	SENSIRION	SDP610-125 PA	Captar les pressions a les diferents tomes.
Adaptador del sensor de pressió diferencial	SENSIRION	Kit EK-P3 per sensor de pressió diferencial de la sèrie SDP600	Visualitzar les diferents pressions preses en el PC.
Placa calefactora	JP SELECTA	COMBIPLAC 3002302	Escalfar la cara calenta del mòdul termoelèctric.
Sensor de temperatura	JP SELECTA	SENSOTERM II 1001009	Mesurar la temperatura de referència a la placa calefactora.
Termoparell d'aïllament mineral-diàmetre 0.25, 0.5 i 0.75 mm	TC DIRECT	Codi : 406-475, 0.25 mm de diàmetre x 250 mm de longitud	Mesurar la temperatura de la cara freda i calenta del mòdul termoelèctric.
Sonda pel càlcul de velocitat i de temperatura de l'aire	E+E ELEKTRONIK	Veloport 20	Calcular la velocitat i la temperatura del flux d'aire en diferents punts del tub d'acer central.

Mòdul d'adquisició	NATIONAL INSTRUMENTS	NI cDAQ-9174	Monitoritzar les dades en l'ordinador.
Mòdul termoelectric	EVERREDtronics	TEG 126-40B	Generar electricitat a partir d'aplicar un flux de calor

A part d'aquests components, s'han de tenir en compte els diferents elements metàl·lics estructurals que es presenten a la *Taula 12* i que permeten la retenció i circulació del cabal d'aire:

Taula 12: Informació dels elements estructurals del model real

Element metàl·lic estructural	Tipus de metall	Tractament	Funció
Cons de contracció	Acer S235JR	Pintura	Elements d'enllaç.
Tub d'acer central	Acer S275JR	-	Circulació del cabal d'aire per la pressa de resultats.

No obstant, per la bona presa d'uns resultats analítics correctes, es requereix de la presència d'uns determinats materials que es poden consultar a la *Taula 13*:

Taula 13: Informació dels materials per la correcta presa dels resultats experimentals

Material	Marca	Referència	Descripció d'ús
Plaques de llautó	RECORD METALL-FOLIE	Messing CuZn 37 MS 63 150x2500x0,250 mm	Element d'obstrucció al flux d'aire i com element fixador del termoparell.
"Honeycomb"	PLASCORE	PC2 Polycarbonate Honeycomb	Redirigir el flux d'aire perquè vagi més uniforme.
Pasta tèrmica	-	-	Maximitzar la transmissió de calor entre elements de contacte.

Placa circular	-	Alumini 3003	Element transmissor de calor entre la placa calefactora i la cara calenta del mòdul termoelèctric.
----------------	---	--------------	--

Per últim, es presenta l'element metàl·lic imprescindible per dur a terme l'experiment. En aquest cas, el dissipador utilitzat en el càlcul analític ha sigut el conformat per 12 aletes. A continuació, a la Taula 14, es mostra informació sobre el tipus de dissipador utilitzat:

Taula 14: Informació del dissipador d'aletes

Element metàl·lic	Tipus de metall	Aliatge	Funció
Dissipador d'aletes	Alumini	Grup 6000 (0,5% Mg i 0,5% Si)	Dissipar calor de la cara freda del mòdul termoelèctric.

D'altra banda, les dimensions d'aquest dissipador són les presentades a la Taula 15:

Taula 15: Dimensions del dissipador de 12 aletes real que es té en el laboratori de Lubricants

Descripció	Dimensions (mm)
Altura	39,80
Amplitud	37,20
Longitud	40,00
Altura de les aletes	36,80
Gruix de les aletes	1,27
Separació entre les aletes	2,00

Un cop feta la introducció dels components per la presa de dades, elements estructurals i materials, es pot explicar com es munta el dispositiu experimental:

- 1- Com es mostra a la *Figura 28*, es preparen les diferents connexions entre les tomes de pressió del sensor de pressió diferencial i del tub d'acer i, a més, es connecta aquest últim amb l'adaptador per tal de poder visualitzar els resultats de les pressions en l'ordinador. Les tomes de pressió del tub són 6 i estan repartides 3 a 3 entre el que seria l'entrada i sortida de flux d'aire en el dissipador d'aletes. Per tal de permetre la unió de les 3 tomes de pressió, tant a l'entrada com a la sortida, per la posterior connexió en les dues tomes d'entrada del sensor de pressió, es necessita uns connectors neumàtics que fan convergir les pressions analitzades. Al final, aquestes dues tomes de pressió del

sensor, conflueixen en una sortida elèctrica que empra una lògica de comparació entre ambdós ports de pressió.

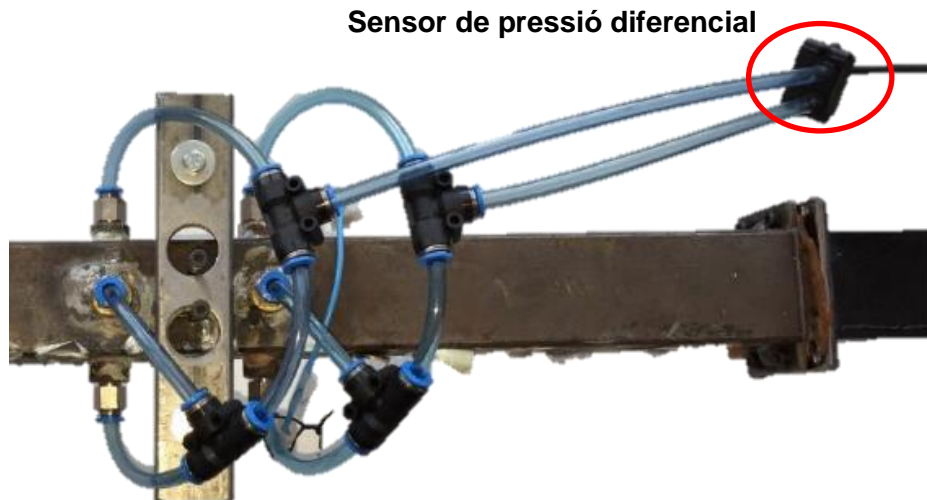


Figura 28: Unió de les tomes de pressió del tub d'acer amb el sensor de pressió diferencial

- 2- Posteriorment, s'introdueix el dissipador d'aletes dintre el forat realitzat a la part inferior del tub d'acer, tenint prèviament en compte, la quantitat de plaquetes de llautó que s'hauran de tallar per aconseguir el gruix necessari per tal d'impedir el pas d'aire per sobre i pels costats del dissipador (el dissipador va incorporat just a la mateixa altura on quedaria la cara inferior interna del tub d'acer). Conjuntament, aguantant el dissipador, s'afegeix a sota d'aquest la placa calefactora i el respectiu mòdul termoelèctric. La placa calefactora consta d'una placa circular d'alumini amb les mateixes dimensions que aquesta i la qual compta amb dos forats roscats per tal de poder introduir uns cargols que subjectaran i fixaran la corresponent placa circular, el mòdul termoelèctric i el dissipador d'aletes. Cal destacar, que sempre, la placa circular, estarà amb total contacte amb la placa calefactora per tal de poder propiciar la transferència de calor a la cara calenta del mòdul. A part, també es compta amb dos cargols que es podran trobar a la cara superior del tub d'acer i que fan d'element fixador del dissipador perquè aquest també estigui comprès per dalt. Així mateix, s'introdueix una pasta tèrmica entre el mòdul termoelèctric i la placa circular i entre el mòdul termoelèctric i el dissipador perquè així la propagació de calor sigui més òptima. A continuació, es visualitza com quedaria el conjunt a la *Figura 29*:

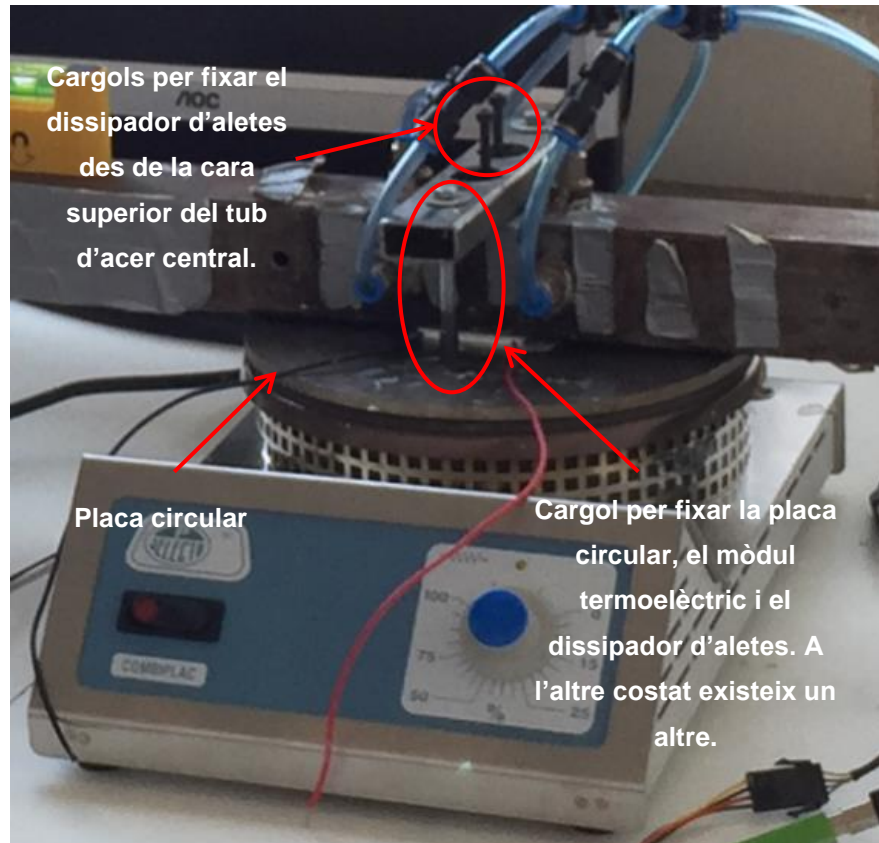


Figura 29: Conjunt placa calefactora-placa circular-mòdul termoelèctric-dissipador-tub d'acer central

Per tal de poder fer funcionar correctament la placa calefactora, s'haurà d'incorporar a la placa calefactora el sensor de temperatura per tal que aquesta tingui una temperatura de referència per la qual pugui començar a escalfar i adquireixi la temperatura desitjada.

- 3- Es retalla una placa de llautó com la que es pot observar a la *Figura 30*. S'ha de retallar perquè tingui les mateixes dimensions que la base del dissipador. Posteriorment, se li fa un tall que no acabi de tallar totalment la placa per tal de poder introduir la punta exposada del termoparell dintre aquest tall. Després, es descargola una mica els dos cargols fixadors de la placa circular, del mòdul termoelèctric i del dissipador, per tal de poder introduir entre el dissipador i el mòdul termoelèctric aquesta placa de llautó amb el tall corresponent per la introducció de la punta exposada del termoparell.



Figura 30: Plaques de llautó (CuZn 37) utilitzat pel càlcul analític

Una vegada col·locat de forma correcta la placa de llautó amb la corresponent punta exposada del termoparell (*Figura 31*) entre el dissipador i el mòdul termoelèctric, es torna a cargolar els dos cargols esmentats anteriorment i d'aquesta manera s'aconseguirà analitzar la temperatura que hi haurà a la cara freda del dissipador d'aletes.

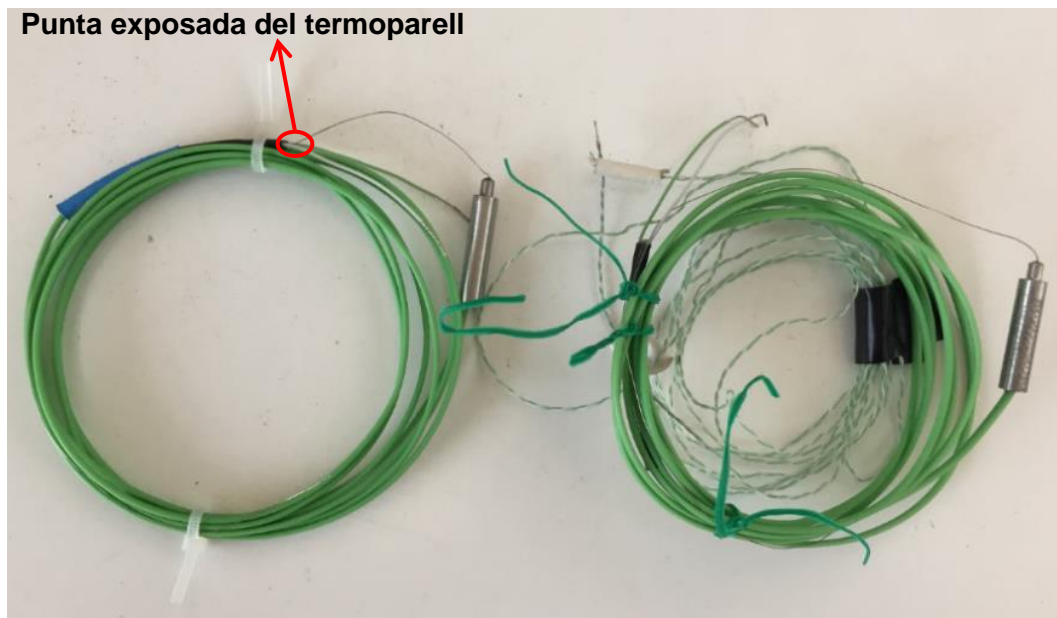


Figura 31: Termoparell utilitzat pel càlcul analític

- 4- El tub d'acer té diferents forats tapats a partir de cinta aïllant, tal i com es mostra a la *Figura 32*. Aquest forats serveixen per introduir la sonda pel càlcul de velocitat del flux

d'aire. Llavors, depenen on es vulgui col·locar la sonda, es treu el tros de cinta aïllant que tapa el forat i s'introdueix aquesta perquè calculi la velocitat del flux d'aire que circularà dintre el tub d'aire en aquell punt del tram en concret.

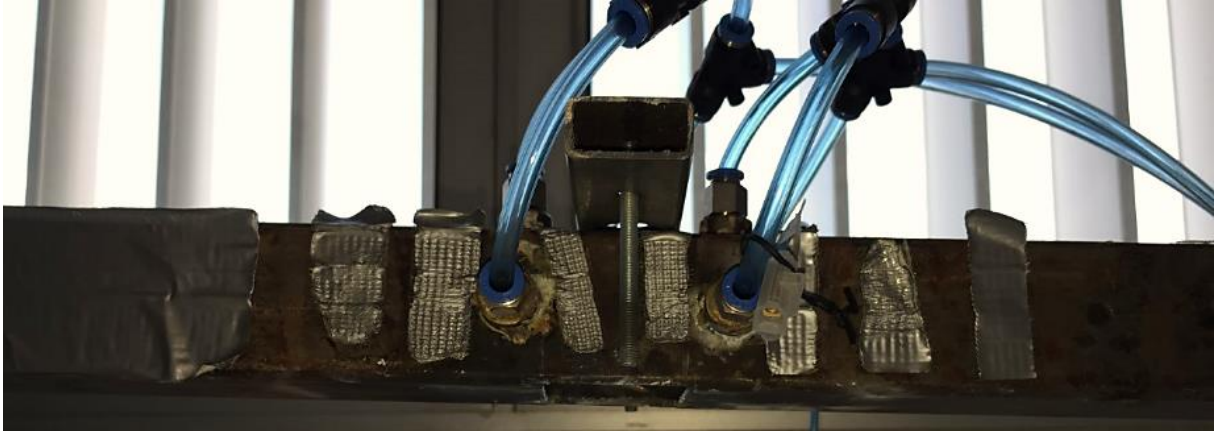


Figura 32: Visualització dels forats pel càlcul de cabal d'aire tapats amb cinta aïllant

- 5- Per acabar, una vegada s'han dut a terme els diferents punts anteriors, s'engega la font d'alimentació del ventilador i posteriorment es posa en marxa el ventilador per tal que comenci a fer circular el flux d'aire a través del tub d'acer central. En aquest cas, el ventilador realitza una acció d'aspiració ja que d'aquesta manera el flux d'aire és més alineat i és més fàcil de controlar.

A part d'això, abans de fer funcionar el ventilador, s'ha de posar el “honeycomb” dintre els cons de contracció, com es pot veure a la *Figura 33*, per tal que el flux sigui més uniforme:



Figura 33: Col·locació del “honeycomb” en els cons de contracció

5.2. Resultats

La presa de resultats experimentals a partir d'un dissipador de 12 aletes, es va dur a terme a partir de dos formes d'interpretar com estaria connectat el mòdul termoelèctric: en circuit obert o en circuit tancat. En tots dos casos, l'encarregat de generar una diferència de potencial era el mòdul termoelèctric. L'experiment que s'analitza aquí és el realitzat amb circuit obert. Per aquest motiu, l'experiment en circuit tancat només s'explica.

5.2.1. Experiment en circuit tancat

En el circuit tancat es té de la presència d'una resistència amb la qual es pot saber quina potència neta està generant el mòdul termoelèctric ja que aplicant la Llei d'Ohm (Eq. 6):

$$I = \frac{V}{R} \quad (\text{Eq. 6})$$

Es pot conèixer la corrent elèctrica (I) que circula a través de la resistència i , com a conseqüència, apareix l'anomenat Efecte Joule amb el qual s'obté la potència elèctrica (Eq. 7):

$$P = V \cdot I \quad (\text{Eq. 7})$$

Per tal de dur a terme l'anàlisi en circuit tancat, es van realitzar 8 experiments diferents on s'anava modificant de menys a més l'alimentació del ventilador per tal d'anar obtenint un cabal d'aire cada vegada major. El rang d'alimentació del ventilador estava entre 2-9 V. Dintre de cada experiment es van realitzar 11 assajos on s'anava modificant la resistència que es posava en el circuit tancat i on, també, es va calcular la velocitat mitjana de circulació de l'aire a partir de mesurar, amb la sonda explicada a la *Taula 11*, la velocitat de l'aire en diferents punts de la secció del tub d'acer en un forat localitzat a 11,75 cm de l'entrada d'aire del tub.

Els resultats demostraven com el mòdul termoelèctric tendia a augmentar la seva potència neta a mesura que s'anava augmentant la velocitat del flux d'aire. Tot i així, la velocitat de l'aire no és el factor que provocava directament aquest augment de potència. L'augment de velocitat feia tendir a que hi hagués més cabal d'aire circulant i que per tant la refrigeració de

les aletes sigues major. D'aquesta manera, el dissipador dissipava de forma més eficient la calor emesa per la cara freda del dissipador i per tant la diferència de temperatura entre les cares del mòdul termoelèctric era major.

5.2.2. Experiment en circuit obert

A diferència del circuit tancat, en aquest cas, no es tenia de la presència d'una resistència. Per això, els resultats finals que es van obtenir van ser les diferents diferències de potencial generades pel mòdul termoelèctric. El fet de realitzar l'experiment en circuit obert va servir per tenir una aproximació de com es comportaria el mòdul per diferents velocitats del flux d'aire circulant. A la *Taula 16*, es pot apreciar els resultats que es van obtenir a través de realitzar 8 experiments on es modificava l'alimentació del ventilador per tal d'aconseguir major velocitats de flux d'aire, com ja passava pel cas amb circuit tancat:

Taula 16: Resultats obtinguts en circuit obert

Voltatge aplicat al ventilador (V)	Velocitat mitjana aire (m/s)	Temperatura cara calenta mòdul (°C)	Temperatura cara freda mòdul (°C)	Diferència T entre cares (°C)	Voltatge proporcionat pel mòdul (V)
9	1,78	251	100	151	4,18
8	1,53	251	103	148	4,08
7	1,32	249	106	143	3,97
6	0,92	251	115	136	3,76
5	0,74	249	121	128	3,58
4	0,60	248	128	120	3,35
3	0,26	248	161	87	2,44
2	0,03	251	193	58	1,60

Observant la *Taula 16*, es veu com el mòdul tendeix augmentar la diferència de potencial generada a mesura que s'augmenta la potència del ventilador. Aquest fet succeeix en tots dos circuits, tant obert com tancat, però en aquest cas, és molt més fàcil de representar gràficament. A partir de la *Figura 34*, es representa quin seria el patró que seguiria el mòdul:

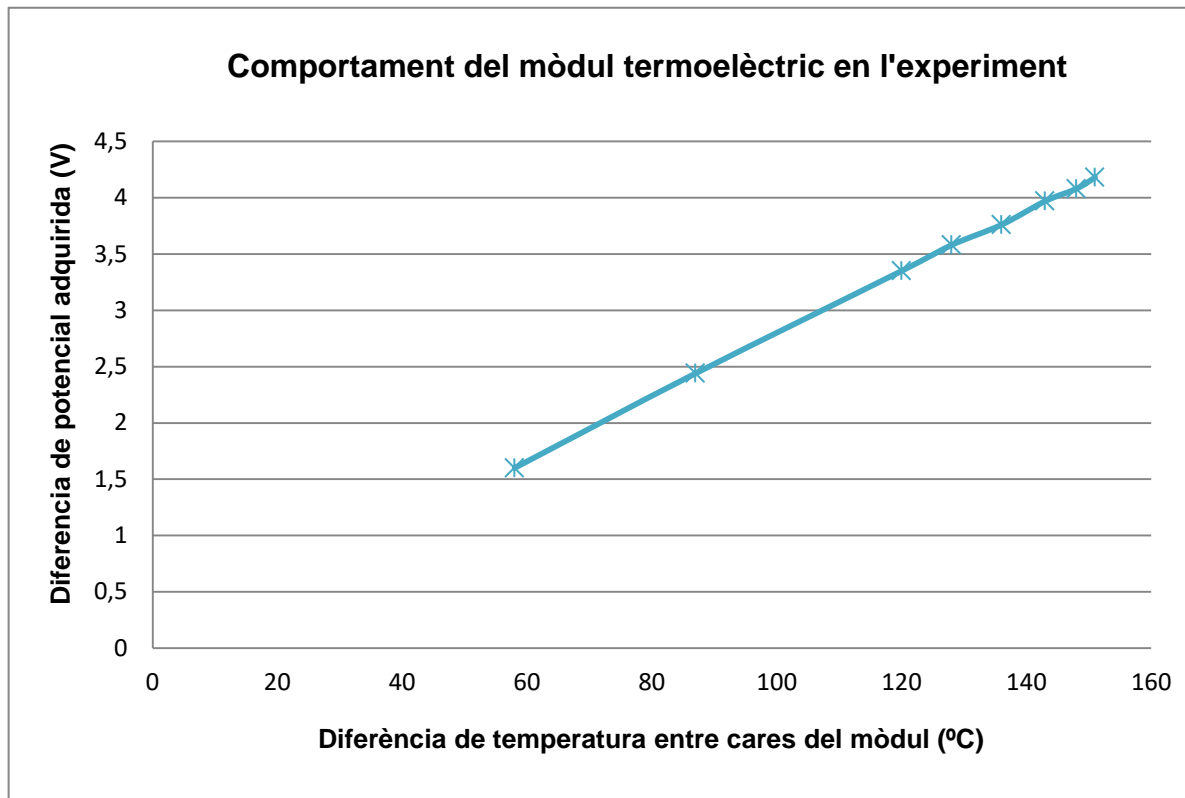


Figura 34: Comportament del mòdul termoelèctric durant l'experiment realitzat en circuit obert en el laboratori de Lubricants

D'altra banda, en l'apartat 6: *Validació del model de simulació*, s'explica perquè s'ha escollit comparar el cas real de 12 aletes simulat en ANSYS amb l'experiment realitzat en circuit obert i no en circuit tancat.

6. VALIDACIÓ DEL MODEL DE SIMULACIÓ

6.1. Metodologia de simulació

A l'hora de treballar amb el programa ANSYS Workbench no es tindran en compte diferents parts que conformen el dispositiu experimental ja que l'ANSYS permetrà simular només una petita zona (tal i com s'explicarà a l'apartat *Annex B : Simulació en ANSYS*). Així, la simulació només es centrarà en la part central del dispositiu experimental que es té en el laboratori i que es pot visualitzar en la *Figura 35* següent :



Figura 35: Part central del model a estudiar

Per treballar amb ANSYS, s'ha diferenciat les parts que conformaran el model en dos: sòlid i fluid. Les parts sòlides són els elements que retindran o que s'interposaran al cabal d'aire. Per altra banda, les parts fluïdes, són les que permetran obtenir com es comporta la circulació d'aire forçat.

Tal i com es mostra en la *Figura 36*, el contacte entre el cabal d'aire i el dissipador d'aletes es durà a terme justament entre el punt mig d'on es troben les tomes de pressió d'aire :



Figura 36: Tall en secció de la part central del model real que es té en laboratori de Lubricants

A continuació es llista les parts del disseny del dissipador de 12 aletes amb el qual es van dur a terme els diferents càlculs experimentals:

- Parts sòlides:
 - **Tub d'acer:** es pot visualitzar en la *Figura 37* i és l'encarregat de retenir el flux d'aire generat pel ventilador. Aquest tub té 6 tomes de pressió d'aire que estan repartides de manera que cada 2 d'elles es troben tant en la cara esquerra, com en la cara dreta i com en la cara superior del tub. A més, compta amb un forat fet en la seva cara inferior pel qual es pot col·locar els diferents dissipadors d'aletes a dissenyar o dissenyats anteriorment. Gràcies a aquestes tomes, es pot saber la pressió exercida pel flux d'aire que es té en circulació abans i després al contacte amb el dissipador d'aletes.



Figura 37: Tub d'acer del model real que es té en el laboratori de Lubricants

- **Dissipador d'aletes** : en la *Figura 38* es mostra l'element clau en l'estudi. S'ha optat que el dissipador estigui fet d'alumini. Cal destacar que al ser d'alumini s'aconsegueix obtenir un dissipador lleuger.

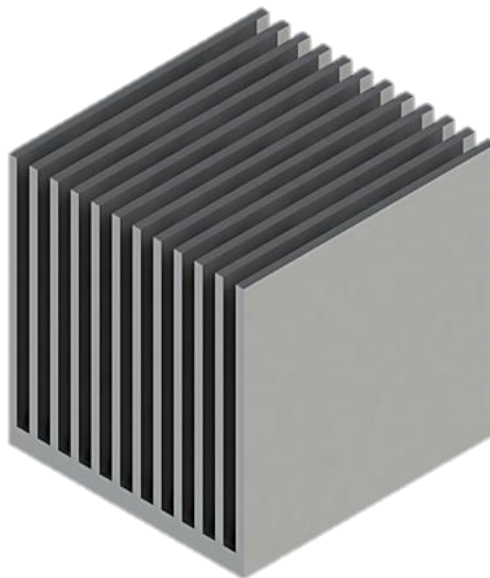


Figura 38: Dissipador de 12 aletes que es té en el laboratori de Lubricants

- **Plaquetes de llautó:** la única funció d'aquestes és la d'evitar el pas de l'aire per sobre i pels costats del dissipador ja que el disseny d'aquest no permet ocupar tot el volum al voltant de l'interior del tub d'acer. A continuació, en la *Figura 39*, es mostra com van col·locades:

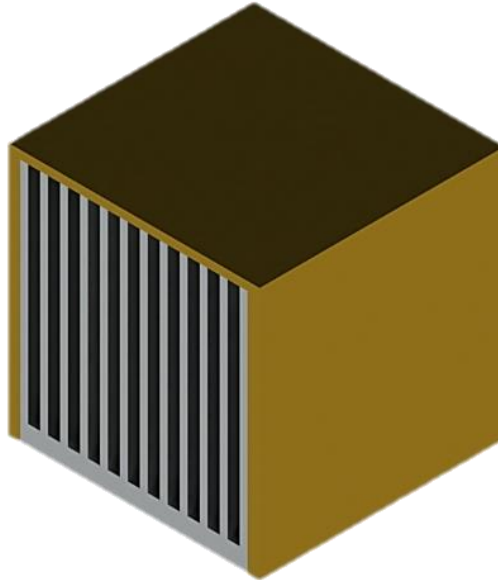


Figura 39: Plaquetes de llautó que es tenen en el laboratori de Lubricants

En base els dissenys que s'han realitzat per a un posterior anàlisi, aquests no comptaran amb les plaques de llautó laterals. S'entra en més detall en l'apartat 8 del document: *Resultats i discussió*.

- **Mòdul termoelèctric:** és l'encarregat de generar electricitat com a conseqüència de sotmetre'l a un gradient de temperatura. Té unes dimensions de 40x40x4 mm. A la *Figura 40* es pot veure on es disposa el mòdul:

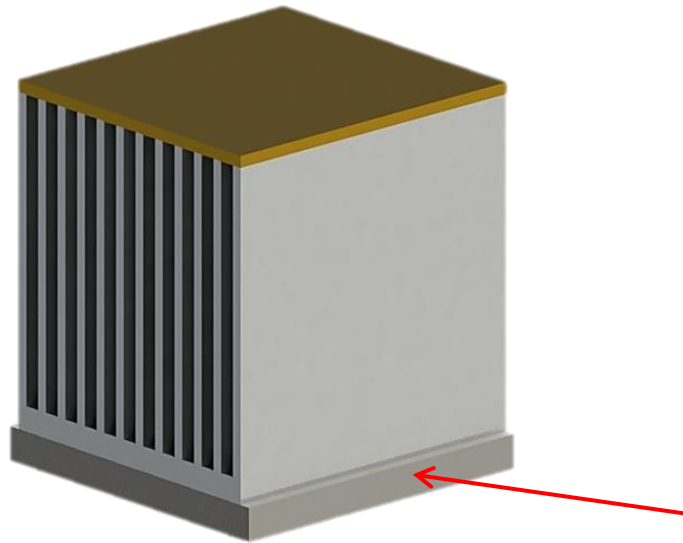


Figura 40: Mòdul termoelèctric en contacte amb el dissipador de 12 aletes

▪ Parts fluïdes:

- **Aire:** serà l'element clau perquè puguem desenvolupar la nostra simulació i veure com afecta en el dissipador d'aletes. Tal i com es pot veure en la *Figura 41*, el flux d'aire divergirà en les tomes de pressió i quedarà buit entre mig de les tomes com a conseqüència de la presència del dissipador d'aletes i de les plaquetes de llautó:

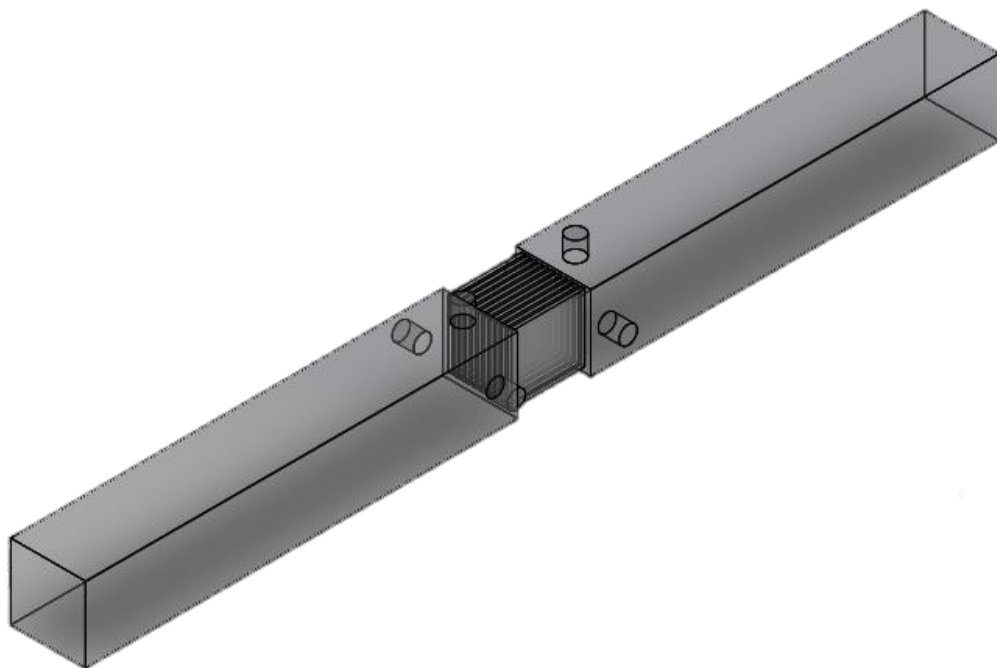


Figura 41: Flux d'aire que circularà a través del tub d'acer i del dissipador de 12 aletes

- **Volum de control** : com es pot observar en la *Figura 42*, el mòdul termoelèctric no té unes dimensions que puguin ocupar per complet el forat inferior del tub d'acer. Per això, s'anomena volum de control aquell flux d'aire que no actua amb les aletes del dissipador i que es troba al voltant del mòdul termoelèctric.

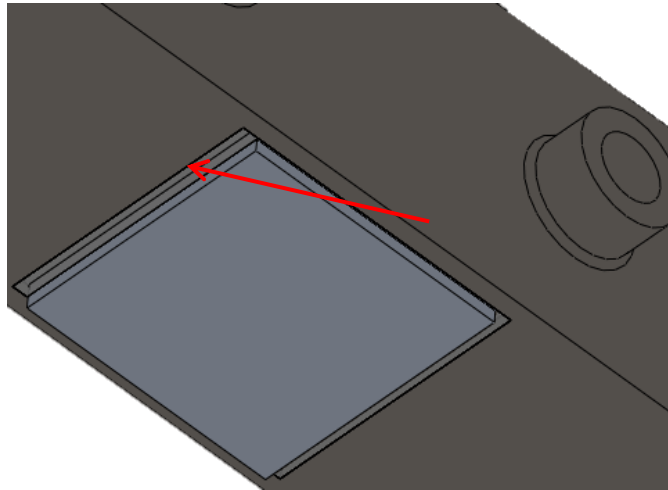


Figura 42: Volum de control al voltant del mòdul termoelèctric

6.2. Eines de simulació

Per tal de poder dur a terme el disseny dels dissipadors s'ha tingut que treballar amb dos tipus de software diferents. Un és un software CAD anomenat SolidWorks i és de gran utilitat a l'hora de crear peces mecàniques en 3D. Per altra banda, es té el software de simulació ANSYS que prediu com es comportarà o reaccionarà un determinat element sota un entorn real.

6.2.1. Eina de simulació: SolidWorks

A partir d'aquesta eina de creació de peces mecàniques en 3D, es van poder crear totes les geometries reals de la part central del model real, per així poder treballar des de l'ordinador i desenvolupar l'estudi del dissipador de 12 aletes. La versió SolidWorks utilitzada en aquest projecte és la 2016 tal com es pot veure en la *Figura 43*.

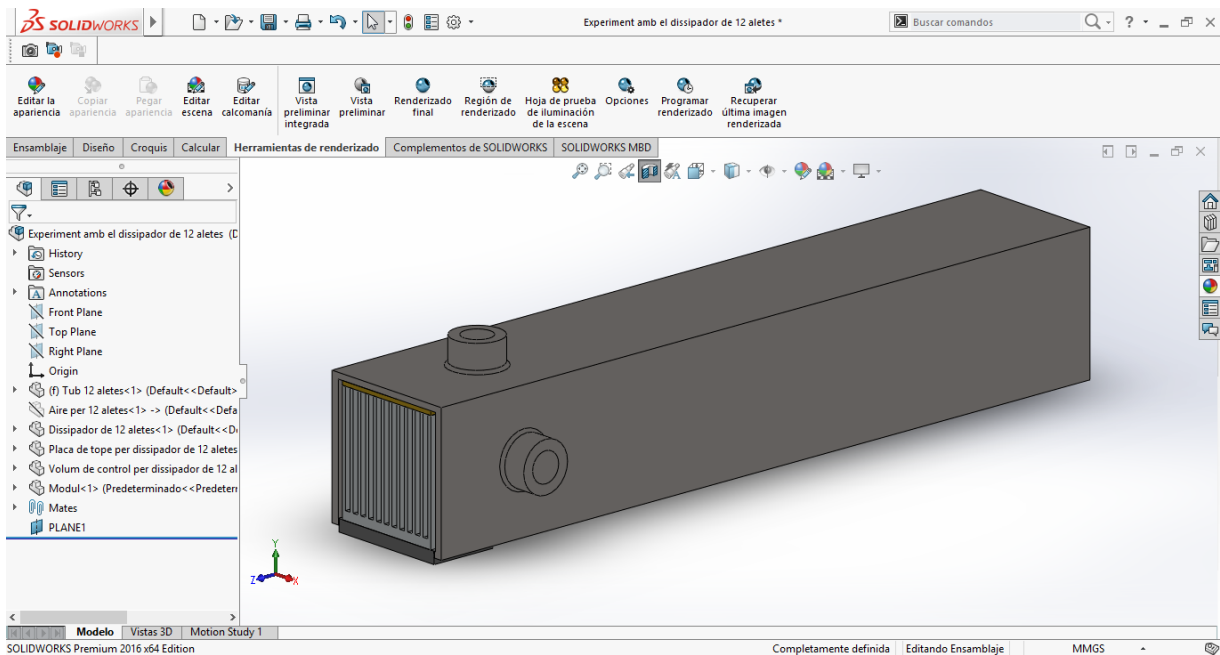


Figura 43: Geometria del model real realitzada amb SolidWorks 2016

L'explicació de la utilització del SolidWorks, només pel cas de 12 aletes, és perquè pels altres casos s'utilitzarà l'ANSYS Design Modeler per parametritzar la geometria i facilitar la simulació de dissenys diferents.

6.2.2. Eina de simulació: ANSYS

Pel que fa a l'eina de simulació ANSYS, aquesta permetrà poder validar si els dissenys són viables o no, és a dir, si els diferents dissipadors que es dissenyin, presenten un comportament tèrmic que influeixi a què la cara freda del mòdul termoelèctric dissipï de forma eficient la calor. Les versions ANSYS utilitzades en aquest projecte seran la versió ANSYS Workbench 16.2 i ANSYS Workbench 17.2. El motiu de la utilització d'aquestes dues versions és pel fet que a la pàgina web d'ANSYS no donaven l'oportunitat de poder descarregar la versió 17.1, la qual és la utilitzada en els diferents ordinadors de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona. Llavors, per tal de poder interactuar amb el tutor corresponent del projecte es va arribar a aquesta solució :

- Amb l'ANSYS Workbench 16.2 es realitzaria les diferents simulacions per tal que el tutor corresponent al projecte pogués obrir-los des del seu ordinador.

- Amb l'ANSYS Workbench 17.2, s'obriria tots aquells arxius provinents dels ordinadors de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona ja que amb la versió 16.2 no es podrien obrir aquells arxius de la versió 17.1.

A continuació, en la *Figura 44* es pot veure una geometria creada a partir de l'ANSYS:

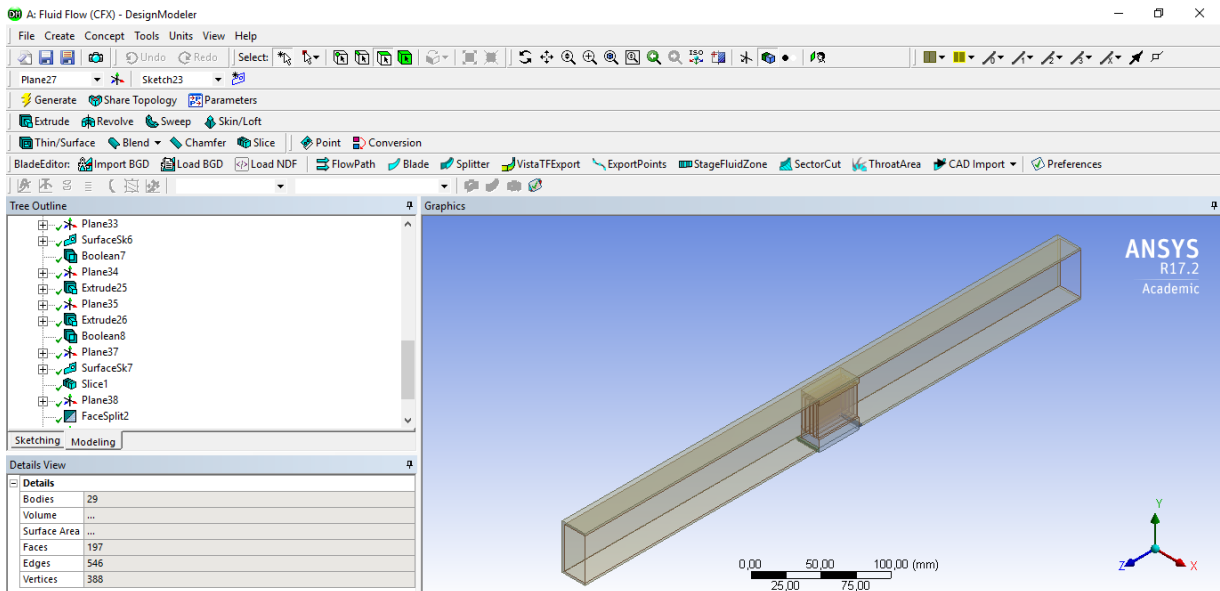


Figura 44: Geometria del CAS 10-10-300 creada amb l'ANSYS (la nomenclatura dels casos s'indicarà més endavant en l'apartat 7)

Anteriorment, s'ha parlat que el SolidWorks només seria necessari per crear la geometria del dissipador de 12 aletes del dispositiu real per així poder treballar des d'una única plataforma informàtica. Amb l'ANSYS es pretén crear las diferents geometries que presentaran els dissipadors dissenyats tot definint uns paràmetres tal i com es mostra en la *Figura 45*:

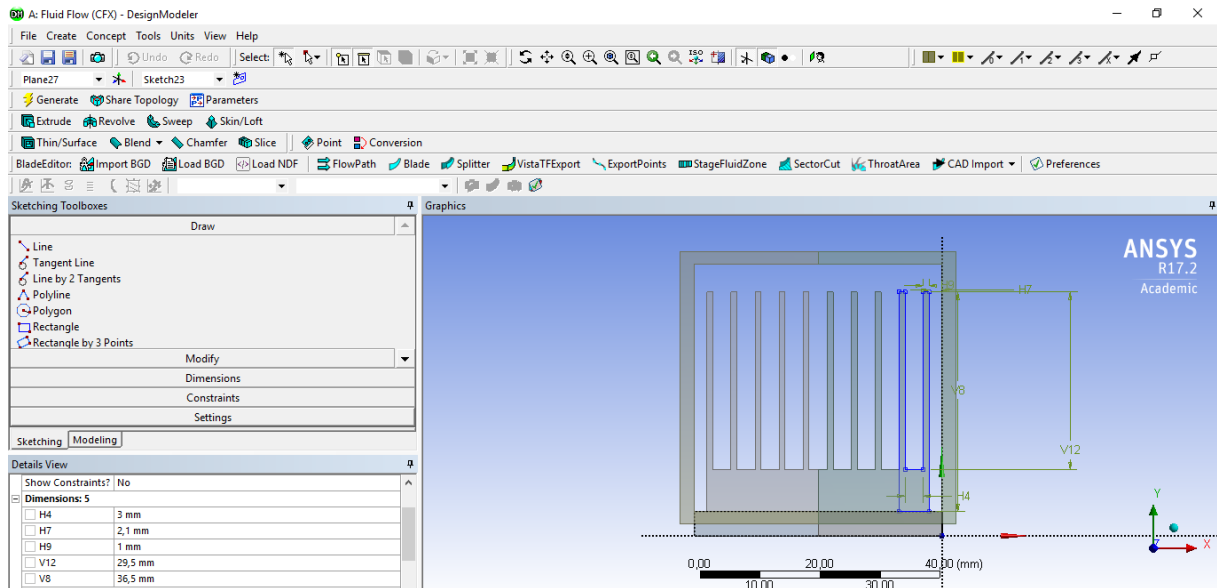


Figura 45: Dimensionament del dissipador d'aletes del CAS 10-10-300 que s'exposarà més endavant (la nomenclatura dels casos també s'indica més endavant)

A part de definir les dimensions del dissipador d'aletes a partir d'uns paràmetres, també s'ha creat els diferents elements que conformaran la part central del model. En aquest cas, aquests elements, sempre tindran uns paràmetres fixos ja que en la realitat no se li podran canviar les dimensions establertes que tenen.

6.3. Resultats

D'acord amb els experiments realitzats per autors externs a aquest projecte (els experiments realitzats amb circuit tancat i obert amb un dissipador de 12 aletes), s'ha modelat (*Figura 46*) i simulat amb ANSYS la part central del model, per així poder validar el model real:

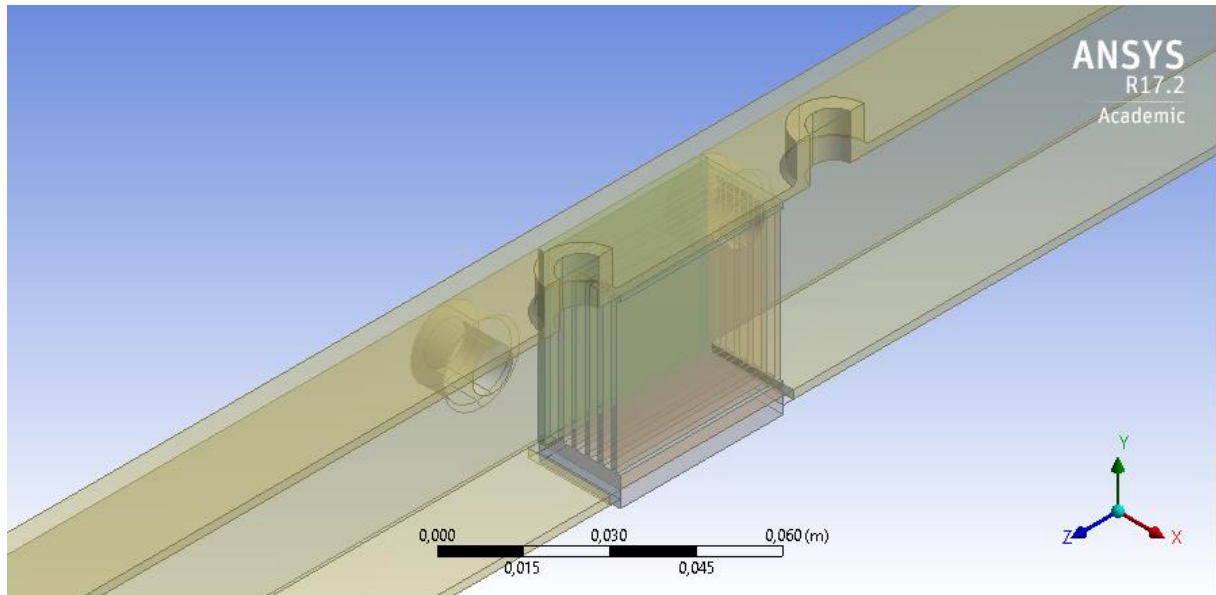


Figura 46: Geometria del model real amb ANSYS

A part, s'ha hagut de fer modificacions en els paràmetres del mallat. El mallat que s'ha obtingut és el següent que es pot veure tant a la *Figura 47* com a la *Figura 48*:

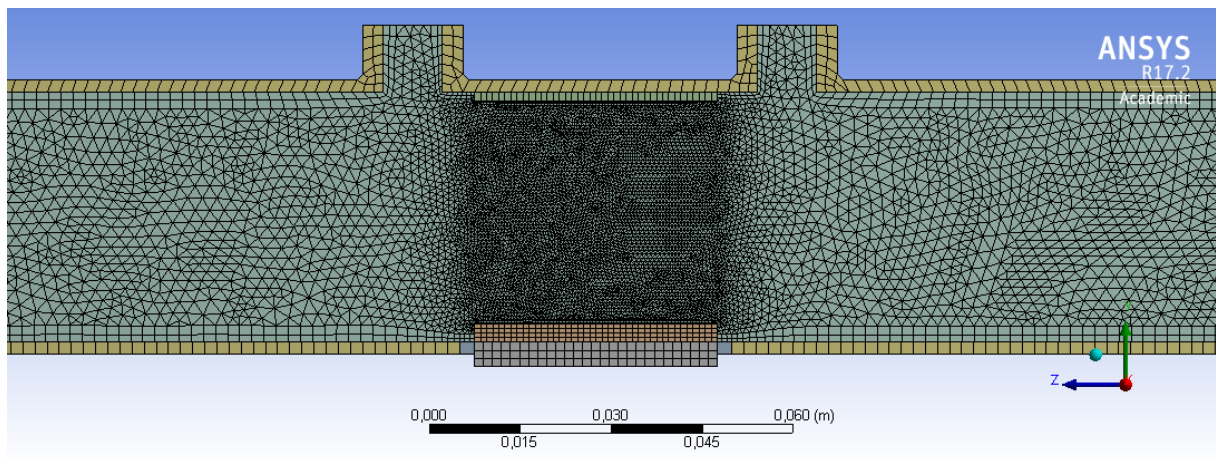


Figura 47: Vista lateral del mallat del model real tenint en compte el flux d'aire que circula

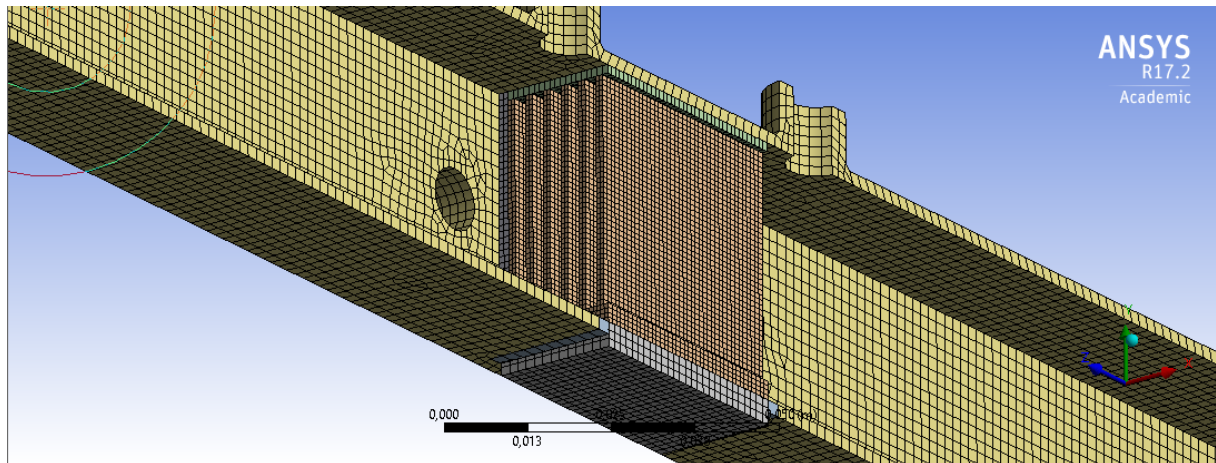


Figura 48: Vista del mallat del model real sense tenir en compte el flux d'aire que circula

Com s'aprecia en el mallat del flux d'aire, es té una major concentració de tetraedres just on es troba col·locat el dissipador. El causant és degut a què el flux d'aire troba una obstrucció quan circula a través del tub, és a dir, per culpa el dissipador, i el seu volum disminueix en aquella zona. Independentment, en l'Annex B: Simulació en ANSYS s'explicarà amb més detall els paràmetres de mallat utilitzats al llarg del projecte.

Una vegada s'ha procedit a simular aquest cas, els resultats obtinguts han sigut els següent:

Taula 17: Resultats obtinguts per la simulació en ANSYS del model real amb dissipador de 12 aletes

v (m/s)	Dif T (°C)	T° cold (°C)	T° hot (°C)	Dif P (Pa)	Q (l/s)	P ventilador (mW)	P mòdul (W)	P neta (W)
0,05	81,66	168,35	250	0,05	0,08	0,01	0,61	0,61
0,30	103,62	146,38	250	0,50	0,48	0,40	0,96	0,96
0,68	123,02	126,98	250	2,01	1,09	3,64	1,39	1,39
0,79	126,67	123,33	250	2,62	1,26	5,52	1,49	1,48
1,01	132,78	117,22	250	4,08	1,62	10,99	1,65	1,64
1,46	142,22	107,78	250	8,01	2,34	31,20	1,92	1,89
1,65	145,39	104,61	250	10,05	2,64	44,23	2,02	1,98
1,89	148,94	101,06	250	12,95	3,02	65,26	2,13	2,07
2,00	150,39	99,61	250	14,40	3,20	76,78	2,18	2,10

3,00	161,08	88,92	250	31,01	4,80	248,04	2,54	2,29
4,00	168,38	81,62	250	53,82	6,40	574,08	2,81	2,23
5,00	173,71	76,29	250	82,79	8,00	1103,85	3,01	1,91
6,00	177,77	72,23	250	117,89	9,60	1886,24	3,17	1,29
7,00	180,99	69,01	250	159,16	11,20	2970,99	3,30	0,33

Per tal de fer més entenedor els resultats que es presenten a la *Taula 17*, s'explica que significa cada columna:

- v (m/s) \rightarrow s'han introduït diferents valors de velocitat pel qual l'aire entra dintre el tub d'acer. Aquests valors són les condicions de contorn d'entrada que hem aplicat a l'ANSYS CFX-Pre a l'hora de realitzar la simulació
- $Dif T$ ($^{\circ}C$) \rightarrow diferència de temperatures entre les dues cares del mòdul termoelèctric. Aquest factor és molt important a l'hora de determinar la potència que genera el mòdul termoelèctric.
- $T^{\circ} cold$ i $T^{\circ} hot$ ($^{\circ}C$) \rightarrow temperatura de la cara freda i calenta de la cèl·lula termoelèctrica.
- $Dif P$ (Pa) \rightarrow a la realitat, el tub d'acer consta d'unes tomes de pressió amb les quals es calcula la pressió amb un sensor que s'ha esmentat a la *Taula 11* (veure subapartat 5.1 d'aquest document). A la simulació s'ha tingut en compte les pressions que exerceix l'aire just abans d'entrar en contacte amb el dissipador i posteriorment al sortir de la geometria que conforma aquest últim, a partir de calcular la mitjana de pressions exercides en les diferents superfícies d'aire que surten de les 6 tomes de pressió que té el tub d'acer (*Figura 49*):

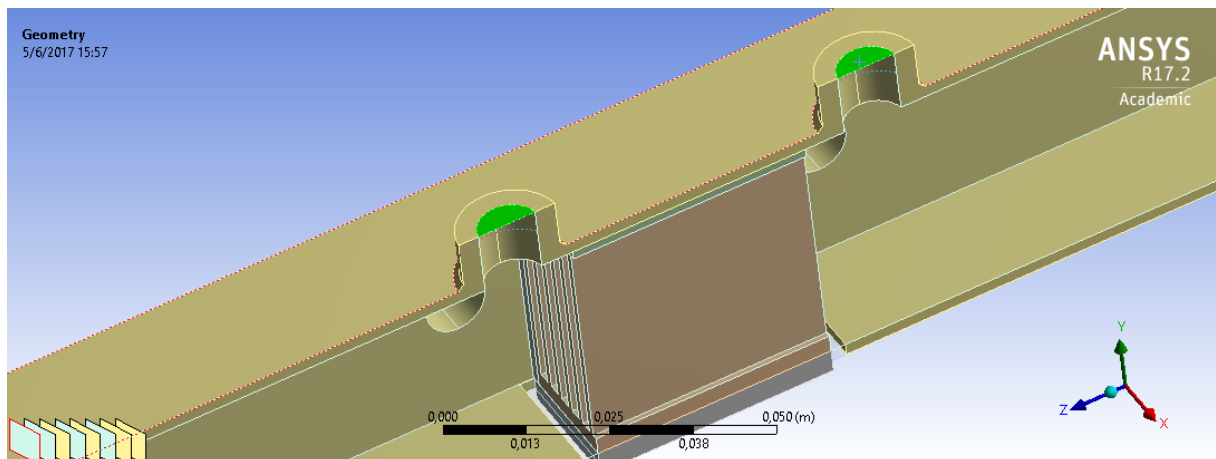


Figura 49: Superfícies d'aire de les tomes de pressió de la cara superior del tub d'acer, utilitzades pel càlcul de pressions a l'entrada i sortida del dissipador.

El posterior càlcul realitzat ha sigut la diferència de pressions entre les tomes d'entrada d'aire (on el flux d'aire encara no havia entrat en contacte amb el dissipador) i les de sortida d'aire (el flux ja ha passat a través de les aletes del dissipador).

- Q (l/s) \rightarrow cabal d'aire que circula a través del tub d'acer.
- $P_{\text{ventilador}}$ (W) \rightarrow és la potència elèctrica consumida pel ventilador (més endavant s'explica com es calcula).
- $P_{\text{mòdul}}$ (W) \rightarrow la potència que ens genera el mòdul com a conseqüència del gradient de temperatura aplicat en les seves cares (més endavant s'explica com es calcula).
- P_{neta} (W) \rightarrow la potència produïda ($P_{\text{mòdul}}$) menys potència consumida ($P_{\text{ventilador}}$).

Els resultats mostren una tendència d'increment de potència neta fins a un cert augment de la velocitat d'entrada. A mesura que es puja la velocitat d'entrada de l'aire, també augmenta conseqüentment la diferència de pressió, portant a un augment de la potència del ventilador perquè aquest pugui arribar a assolir la demanda de velocitat. Això esdevé que la diferència de potències entre la potència del mòdul i la del ventilador sigui menor ja que cada vegada,

el mòdul i el ventilador, presenten valors de potència molt semblants. Amb la *Figura 50*, es pot apreciar aquest comportament:

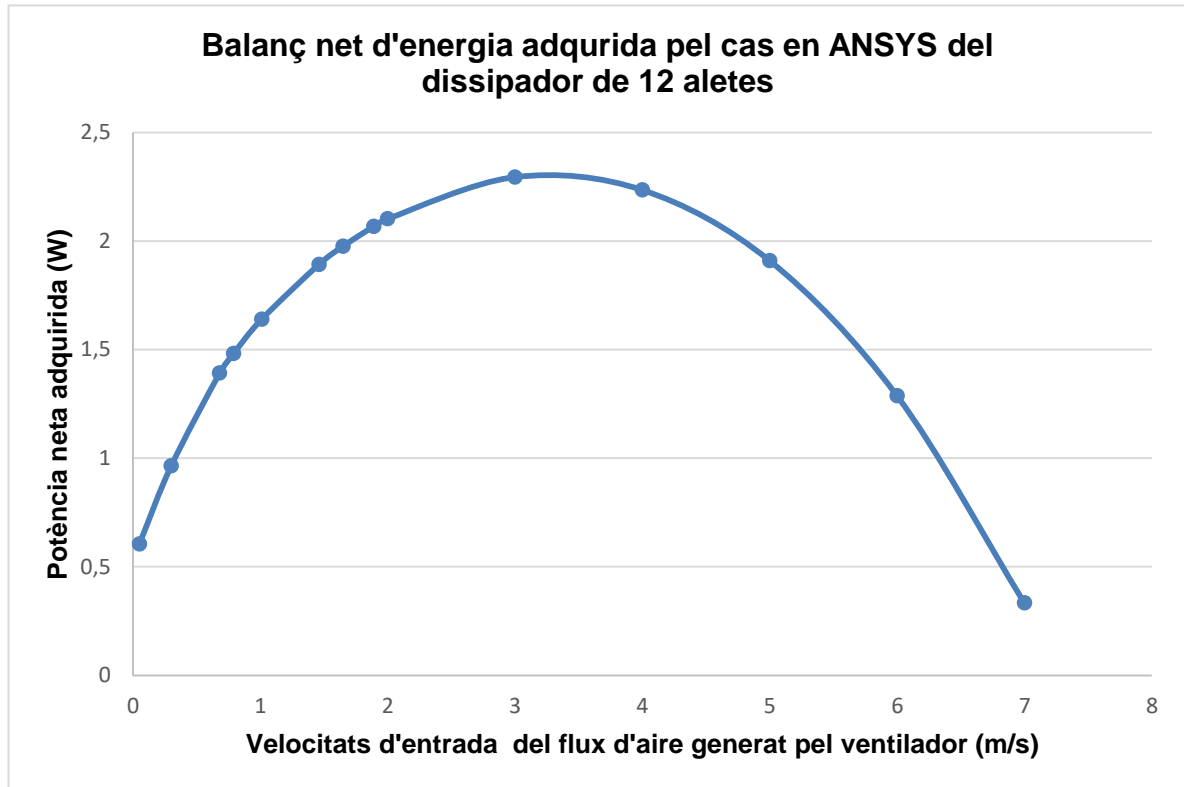


Figura 50: Comportament del dissipador de 12 aletes després de fer les respectives simulacions amb l'ANSYS

El resultat més elevat és l'aconseguit durant una circulació d'aire de 3 m/s, on s'aconsegueix un valor final de 2,29 W. Això vol dir que la potència consumida pel ventilador i la produïda pel mòdul es troba just en un punt on conflueixen de manera adequada ja que el ventilador no necessita consumir tanta potència per tal de poder refrigerar el dissipador d'aletes i el mòdul d'aletes genera una potència prou elevada com per no apropar-se al valor obtingut pel ventilador.

En l'Annex A: *Càlculs Analítics*, es mostra com s'han calculat les potències produïdes pel mòdul termoelèctric i les potències consumides pel ventilador.

Prèviament, autors externs a aquest treball, van realitzar assajos per aconseguir la corba característica del mòdul termoelèctric (el fabricant no proporcionava la corba) en el punt de màxima potència en funció de la diferència de temperatures entre les cares del mòdul

termoelectric. En funció d'aquesta corba, es va poder trobar l'equació de comportament del mòdul. El resultat va ser el següent (*Figura 51*):

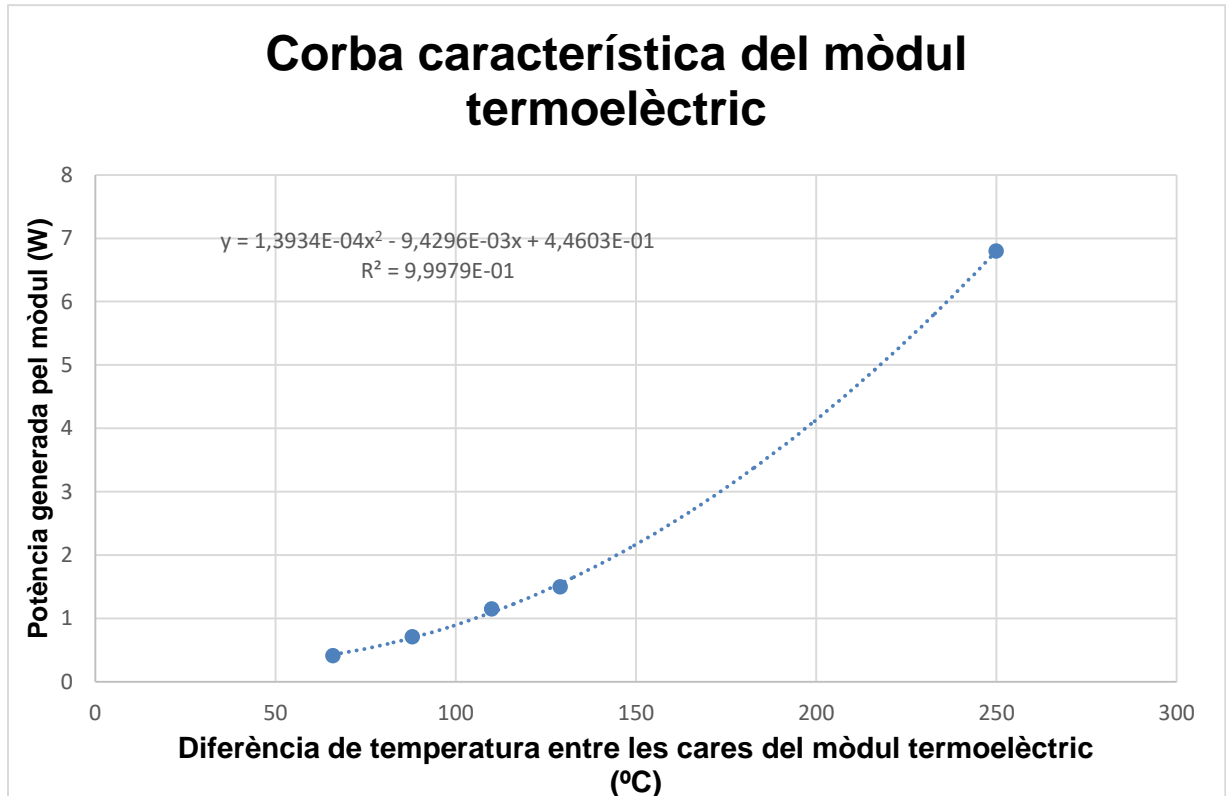


Figura 51: Corba característica del mòdul termoelectric. A part, s'obté l'equació de la recta que determinarà el comportament d'aquest.

Si es recorda els resultats del càlcul experimental en circuit obert (*Taula 16*), es pot corroborar que la diferència de temperatures entre ambdues cares de la cèl·lula termoelectrica, donen molt semblant en tots dos càlculs (*Taula 18*):

Taula 18: Comparativa de diferències de temperatures entre les cares del mòdul termoelectric pel càlcul experimental i teòric

Càlcul experimental en circuit obert		Càlcul teòric realitzat amb ANSYS	
Velocitat aire (m/s)	Diferència de temperatures (°C)	Velocitat aire (m/s)	Diferència de temperatures (°C)
1,78 (9 V)	151	1,89	148,94
1,53 (8 V)	148	1,65	145,39
1,32 (7 V)	143	1,46	142,22
0,92 (6 V)	136	1,01	132,78
0,74 (5 V)	128	0,79	126,67
0,60 (4 V)	120	0,68	123,02
0,26 (3 V)	87	0,30	103,62
0,03 (2 V)	58	0,05	81,66

El fet d'haver escollit unes velocitats d'entrada diferents als valors que s'obtenen en el càlcul experimental en circuit obert és irrellevant. El fet és que s'han escollit els valors més alts de velocitat aconseguits al llarg de l'experiment però no influeix a que no es puguin comparar ambdós casos. Tot és arran de tenir en compte l'error que poden cometre els aparells de mesura. La sonda amb la qual es van analitzar tres mesures de velocitat (s'introduïa la sonda a través del forat situat a 11,75 cm de l'entrada d'aire del tub d'acer i es modificava la profunditat a la qual entrava) per a cada alimentació donada al ventilador, presenten uns resultats molt iguals. Aquest fet representa l'error comès per la sonda de velocitat. Segons fabricant, l'error que pot arribar a cometre aquest tipus de sonda és el següent (Eq. 8):

$$Error_{sonda\ velocitat} = 0,04 + \left(1 \cdot \frac{Velocitat\ obtinguda}{100}\right) \quad (Eq. 8)$$

Si s'observa a la *Taula 19* les velocitats aconseguides durant l'experiment segons la profunditat a la qual s'ha entrat la sonda:

Taula 19: Velocitats obtingudes segons la profunditat de mesura de la sonda de velocitat

Voltatge ventilador (V)	9	8	7	6	5	4	3	2
Posició de la sonda	Velocitat (m/s)							
1 (menor profunditat)	1,89	1,65	1,46	1,01	0,79	0,68	0,3	0,03
2 (profunditat mitja)	1,72	1,47	1,25	0,88	0,74	0,59	0,28	0,05
3 (major profunditat)	1,72	1,47	1,24	0,86	0,7	0,54	0,2	0

I s'aplica l'error comès per la sonda (*Taula 20*):

Taula 20: Velocitats obtingudes segons la profunditat de mesura de la sonda de velocitat

Voltatge ventilador (V)	9	8	7	6	5	4	3	2
Posició de la sonda	Velocitat (m/s)							
1 (menor profunditat)	0,059	0,057	0,055	0,050	0,048	0,047	0,043	0,040
2 (profunditat mitja)	0,057	0,055	0,053	0,049	0,047	0,046	0,043	0,041
3 (major profunditat)	0,057	0,055	0,052	0,049	0,047	0,045	0,042	0,040

S'obté l'error que està cometent la sonda en cada presa de mesura. Llavors, per tal de confirmar que no importa que els valors de velocitat siguin diferents per poder comparar el càlcul teòric amb l'experimental, es pretén demostrar que tots els valors de velocitat cauen dintre el rang comprés per l'error de mesura i que en veritat s'estan analitzant velocitats que tendeixen a tenir el mateix valor (*Taula 21*):

Taula 21: Rang d'error obtingut per les 3 mesures realitzades segons la profunditat amb la qual s'introduïa la sonda

Voltatge ventilador (V)	9	8	7	6	5	4	3	2
Rang d'error per les 3 mesures (m/s)	0,17	0,18	0,22	0,15	0,09	0,10	0,10	0,05

Tota la explicació realitzada es pot resumir a la *Figura 52*, on s'observa els valors de diferència de temperatura aconseguits tant pel càlcul teòric com pel experimental segons la velocitat d'aire d'entrada:

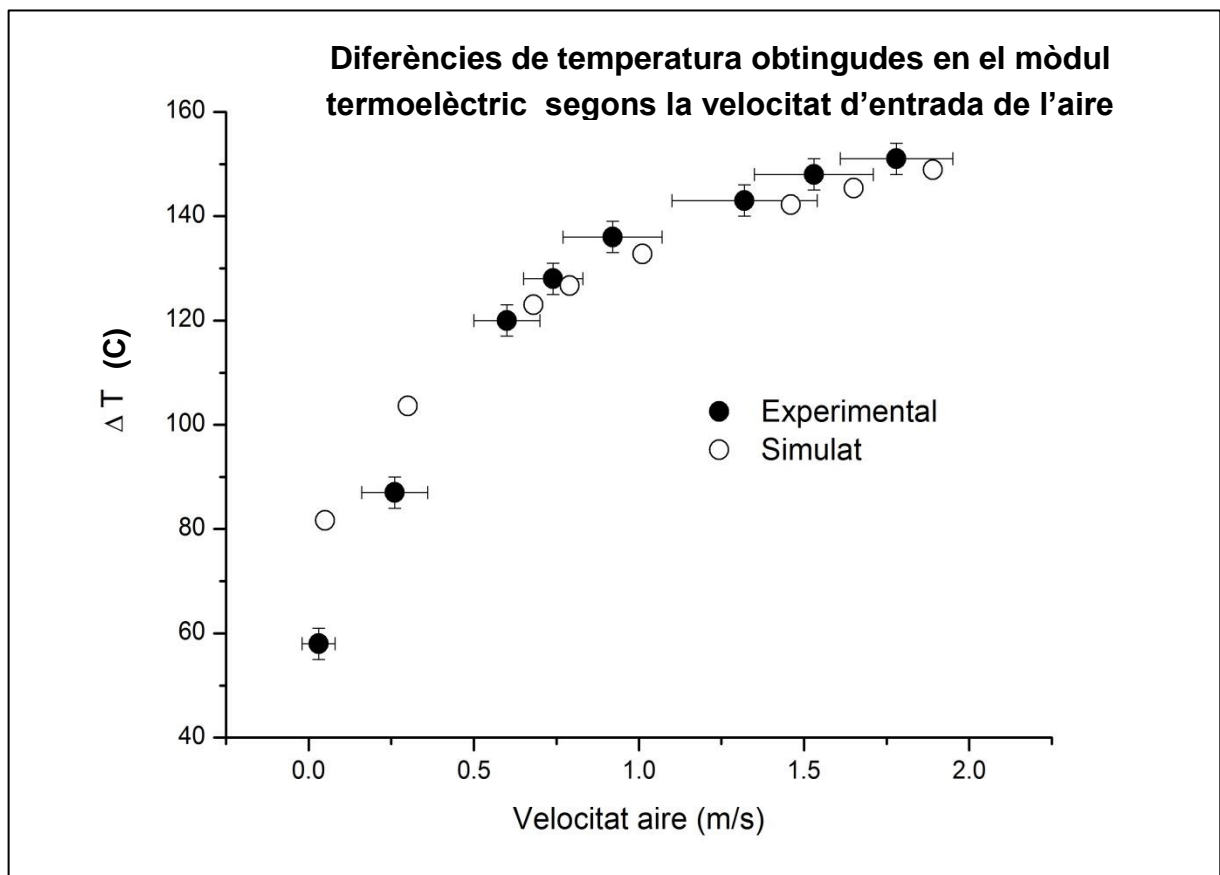


Figura 52: A part de mostra les diferències de temperatura obtingudes segons la velocitats d'aire d'entrada, també es pot precisar dels rangs d'error mostrat en l'experiment

Es pot veure clarament que els valors de diferència de temperatura simulats cauen aproximadament dintre el rang d'error de les mesures de velocitat obtingudes en el càlcul experimental.

Així mateix, la sonda de pressió diferencial també presenta un error en la seva mesura. L'equació que defineix aquest error ve previnguda per l'Equació 9:

$$Error_{sonda\ pressió\ dif.} = 0,1 + \left(Pressió\ diferencial\ obtinguda \cdot \frac{3}{100} \right) \quad (Eq. 9)$$

L'error de pressió obtingut en cada mesura durant l'experiment és el que es presenta a la Taula 22:

Taula 22: Error de pressió obtingut en cada mesura amb la sonda diferencial de pressió durant l'experiment

Velocitat (m/s)	Diferència de pressió (Pa)	Error de pressió (Pa)
1,78	12,25	0,47
1,53	10,05	0,40
1,32	7,95	0,34
0,92	4,95	0,25
0,74	3,85	0,22
0,60	3,10	0,19
0,26	1,30	0,14
0,03	0,45	0,11

En aquest cas, al tractar-se d'un valor de sortida i no d'entrada, com la velocitat de l'aire, és més difícil d'assolir resultats similars. Si s'observa la Figura 53, es veu com a mesura que es va augmentant la velocitat, les diferències de pressió van tendint a establir-se dintre uns valors que es troben dintre els rangs d'error de les diferències de pressió mesurades en l'experiment.

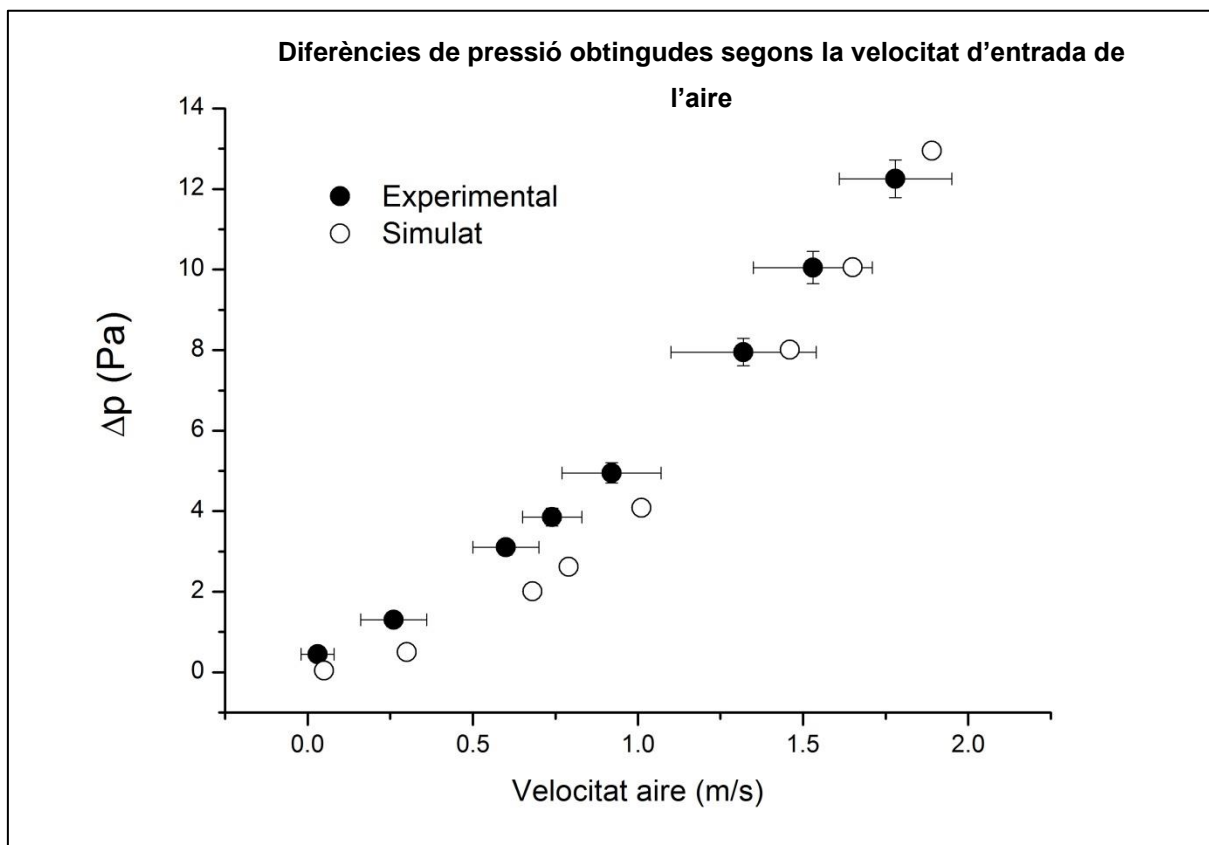


Figura 53: A part de mostra les diferències de pressió obtingudes segons la velocitats d'aire d'entrada, també es pot precisar del rang d'error obtingut de cada mesura en l'experiment

El fet que hi hagi errors de mesura, tant en la sonda de velocitat com en la sonda diferencial de pressió, es tradueix en tenir uns resultat de potència del ventilador que estaran afectats per aquest error. El càlcul de la potència del ventilador, depèn del cabal d'aire que circula i de la diferència de pressió. El càlcul és pot trobar en l'*Annex A: Càlculs analític*.

A la *Taula 23* es mostra les potències aconseguides pel ventilador al llarg de l'experiment realitzat en laboratori de Lubricants, en comparació amb els resultats de potència consumida pel ventilador, que s'han aproximat a partir de realitzar uns càlculs, que es podran veure en l'*Annex A: Càlculs analítics*, amb les diferències de pressió i cabal d'aire aconseguides en les simulacions.

Taula 23: Comparació numèrica entre la potència del ventilador aconseguida en l'experiment i l'aproximada per càlculs, a partir dels resultats de les simulacions

Potència del ventilador en l'experiment (mW)	Potència del ventilador en la simulació (m W)
35,26	65,26
24,91	44,23

16,96	31,20
7,35	10,99
4,64	5,52
3,03	3,64
0,55	0,40
0,02	0,01

Ara es vol comparar els patrons de comportament energètic del mòdul entre el cas en ANSYS i el cas realitzat durant l'experiment portat a terme en el laboratori segons la diferència de temperatures que s'obté al mòdul i la potència generada per aquesta. El problema està en què l'experiment en circuit obert no es té resultats de la potència que podria generar el mòdul, sinó de la diferència de potencial màxima. Gràcies a l'equació de la potència màxima obtinguda del mòdul en funció de la diferència de temperatura a les cares del mòdul, es pot fer una aproximació de la potència que generaria el mòdul si estigués en circuit tancat i el dissipador mantingués la mateixa diferència de temperatures a les cares del mòdul.

Es recull les aproximacions de les potències generades pel mòdul termoelectríc durant l'experiment en circuit obert i es comparen amb les adquirides amb l'ANSYS a la *Taula 24*:

Taula 24: Comparació de potències generades pel mòdul termoelectríc amb el seu tant per cent d'error

Càlcul experimental en circuit obert		Càlcul teòric realitzat amb ANSYS		Error en la potència generada pel mòdul (%)
Diferència de temperatures (°C)	P mòdul (W)	Diferència de temperatures (°C)	P mòdul (W)	
151	2,1993	148,94	2,1325	3,13
148	2,1026	145,39	2,0205	4,06
143	1,9470	142,22	1,9234	1,23
136	1,7408	132,78	1,6505	5,47
128	1,5220	126,67	1,4873	2,33
120	1,3210	123,02	1,3947	5,28
87	0,6803	103,62	0,9650	29,50
58	0,3679	81,66	0,6051	39,20

Els resultats són bastant coherents, només es troba errors força significatius en els dos últims cassos. De fet són poc rellevants aquest dos últims assajos/simulacions perquè es quan el ventilador treballa a menor potència i no s'experimenta tanta diferència de temperatura entre les cares del mòdul. A part, s'està comparant diferències de temperatures que divergeixen molt en aquests dos últims casos, per ser més exactes, la diferència és d'uns 20 °C.

Es preten que una vegada vist la comparació des d'un punt de vista numèric, també es pugui visualitzar des d'un punt de vista gràfic. Per això, s'exposa la *Figura 54*:

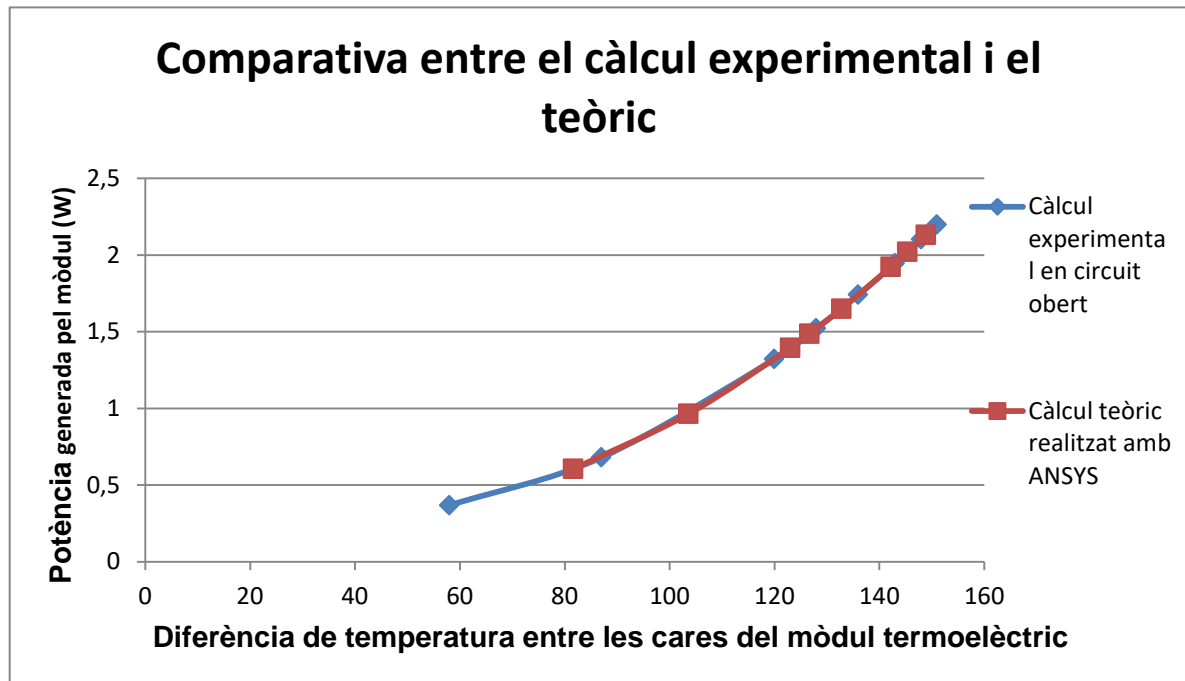


Figura 54: Comparativa entre el càlcul experimental i el teòric

Vist al llarg d'aquest apartat del document, es pot corroborar la validació del model real per l'aproximació dels seus resultats als teòrics.

7. DISSIPADORS ANALITZATS

S'ha estudiat el disseny de 12 dissipadors de calor d'aletes rectes. Tots 12 comparteixen la mateixa altura d'aleta com la mateixa altura total. Això es degut al fet que interessava avaluar diferents dissenys partint sempre des d'unes mateixes altures iguals. Cal recordar que l'aleta comença on acaba la base del dissipador i que per tant com més alta sigui la base, menys dissipació del flux d'aire s'obtidria ja que obstruiria a la circulació d'aquest i hi hauria menys àrea d'intercanvi.

Els dissenys han estat classificats segons el gruix de les seves aletes. Existeixen 6 casos pels quals se'ls identifica per tenir un gruix d'aleta d'1 mm i altres 6 casos que disposen d'un gruix d'aleta d'1.5 mm.

S'ha adequat per tal d'obtenir uns dissipadors que no sobrepassessin els 41.2 mm d'amplada límit que imposa el forat realitzat a la cara inferior del tub d'acer. A part sempre s'ha dissenyat tenint en compte de no igualar els 41.2 mm màxims per tal de deixar circular aire a través dels costats dels dissipadors.

A continuació, a la *Figura 55*, es mostra la dimensió del forat de la cara inferior del tub d'acer que s'ha tingut en compte durant la validació del model:

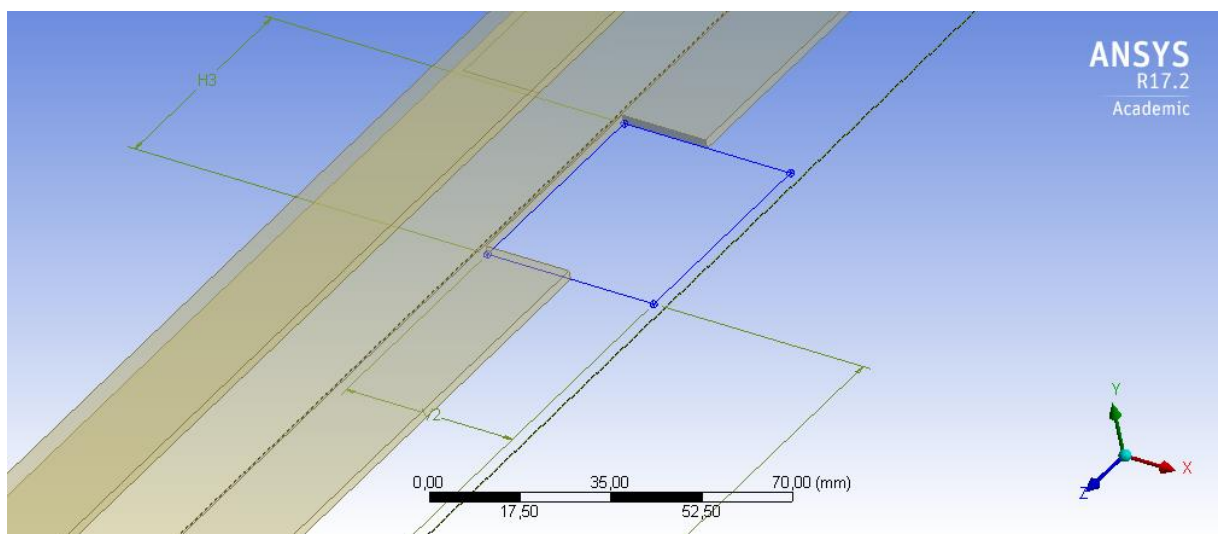


Figura 55: Dimensions del forat de la cara inferior del tub d'acer per uns valors de 40x40 mm (mida validació del model)

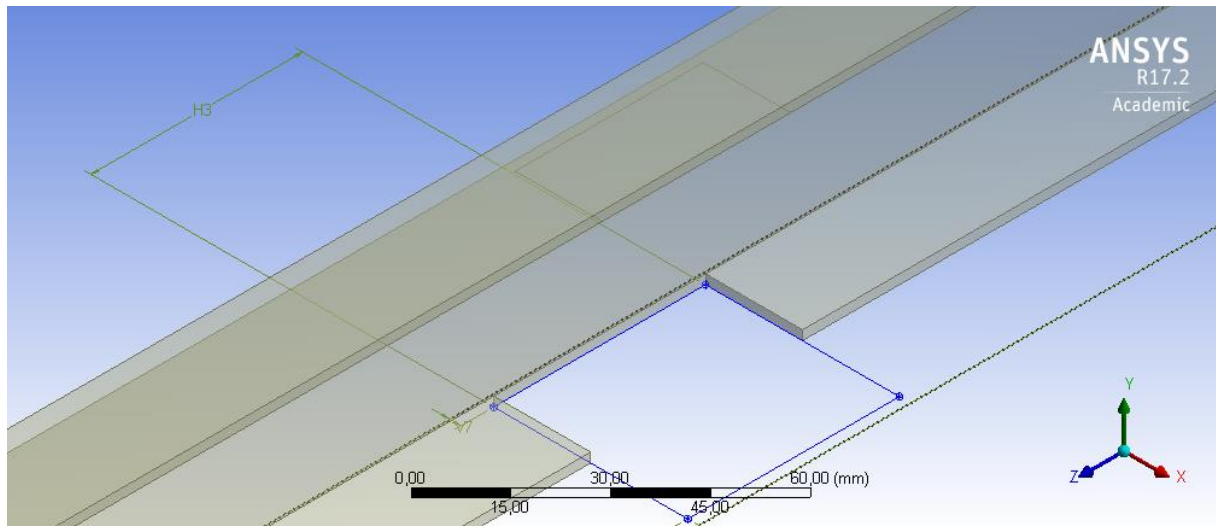


Figura 56: Dimensions del forat de la cara inferior del tub d'acer per uns valors de 41.2x40 mm

Com es pot observar en la *Figura 56*, la separació entre el forat i la paret interna lateral del tub d'acer ja no existeix. Això s'ha realitzat com a conseqüència que a l'ANSYS li costava realitzar el tipus de mallat demanat en aquella separació en concret de forma automàtica. Estem parlant que la separació era d'uns 0.42 mm, un valor molt petit perquè l'ANSYS realitzés correctament el mallat programat. Per això es va decidir treure aquesta separació ja que no afectaria als resultats. A més a més, el component fluid anomenat "Volum de control" també comptava amb una dimensió extremadament petita en la seva geometria i per això es va decidir també treure'l per la realització d'un correcte mallat:

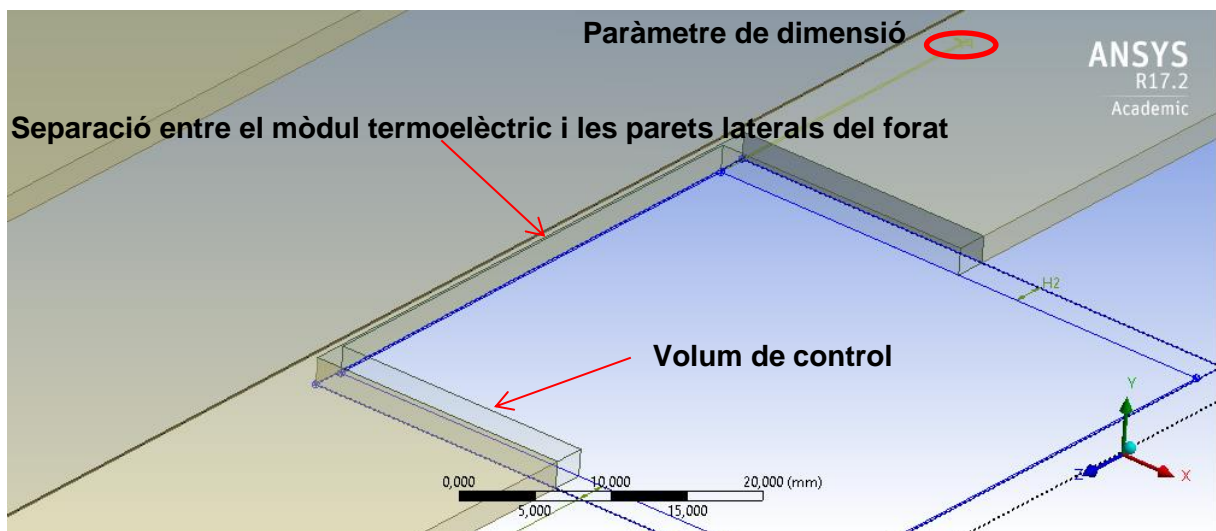


Figura 57: Visualització de la separació entre el mòdul termoelèctric i les parets laterals del forat

Com es pot observar, la separació esmentada en la *Figura 57* és bastant petita, per ser més precís, és de 0.18 mm. Per això, s'ha optat per treure-la en les respectives simulacions amb l'ANSYS.

Paral·lelament, per tal de compensar els fets anterior, s'ha modificat les dimensions del mòdul termoelèctric a 41,2x40 mm, tal i com es pot observar a la *Figura 58*:

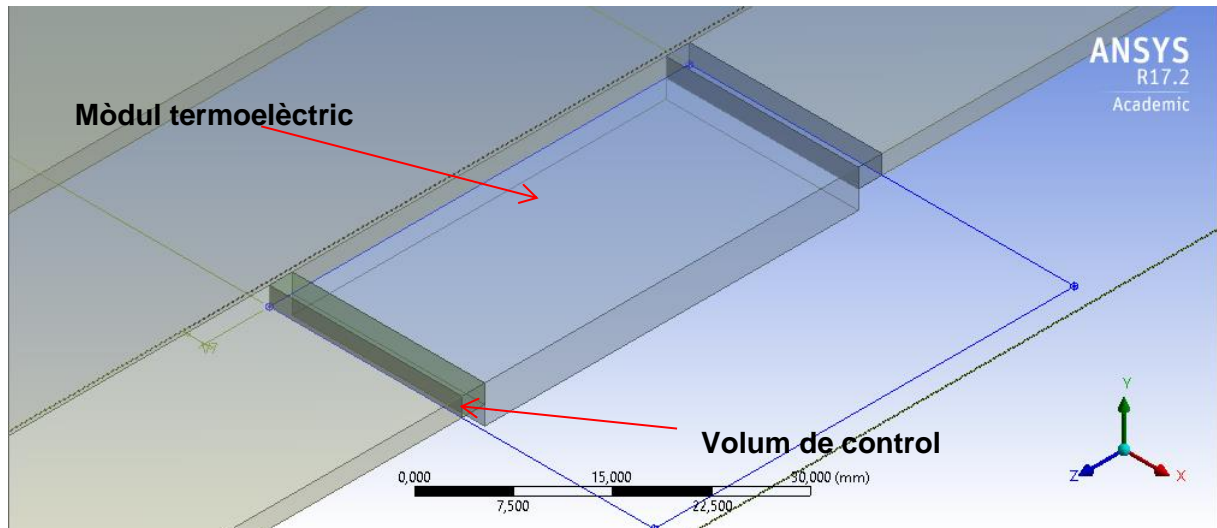


Figura 58: Representació del mòdul termoelèctric simulat amb l'ANSYS

Una vegada feta l'explicació introductòria, es procedirà a l'exposició de les diferents dimensions que presentaran els dissipadors d'aletes dissenyats tot explicant en detall la taula que acompanyarà a cada disseny.

Les taules que s'exposaran, estaran formades per 3 columnes. La primera columna representa el nom pel qual es defineix una mida dintre dels plans formats en l'ANSYS Design Modeler per crear una geometria. La segona columna representa el valor (en mm) que s'està donant a una mida. I per últim, la tercera, descriu que significa cada mida dintre la geometria. Cada descripció que es dóna en aquesta tercera columna significa:

- Separació entre aletes : aquesta mida serà important pel pas de flux d'aire a través del dissipador.
- Distància de separació entre dissipador i tub d'acer : ens permet col·locar el dissipador just al mig del tub.

- Gruix d'aleta : imprescindible per evitar el pas de l'aire a través del tub.
- Altura de l'aleta : mida vertical de l'aleta.
- Altura total del dissipador : altura de l'aleta + altura de la base del dissipador.

El nombre de dissenys realitzats han sigut 12. Cada disseny presenta un nombre de separació entre aletes diferent. En canvi, l'altura total del dissipador i l'altura de l'aleta és la mateixa en tots els dissenys. Això també passa pel que fa els gruixos d'aleta ja que només es tenen del tipus d'1 mm i d'1,5 mm de gruix. A part, alguns dissipadors presenten el mateix nombre d'aletes. La nomenclatura utilitzada per nombrar-los ha estat la següent:

CAS XX-YY-ZZZ

- XX: nombre d'aletes
- YY: espessor de les aletes. Es dona en dècimes de mil·límetre.
- ZZZ: separació entre aletes. En aquest cas, es dona en centèsimes de mil·límetre.

A continuació, s'exposen els seus dissenys :

- **CAS 10-10-300**: el disseny que es presenta en la *Figura 59* té un número de 10 aletes on cada una fa 1 mm de gruix i estan separades entre sí per 3 mm. A continuació, a la *Taula 25*, s'exposa les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 25: Dimensions utilitzades en el CAS 10-10-300 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	3,00	Separació entre aletes
H7	2,10	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,00	Gruix d'aleta

V12	29,50	Altura de l'aleta
V8	36,50	Altura total del dissipador

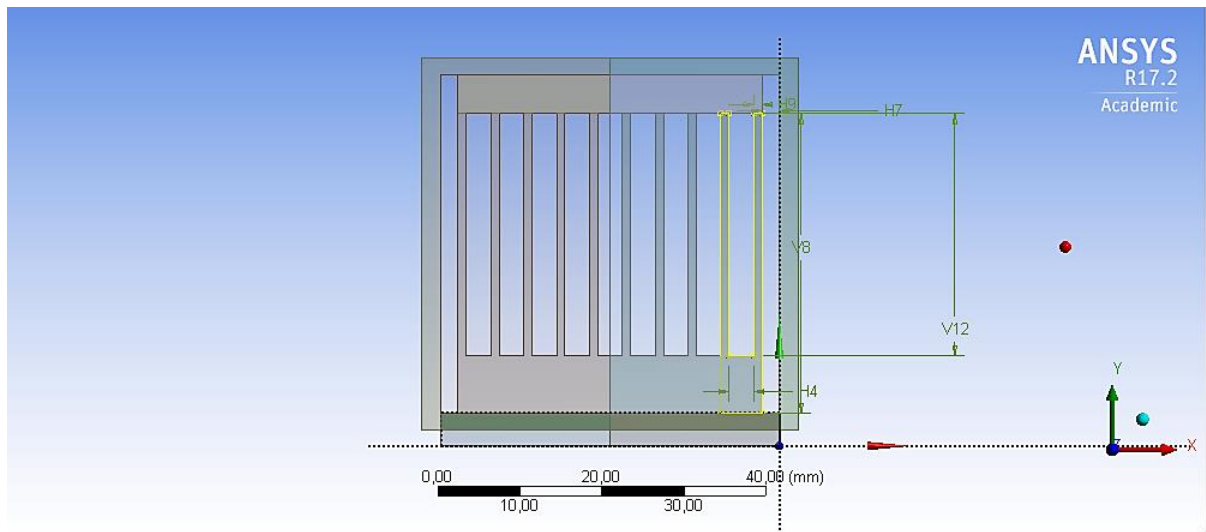


Figura 59: Disseny del dissipador del CAS 10-10-300 en ANSYS

- **CAS 09-10-340:** el disseny que es presenta en la *Figura 60* té un número de 9 aletes on cada una fa 1 mm de gruix i estan separades entre si per 3,4 mm. A continuació, a la *Taula 26*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 26: Dimensions utilitzades en el CAS 09-10-340 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	3,40	Separació entre aletes
H7	2,50	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,00	Gruix d'aleta
V12	29,50	Altura de l'aleta
V8	36,50	Altura total del dissipador

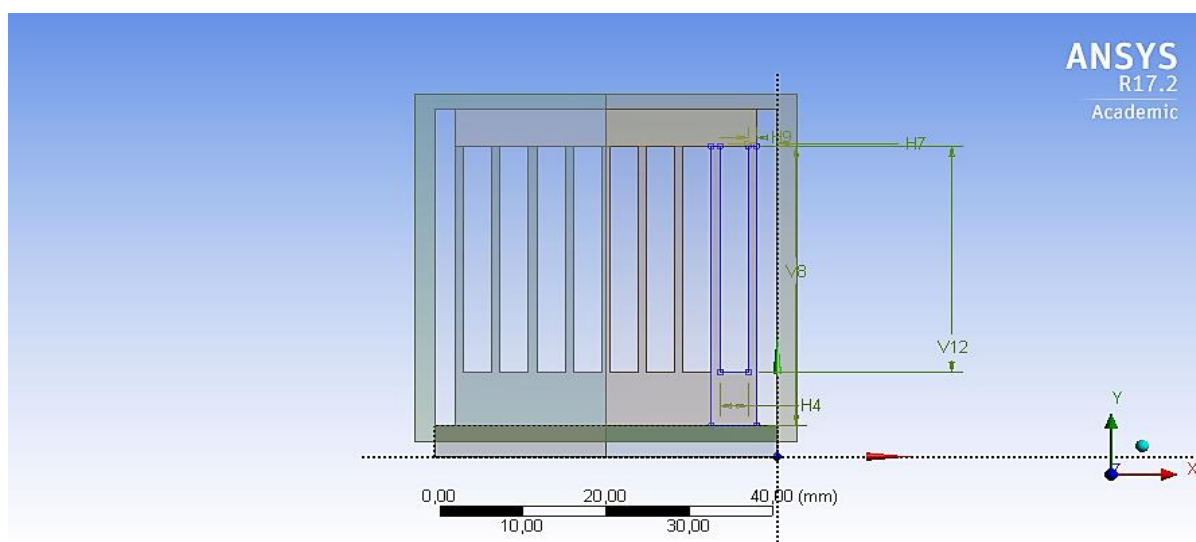


Figura 60: Disseny del dissipador del CAS 09-10-340 en ANSYS

- **CAS 09-10-367:** el disseny que es presenta en la *Figura 61* té un número de 9 aletes on cada una fa 1 mm de gruix i estan separades entre sí per 3,67 mm. A continuació, a la *Taula 27*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 27: Dimensions utilitzades en el CAS 09-10-367 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	3,67	Separació entre aletes
H7	1,42	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,00	Gruix d'aleta
V12	29,50	Alçada de l'aleta
V8	36,50	Alçada total del dissipador

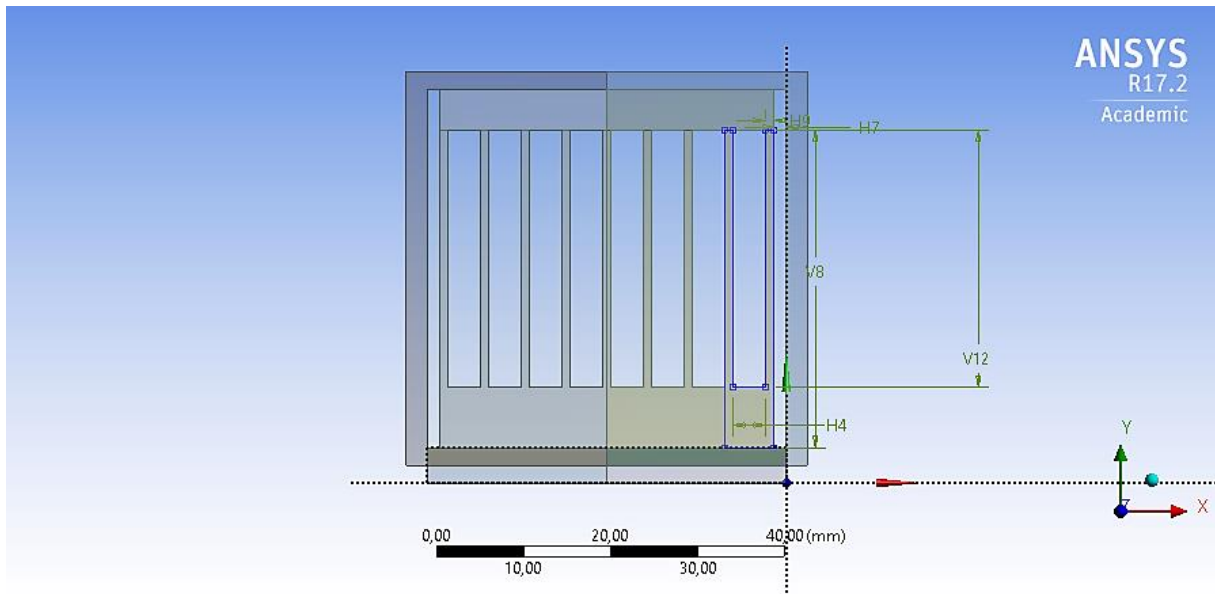


Figura 61: Disseny del dissipador del CAS 09-10-367 en ANSYS

- **CAS 11-15-200:** el disseny que es presenta en la *Figura 62* té un número de 11 aletes on cada una fa 1,5 mm de gruix i estan separades entre sí per 2 mm. A continuació, a la *Taula 28*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 28: Dimensions utilitzades en el CAS 11-15-200 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	2,00	Separació entre aletes
H7	2,35	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,50	Gruix d'aleta
V12	29,50	Alçada de l'aleta
V8	36,50	Alçada total del dissipador

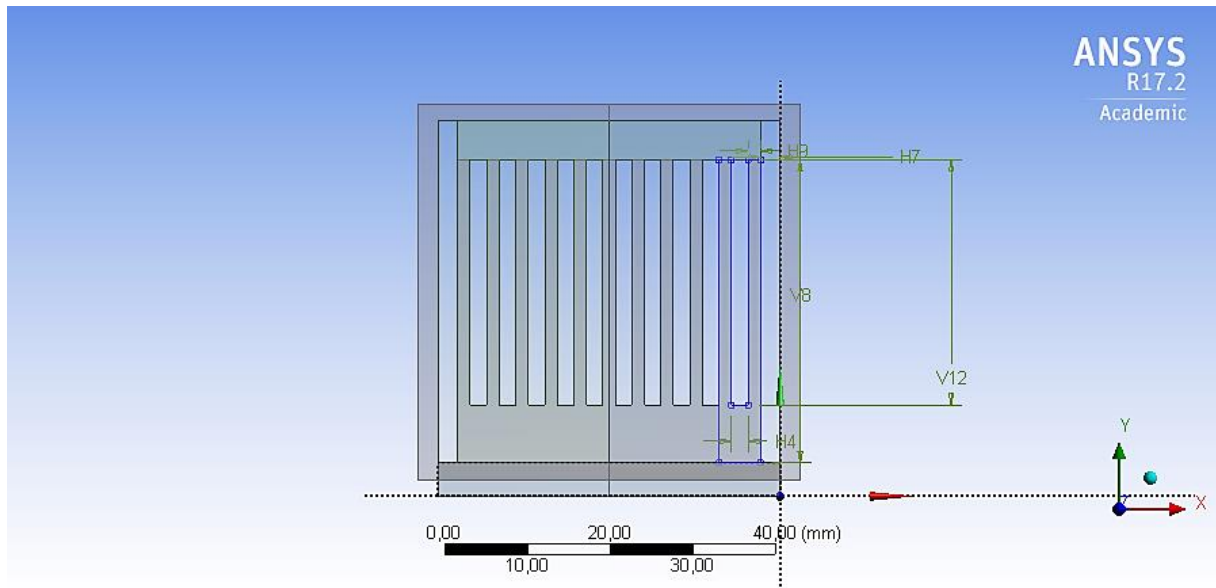


Figura 62: Disseny del dissipador del CAS 11-15-200 en ANSYS

- **CAS 09-15-280:** el disseny que es presenta en la *Figura 63* té un número de 9 aletes on cada una fa 1,5 mm de gruix i estan separades entre sí per 2,8 mm. A continuació, a la *Taula 29*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 29: Dimensions utilitzades en el CAS 09-15-280 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	2,80	Separació entre aletes
H7	2,65	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,50	Gruix d'aleta
V12	29,50	Alçada de l'aleta
V8	36,50	Alçada total del dissipador

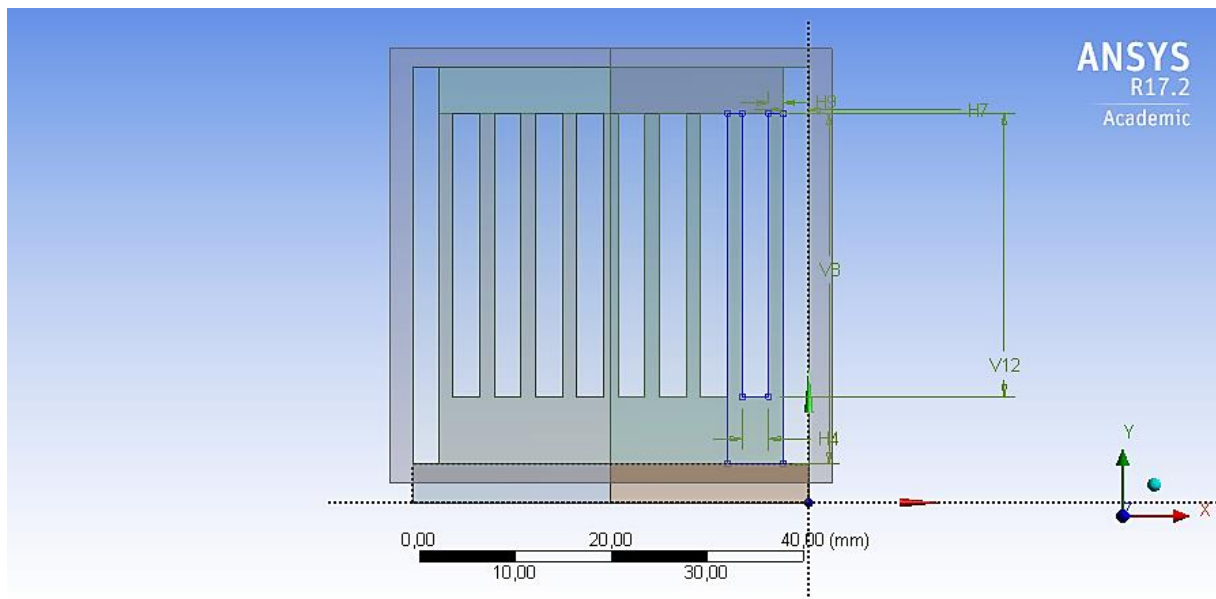


Figura 63: Disseny del dissipador del CAS 09-15-280 en ANSYS

- **CAS 11-15-220:** el disseny que es presenta en la *Figura 64* té un número de 11 aletes on cada una fa 1,5 mm de gruix i estan separades entre sí per 2,2 mm. A continuació, a la *Taula 30*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 30: Dimensions utilitzades en el CAS 11-15-220 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	2,20	Separació entre aletes
H7	1,35	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,50	Gruix d'aleta
V12	29,50	Altura de l'aleta
V8	36,50	Altura total del dissipador

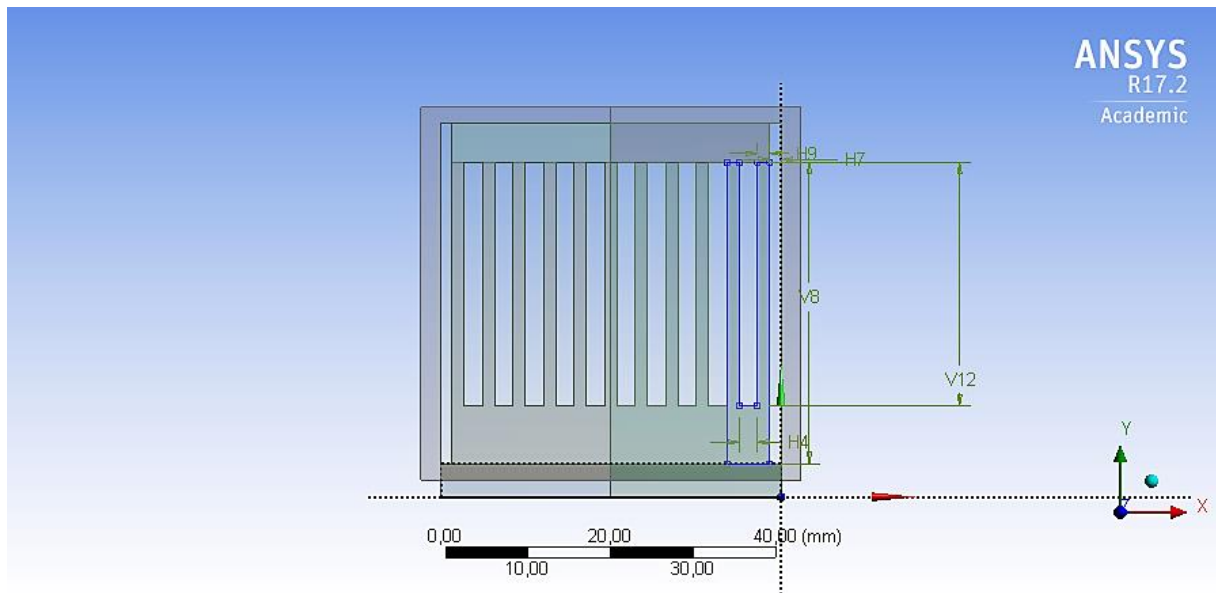


Figura 64: Disseny del dissipador del CAS 11-15-220 en ANSYS

- **CAS 12-10-260:** el disseny que es presenta en la *Figura 65* té un número de 12 aletes on cada una fa 1 mm de gruix i estan separades entre sí per 2,6 mm. A continuació, a la *Taula 31*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 31: Dimensions utilitzades en el CAS 12-10-260 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	2,60	Separació entre aletes
H7	0,30	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,00	Gruix d'aleta
V12	29,50	Alçada de l'aleta
V8	36,50	Alçada total del dissipador

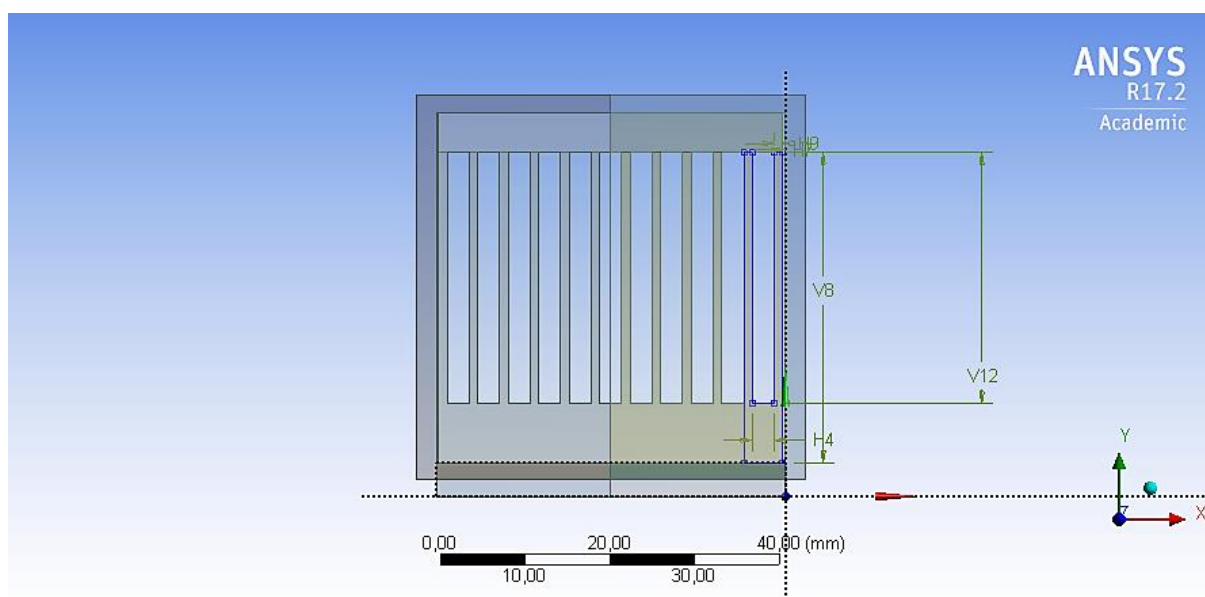


Figura 65: Disseny del dissipador del CAS 12-10-260 en ANSYS

- **CAS 14-10-200:** el disseny que es presenta en la *Figura 66* té un número de 14 aletes on cada una fa 1 mm de gruix i estan separades entre sí per 2 mm. A continuació, a la *Taula 32*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 32: Dimensions utilitzades en el CAS 14-10-200 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	2,00	Separació entre aletes
H7	0,60	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,00	Gruix d'aleta
V12	29,50	Alçada de l'aleta
V8	36,50	Alçada total del dissipador

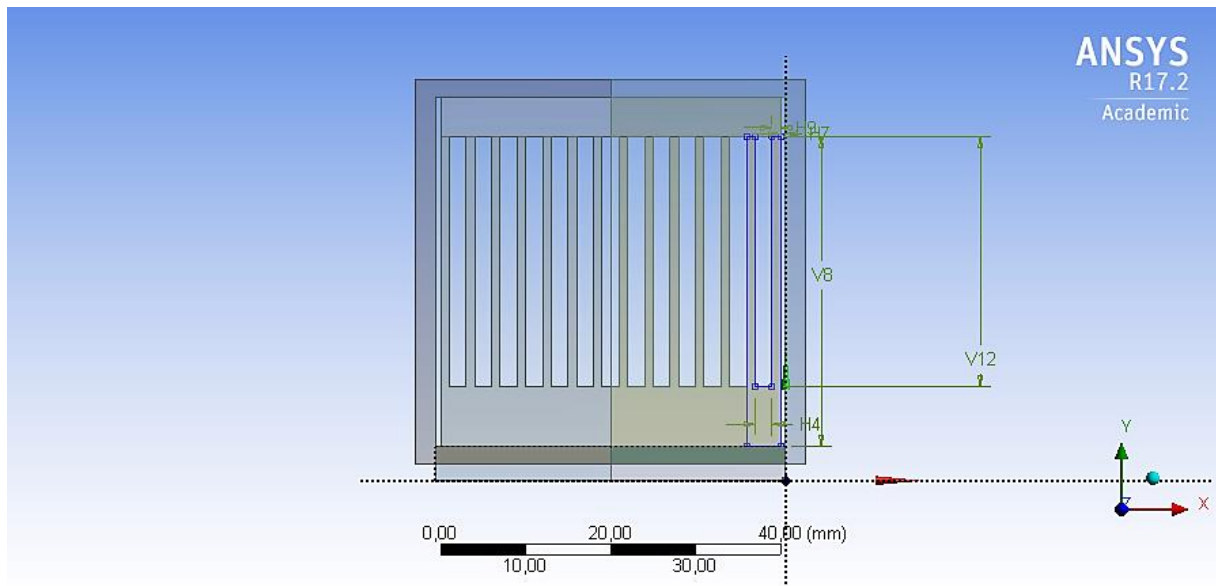


Figura 66: Disseny del dissipador del CAS 14-10-200 en ANSYS

- **CAS 16-10-165:** el disseny que es presenta en la *Figura 64* té un número de 16 aletes on cada una fa 1 mm de gruix i estan separades entre sí per 1,65 mm. A continuació, a la *Taula 33*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 33: Dimensions utilitzades en el CAS 16-10-165 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	1,65	Separació entre aletes
H7	0,225	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,00	Gruix d'aleta
V12	29,50	Altura de l'aleta
V8	36,50	Altura total del dissipador

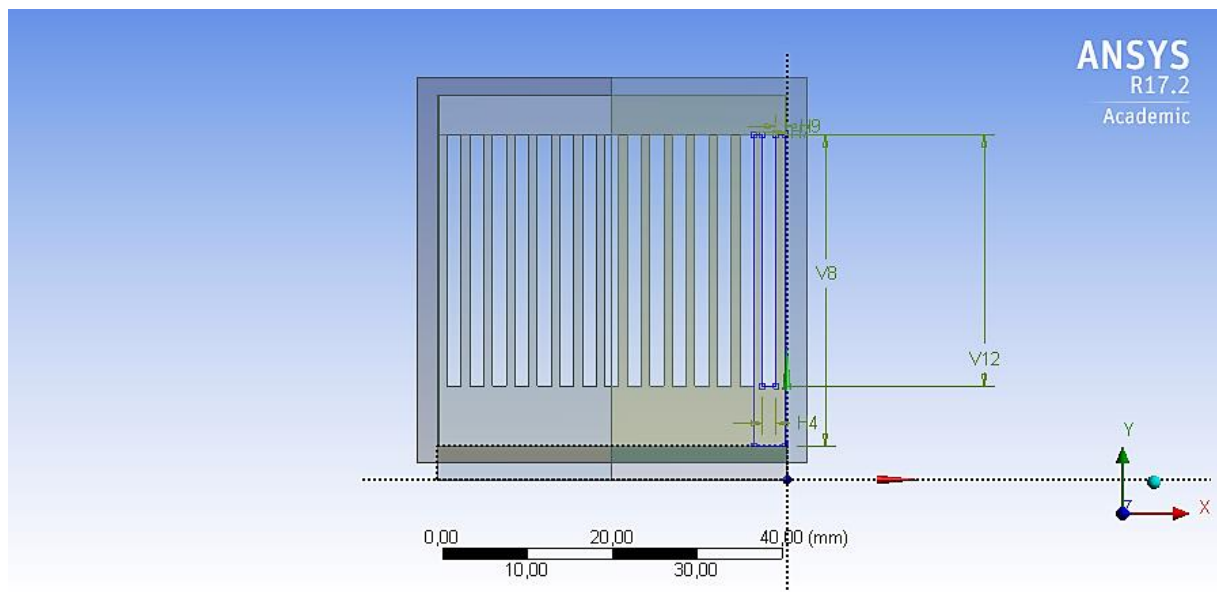


Figura 67: Disseny del dissipador del CAS 16-10-165 en ANSYS

- **CAS 12-15-210:** el disseny que es presenta en la *Figura 68* té un número de 12 aletes on cada una fa 1,5 mm de gruix i estan separades entre sí per 2,1 mm. A continuació, a la *Taula 34*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 34: Dimensions utilitzades en el CAS 12-15-210 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	2,10	Separació entre aletes
H7	0,05	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,50	Gruix d'aleta
V12	29,50	Altura de l'aleta
V8	36,50	Altura total del dissipador

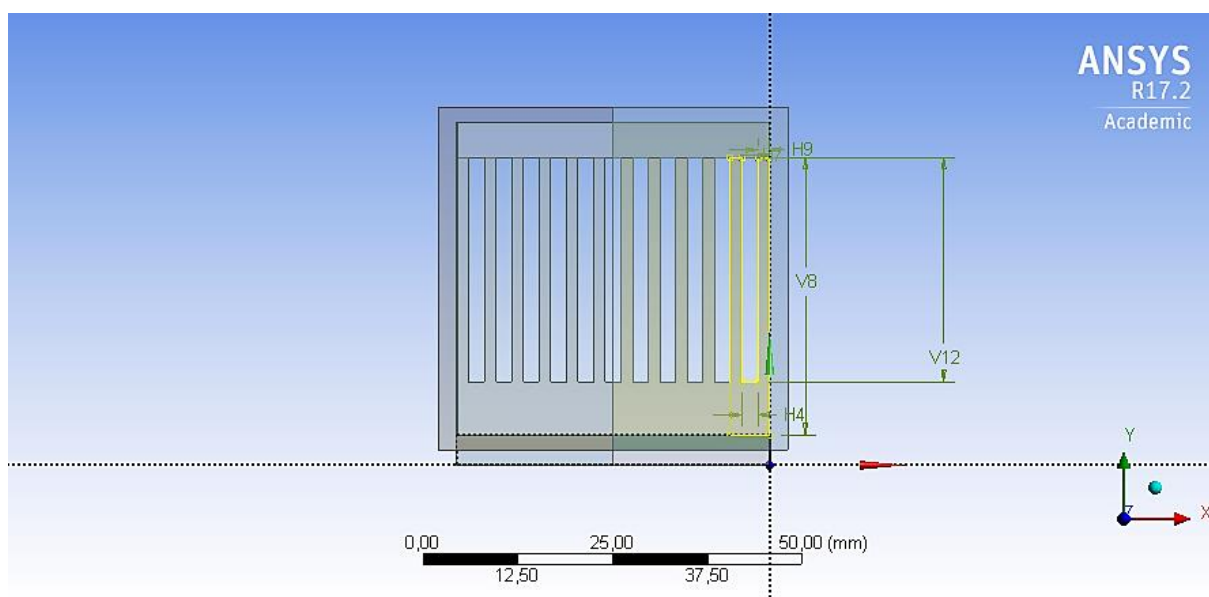


Figura 68: Disseny del dissipador del CAS 12-15-210 en ANSYS

- **CAS 14-15-150:** el disseny que es presenta en la *Figura 69* té un número de 14 aletes on cada una fa 1,5 mm de gruix i estan separades entre sí per 1,5 mm. A continuació, a la *Taula 35*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 35: Dimensions utilitzades en el CAS 14-15-150 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	1,50	Separació entre aletes
H7	0,35	Distància entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,50	Gruix d'aleta
V12	29,50	Altura de l'aleta
V8	36,50	Altura total del dissipador

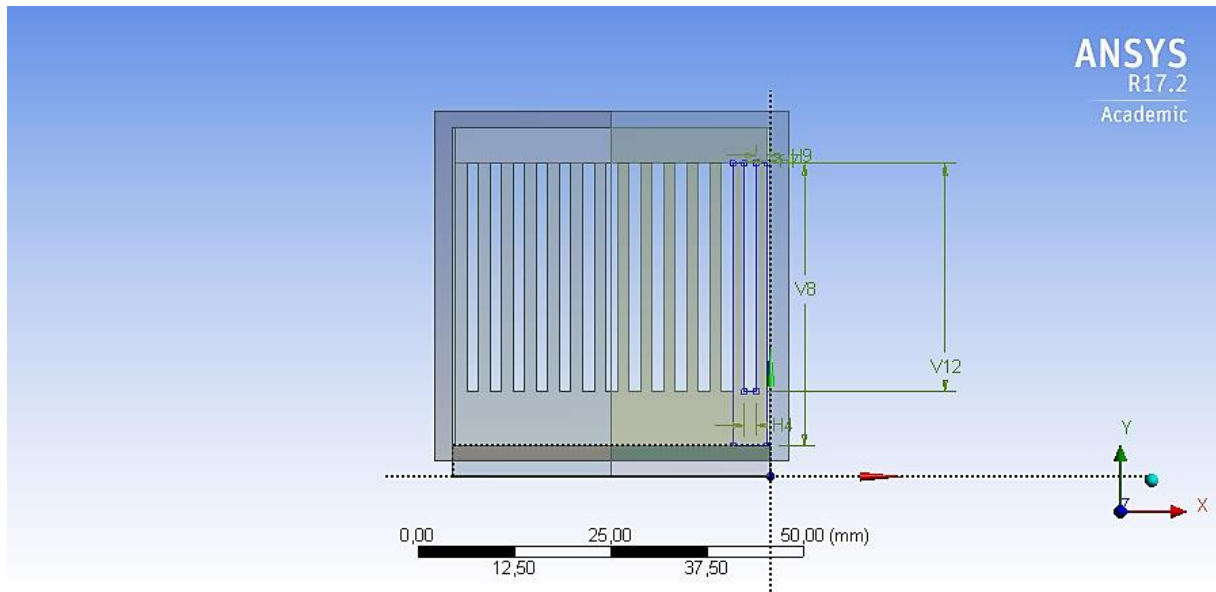


Figura 69: Disseny del dissipador del CAS 14-15-150 en ANSYS

- **CAS 16-15-110:** el disseny que es presenta en la *Figura 70* té un número de 16 aletes on cada una fa 1,5 mm de gruix i estan separades entre sí per 1,1 mm. A continuació, a la *Taula 36*, s'exposen les mides utilitzades per la creació d'aquest disseny :

Taula 36: Dimensions utilitzades en el CAS 16-15-110 en ANSYS

Nomenclatura ANSYS	Mides (mm)	Descripció
H4	1,10	Separació entre aletes
H7	0,35	Distancia entre les parets laterals dissipadors i les parets laterals internes del tub d'acer
H9	1,50	Gruix d'aleta
V12	29,50	Altura de l'aleta
V8	36,50	Altura total del dissipador

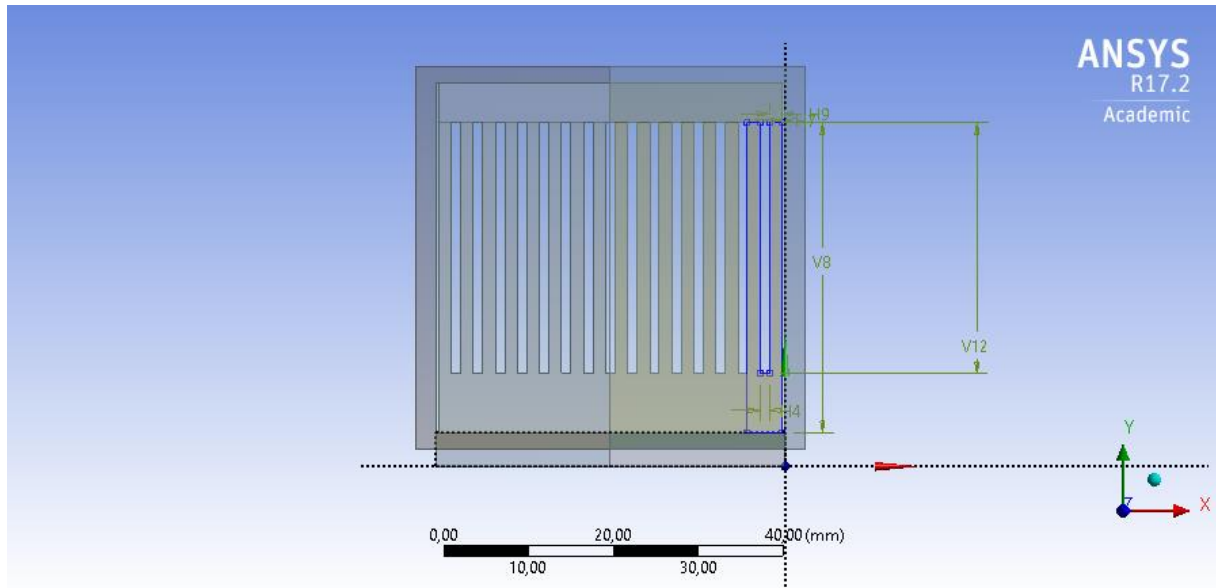


Figura 70: Disseny del dissipador del CAS 16-15-110 en ANSYS

A l'hora de crear la geometria dels dissipadors s'ha fet també una extrusió de 40 mm per tal que ocupi tota la longitud del mòdul termoelèctric. A més, s'ha realitzat una matriu de components a partir del croquis realitzat per tal que l'ANSYS Design Modeler crees les diferents aletes que conformaran els dissenys elaborats.

8. RESULTATS I DISCUSSIÓ

8.1. Introducció

S'ha simulat amb diferents condicions de contorn a l'entrada del conducte (canviant les velocitats d'entrada del flux d'aire) els dissipadors mostrats a l'apartat 7: Disseny dels dissipadors. Els resultats estan recollits en fulls de càlcul de l'EXCEL i són massa extensos per incloure'ls al Document 1: Memòria però sí que s'adjunten en la còpia electrònica del projecte. A partir de la Taula 37, es pot identificar en quina full de càlcul de l'EXCEL es podran trobar els resultats de cada cas:

Taula 37: Identificació dels resultats dels casos segons la fulla de càlcul EXCEL on es troben

CAS	Nom de la fulla de càlcul
10-10-300	<i>Simulation_ANSYS_1</i>
09-10-340	<i>Simulation_ANSYS_2</i>
09-10-367	<i>Simulation_ANSYS_3</i>
11-15-200	<i>Simulation_ANSYS_4</i>
09-15-280	<i>Simulation_ANSYS_5</i>
11-15-220	<i>Simulation_ANSYS_6</i>
12-10-260	<i>Simulation_ANSYS_7</i>
14-10-200	<i>Simulation_ANSYS_8</i>
16-10-165	<i>Simulation_ANSYS_9</i>
12-15-210	<i>Simulation_ANSYS_10</i>
14-15-150	<i>Simulation_ANSYS_11</i>
16-15-110	<i>Simulation_ANSYS_12</i>

Així mateix, per la discussió dels resultats, s'han comparat els casos partint d'aquests criteris:

- Casos amb 1 mm de gruix d'aletes.
- Casos amb 1,5 mm de gruix d'aletes.
- Casos amb 9 aletes.
- Casos amb 11 aletes.
- Casos amb 12 aletes.

- Casos amb 14 aletes.
- Casos amb 16 aletes.
- Casos amb una separació entre aletes de més d'1 mm i menys de 2 mm.
- Casos amb una separació entre aletes de més de 2 mm i menys de 3 mm.
- Casos amb una separació entre aletes de més de 3 mm.

Per cada cas s'ha dut a terme 10 simulacions, on el rang de les velocitats que s'entraven en les condicions de contorn d'entrada de l'ANSYS van des de 0,5 m/s fins a 5 m/s. A diferència del cas del dissipador de 12 aletes que s'utilitza en el dispositiu real i que s'ha simulat amb ANSYS, aquests dissenys s'han simulat amb una geometria que no compta amb tomes de pressió d'aire (*Figura 71*):

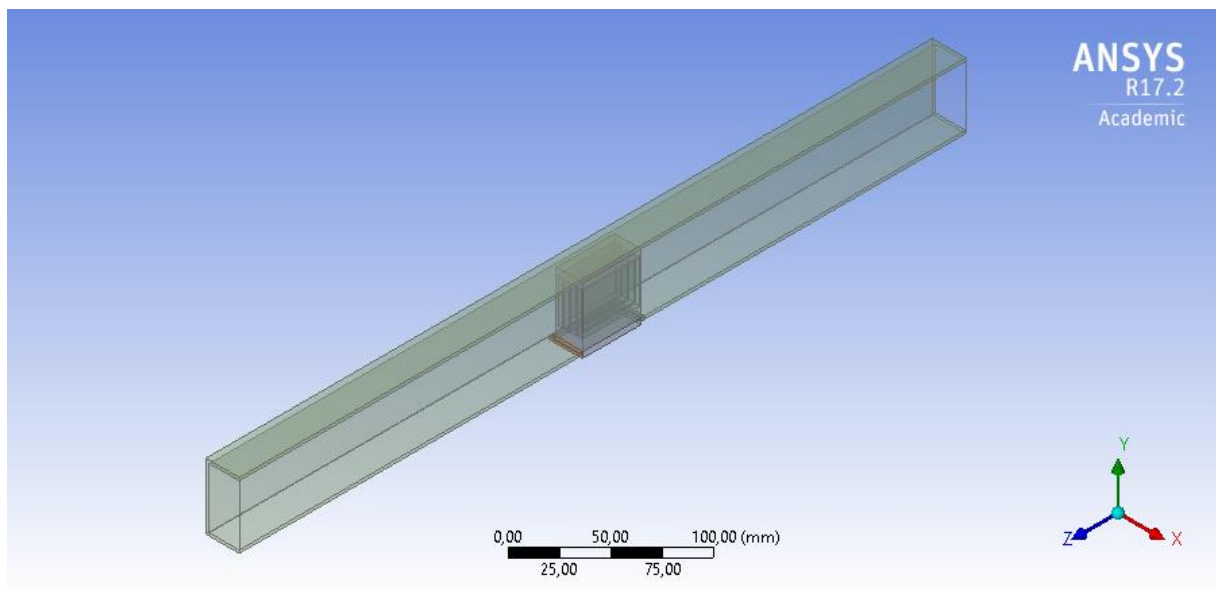


Figura 71: Geometria del tub d'acer sense tomes de pressió, CAS 09-10-340

Aquest fet no preocupa, amb l'ANSYS es pot establir uns plans en l'etapa "Results" (veure *Annex B: Simulacions en ANSYS*) amb els quals es pot crear unes expressions que definiran els resultats de sortida. Per això, s'ha creat uns plans que simulen les tomes de pressió que es tenen en la realitat, per llavors poder obtenir la diferència de pressions tant en l'entrada com en la sortida del dissipador (*Figura 72*):

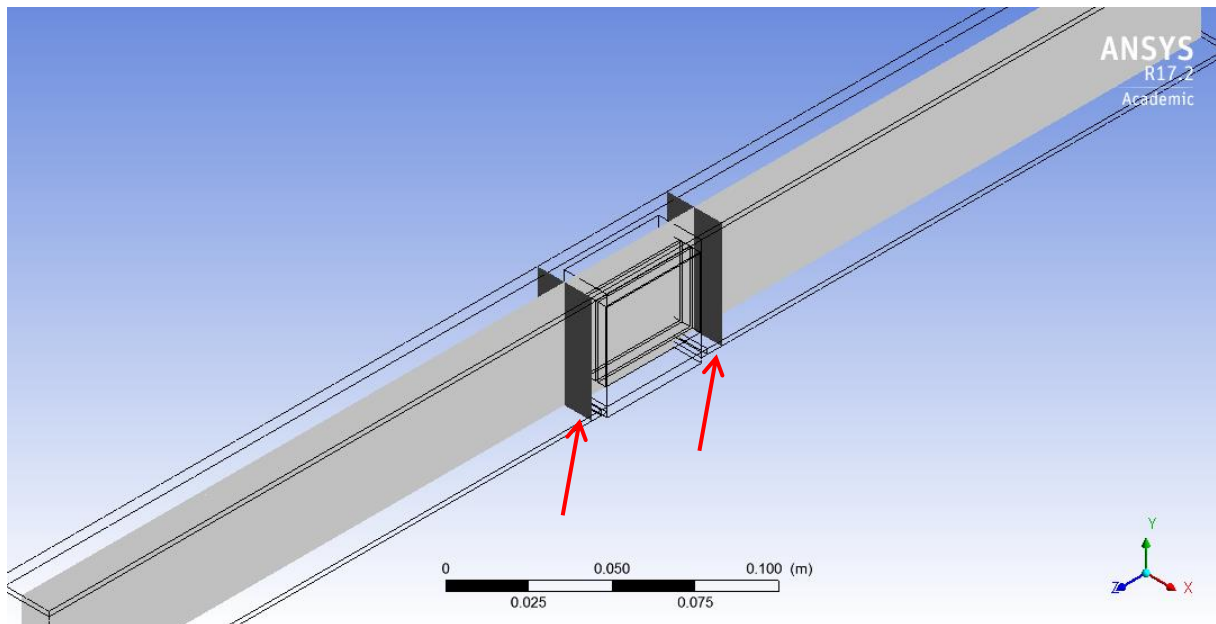


Figura 72: Plans pel càlcul de la pressió en ANSYS a l'entrada i sortida del dissipador

En els dissenys simulats amb ANSYS CFX no es compta amb les plaquetes de llautó laterals però sí amb les superiors. La unió de les plaquetes de llautó laterals amb les parets laterals internes del tub d'acer, faria que hi hagués un augment, encara més considerable, de temperatura del tub d'acer que no es desitja. Cal recordar que les plaquetes són transmissores de calor perquè es troben en contacte amb el dissipador que dissipa la calor rebutjada per la cara freda del mòdul termoelèctric.

8.2. Discussió

En aquest apartat es pretén comparar els diferents dissipadors seguint els criteris explicats al principi d'aquest apartat. A part d'això, s'explica, segons les seves dimensions, amb quin procés de fabricació es podrien dur a terme la geometria del dissipador, el balanç net d'energia que assoleixen i el preu que costaria segons el mètode de fabricació. A més, s'exposen les animacions de comportament del model i s'expliquen que passa en cada un d'elles. Aquestes animacions presenten una taula tabulada numèricament segons una escala de colors on es mostra la intensitat de la temperatura, de la pressió o de la velocitat que presenta el model en les simulacions. Tots els dissipadors d'aletes es proposen fer-los d'alumini per motius de cost i perquè disposa d'una gran conductivitat tèrmica.

A la *Taula 38*, s'exposen els dissenys amb les seves característiques dimensionals i, a més, amb el procés de fabricació amb el qual es desenvoluparia:

Taula 38: Característiques dimensionals dels dissipadors juntament amb el seu procés de fabricació establert

CAS	Altura total dissipador (mm)	Altura d'aleta (mm)	Núm. d'aletes	Gruix d'aleta (mm)	Separació entre aletes (mm)	Procés de fabricació
10-10-300	36,50	29,50	10	1,0	3,00	Extrusió
9-10-340	36,50	29,50	9	1,0	3,40	Extrusió
9-10-367	36,50	29,50	9	1,0	3,67	Extrusió
11-15-200	36,50	29,50	11	1,5	2,00	"Bonded"
9-15-280	36,50	29,50	9	1,5	2,80	"Bonded"
11-15-220	36,50	29,50	11	1,5	2,20	"Bonded"
12-10-260	36,50	29,50	12	1,0	2,60	"Bonded"
14-10-200	36,50	29,50	14	1,0	2,00	"Bonded"
16-10-165	36,50	29,50	16	1,0	1,65	"Bonded"
12-15-210	36,50	29,50	12	1,5	2,10	"Bonded"
14-15-150	36,50	29,50	14	1,5	1,50	"Bonded"
16-15-110	36,50	29,50	16	1,5	1,10	"Bonded"

Si es consulta el subapartat 3.4 d'aquest document: *Tipus segons mètodes de fabricació*, es pot predir quins mètodes de fabricació seran els idonis per la fabricació dels dissipadors dissenyats amb ANSYS:

- **Estampació:** es descarta completament per la geometria aplicada en els diferents dissipadors realitzats.

- **Extrusió:** és el procés més econòmic, és ideal pels dissipadors que s'han dissenyat que sobrepassen una separació entre aletes de més de 3 mm.
- **“Bonding”:** més car que l'extrusió però ens servirà per a tots aquells dissipadors que comprenen una separació entre aletes menor a 3 mm.
- **“Folding”:** per la geometria final que dóna aquest tipus de dissipadors, es descarta la fabricació per aquest mètode.
- **“Skiving”:** la unió de les aletes amb la base del dissipador, presenta una geometria arrodonida. En els dissenys presentats, aquesta unió, és recta. Per tant, es descarta.
- **Forja:** es podrien dur a terme però és un procés lent, ja que primer s'ha d'escalfar el bloc de partida i posteriorment, quan es té la geometria demanada, s'han de realitzar diferents processos secundaris d'acabat. Podria augmentar el preu de fabricació i per això es descarta.
- **“Modified die-casting”:** es descarta per motius molt semblants en els exposats per forja.
- **Mecanitzat:** igual que els dos anteriors, podria elevar el cost de fabricació i per això es descarta.

Dintre de l'apartat que es mostrarà a continuació, a part de mostrar els valors de potència neta que s'han aconseguit en els diferents casos, també es parlarà dels diferents resultats de diferència de pressions i diferència de temperatures, en les cares del mòdul termoelèctric, que s'han assolit, ja que per obtenir el balanç net d'energia seran factors claus. Per tal que s'entengui com varien aquests resultats segons diferents velocitats d'entrada d'aire, s'ha agafat la diferència de pressions i la diferència de temperatures del mòdul, per a una configuració concreta de dissipador com pot ser la que es té en els casos amb una separació d'aletes superior a 2 mm però inferior a 3 mm (veure *Taula 39*):

Taula 39: Diferència de pressions i temperatures (del mòdul termoelectric) assolides pels cassos amb 9 aletes

v (m/s)	CAS 9-10-340		CAS 9-10-367		CAS 9-15-280	
	Dif. Pressió (Pa)	Dif. T (°C)	Dif. Pressió (Pa)	Dif. T (°C)	Dif. Pressió (Pa)	Dif. T (°C)
0,5	0,59	107,32	0,64	108,24	0,88	110,56
1	2,07	114,68	2,23	116,26	3,13	118,72
1,5	4,37	120,38	4,71	122,48	6,61	125,39
2	7,47	122,48	8,02	125,68	11,30	128,61
2,5	11,35	127,34	12,12	130,77	17,18	133,63
3	15,89	131,78	17,12	135,31	24,18	138,54
3,5	21,36	135,83	22,93	139,22	32,50	142,47
4	27,57	139,18	29,53	142,60	41,92	145,76
4,5	34,50	142,04	36,95	145,65	52,46	148,62
5	42,20	144,63	45,25	148,34	64,16	151,16

Tal com mostra la *Taula 39*, la diferència de pressions augmentarà a mesura que s'assoleixi major velocitat. En canvi, la diferència de temperatures a les cares del mòdul, disminuirà.

Tant mateix, a la *Taula 40*, s'agafen els millors resultats de cada cas, i es mostra les pressions que han assolit tant a l'entrada (*P ent.*) com a la sortida (*P sort.*) del dissipador i les temperatures que han obtingut la cara calenta (*T hot*) i la cara freda (*T cold*) del mòdul:

Taula 40: Pressions i temperatures de les cares del mòdul obtinguts en els millors resultats de cada cas

Casos	P ent. (Pa)	P sort. (Pa)	T hot (°C)	T cold (°C)
CAS 10-10-300	19,10	-5,40	250	111,58
CAS 09-10-340	16,27	-5,09	250	114,17

CAS 09-10-367	17,19	-5,73	250	110,79
CAS 11-15-200	29,53	-5,40	250	102,29
CAS 09-15-280	25,92	-6,59	250	107,53
CAS 11-15-220	31,69	-5,66	250	98,09
CAS 12-10-260	27,02	-7,12	250	97,98
CAS 14-10-200	36,20	-7,09	250	90,55
CAS 16-10-165	35,99	-5,64	250	89,25
CAS 12-15-210	39,86	-7,30	250	93,98
CAS 14-15-150	45,29	-5,16	250	91,45
CAS 16-15-110	49,41	-3,53	250	90,30

D'aquesta taula es pot treure informació sobre com, per exemple, la gran majoria de casos que tenen una pressió d'entrada elevada és perquè tenen més nombre d'aletes i més gruix d'aquestes. La pressió a la sortida dels dissipadors mostra valors bastant semblants en tots els casos, menys pel "CAS 16-15-110". A part, s'observa, també, com la separació entre aletes, pot afectar a què hi hagi més pèrdues de càrrega però com fa disminuir el valor de la temperatura de la cara freda, cosa que es traduirà en una diferència de temperatures major.

Tot seguit, se separen els casos segons els criteris explicats prèviament i es discuteixen els seus resultats de manera numèrica (on s'escull el millor disseny i es compara el perquè pot haver donat un valor major que els altres casos). Posteriorment, s'analitza el cas escollit a partir dels resultats obtinguts a l'etapa "Results" de l'ANSYS. I finalment, s'anomena el preu que podria costar aquest tipus de dissipador seleccionat.

8.2.1. Efecte del gruix d'aletes

En aquest apartat es comparen els dissipadors que comparteixen el mateix gruix d'aletes:

- **Casos amb 1 mm de gruix d'aletes:** aquests dissipadors es caracteritzen per tenir un gruix d'aleta d'1 mm. Dintre aquest grup, es troben dissipadors que estan conformats per un nombre d'aletes que van des de 9 aletes fins a 16 aletes. És a dir, aquest grup cobreix tots els números d'aletes que s'han realitzat en aquest projecte, menys el grup de dissipador d'11 aletes que es troba en una altra categoria, com es pot comprovar a la *Taula 41*:

Taula 41: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons un gruix d'aletes d'1 mm

	10 aletes i 3 mm de separació entre aletes	9 aletes i 3,4 mm de separació entre aletes	9 aletes i 3,67 mm de separació entre aletes	12 aletes i 2,6 mm de separació entre aletes	14 aletes i 2 mm de separació entre aletes	16 aletes i 1,65 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)					
v (m/s)	CAS 10-10-300	CAS 09-10-340	CAS 09-10-367	CAS 12-10-260	CAS 14-10-200	CAS 16-10-165
0,5	1,065	1,038	1,057	1,241	1,328	1,403
1	1,225	1,191	1,227	1,474	1,590	1,707
1,5	1,356	1,312	1,362	1,640	1,787	1,923
2	1,393	1,340	1,418	1,696	1,882	2,027
2,5	1,475	1,427	1,512	1,808	1,998	2,136
3	1,545	1,493	1,580	1,884	2,066	2,188
3,5	1,575	1,531	1,613	1,904	2,069	2,159
4	1,566	1,530	1,610	1,874	2,003	2,047
4,5	1,515	1,491	1,572	1,791	1,869	1,845
5	1,423	1,417	1,492	1,647	1,662	1,551

Com es pot apreciar, amb el que s'obté millor balanç net d'energia és amb el dissipador dissenyat en el "CAS 16-10-165". S'observa que el dissipador del "CAS 14-10-200" està molt a la par amb el resultat aconseguit en el "CAS 16-10-165" però aquest penúltim, per tal d'aconseguir la major potència neta, necessita una velocitat de circulació del flux d'aire de 3,5 m/s. Això vol dir que el ventilador necessita més potència per aconseguir la demanda de velocitat d'aire d'entrada, més concretament de 0,416 W, envers els 0,343 W que consumirà el ventilador en el "CAS 16-10-165" pel major resultat de potència neta (es pot consultar aquestes dades en els fulls de càlcul EXCEL adjuntats en la còpia

electrònica del projecte). Interessa que la potència consumida sigui com més petita millor per tal que la diferència entre aquest i la potència generada pel mòdul termoelèctrica sigui menor. Amb la *Figura 73* es pot analitzar els resultats de manera representativa:

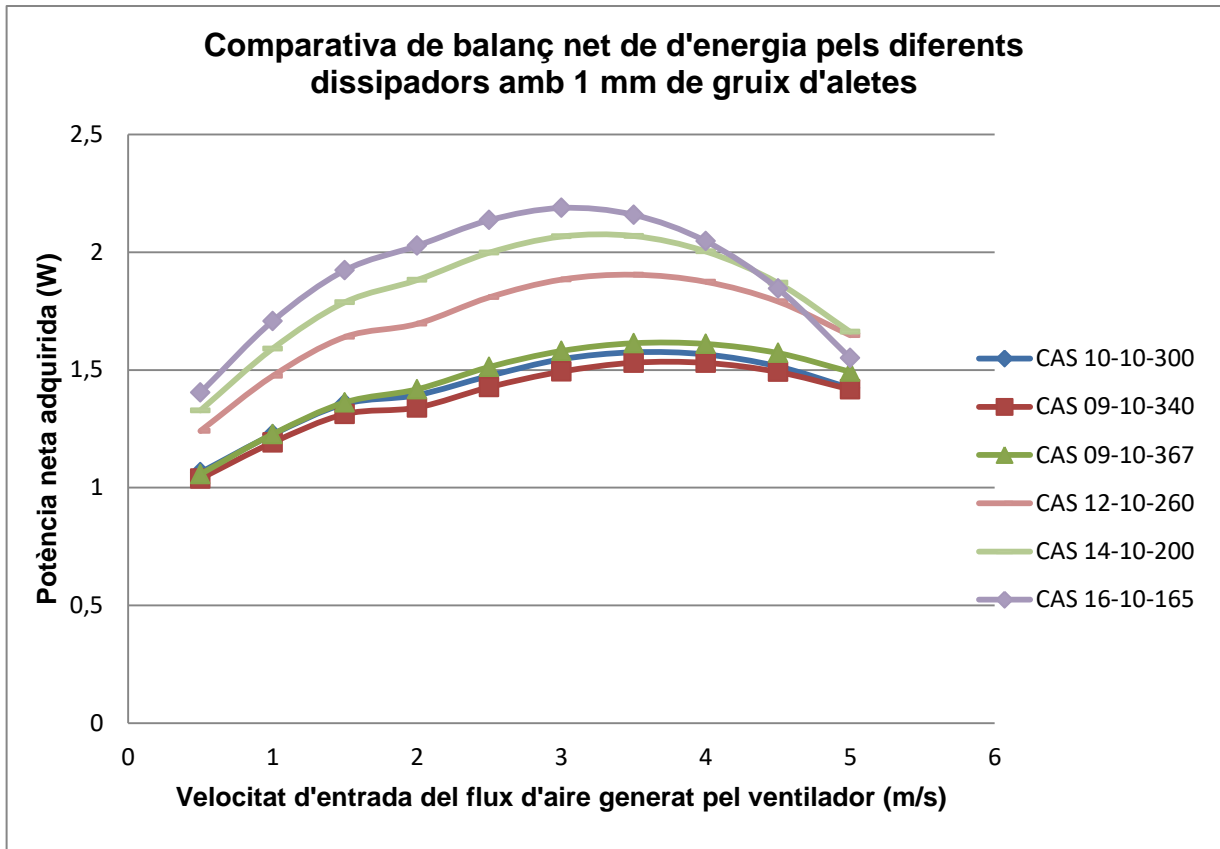


Figura 73: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb un gruix d'1 mm d'aletes

Ara es vol entrar en detall amb el cas que ha aconseguit un millor balanç d'energia neta. Per això, s'utilitzen els resultats aconseguits a l'etapa "Results" de l'ANSYS, per poder veure en quines condicions es troba el model segons la pressió exercida pel flux d'aire, la temperatura a la qual es troben tant les parts sòlides com fluids que interactuen en el model i la velocitat amb la qual varia el flux d'aire com a conseqüència de la col·locació del dissipador.

A continuació, es mostren els comportaments assolits durant la simulació amb millor balanç net d'energia del "CAS 16-10-165".

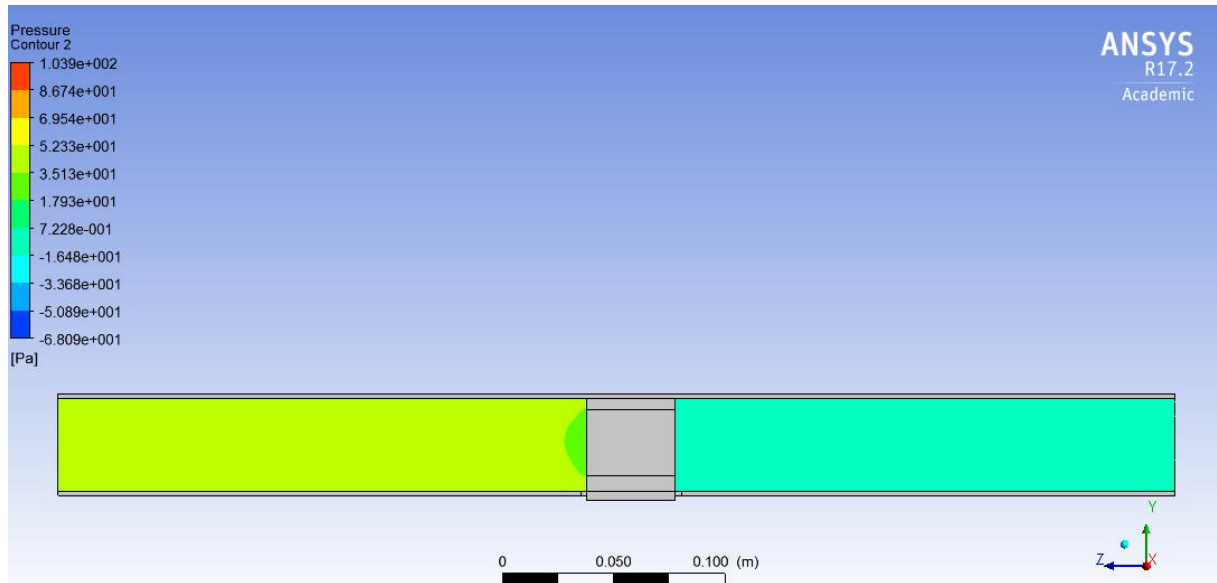


Figura 74: Pressió a la qual està sotmès l'aire en diferents trams del tub d'acer

Posteriorment, com es pot veure a la *Figura 74*, l'aire va disminuint la seva pressió a mesura que va entrant en contacte amb el dissipador i al final, quan deixa de tenir contacte amb el dissipador, disminueix la seva pressió fins a obtenir un valor negatiu. La pressió que s'obté a la sortida del dissipador és de -5,64 Pa (tots els resultats es podran consultar en els fulls EXCEL que s'adjunten en la còpia electrònica del projecte i en aquest cas en concret, en el full EXCEL: *Simulation_ANSYS_9*). La disminució de la pressió de l'aire fins a un valor negatiu es deu a la presència del dissipador que fa d'element obstructiu.

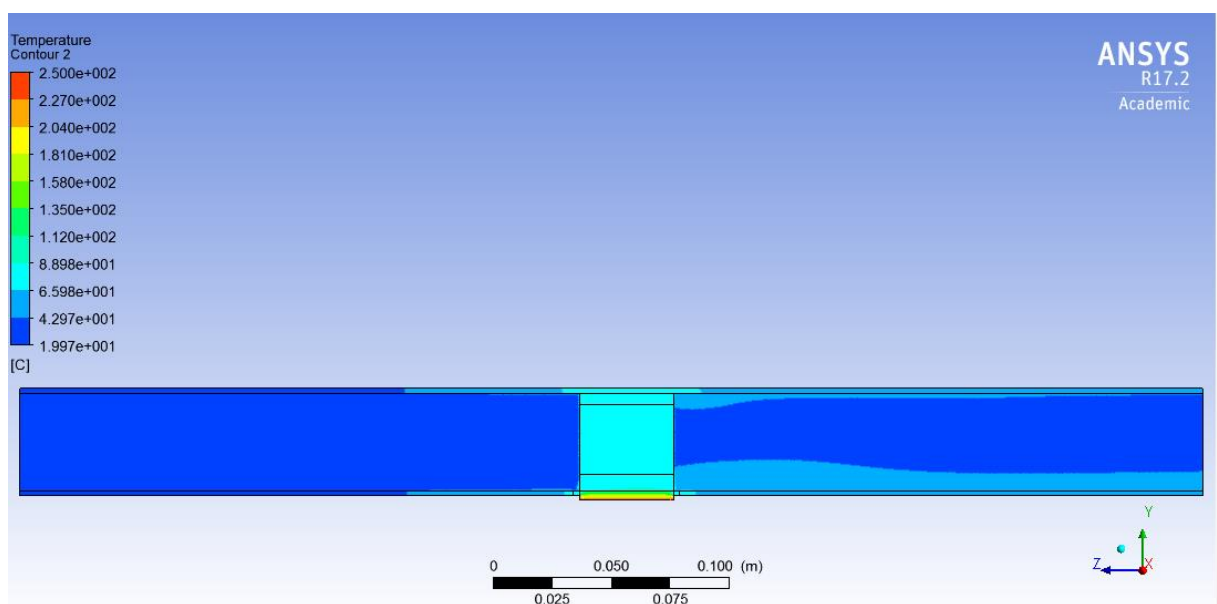


Figura 75: Temperatura a la qual estan sotmeses les diferents parts

La *Figura 75* mostra el comportament tèrmic tant de les parts sòlides com de les parts fluides del model. L'aire entra dintre el model amb una temperatura de 20 °C (veure *Annex B: Simulacions en ANSYS*) i augmenta el seu valor aigües avall del dissipador. Aquest augment de la temperatura no es produeix en tot el seu volum, tal com es pot veure a la sortida del dissipador. A mesura que flueix pel tub, va recuperant el seu comportament tèrmic de 20 °C, com a conseqüència d'anar-se allunyant del dissipador d'aletes. En el centre del model, es troben el dissipador d'aletes, el mòdul termoelèctric, les plaquetes de llautó i el volum de control. Aquests presenten un comportament tèrmic més elevat que l'aire per culpa del mòdul. Com s'ha anat explicant al llarg del document, el mòdul termoelèctric s'escalfa a una temperatura constant de 250 °C en la seva cara calenta i llavors, la seva cara freda, rebutja aquesta calor. El dissipador d'aletes en estar amb contacte amb la cara freda del mòdul, s'escalfa i dissipa aquesta calor a través de les aletes. A part, les aletes, en estar amb contacte amb les plaquetes de llautó, transmeten calor a aquestes i successivament, les plaquetes de llautó, transmeten calor en el tub. Si es mira el centre del model i s'observa l'escala de colors tabulada numèricament a la part esquerra de la imatge, es pot observar com es té un valor elevat de temperatura marcat en vermell (representa la cara calenta del dissipador i està a 250 °C) que va tendint a disminuir (el dissipador va dissipant la calor rebutjada per la cara freda que es troba a 89,25 °C en aquest cas). Els resultats numèrics d'aquest cas es trobaran en els fulls de càlcul EXCEL que s'adjuntaran a la còpia electrònica.

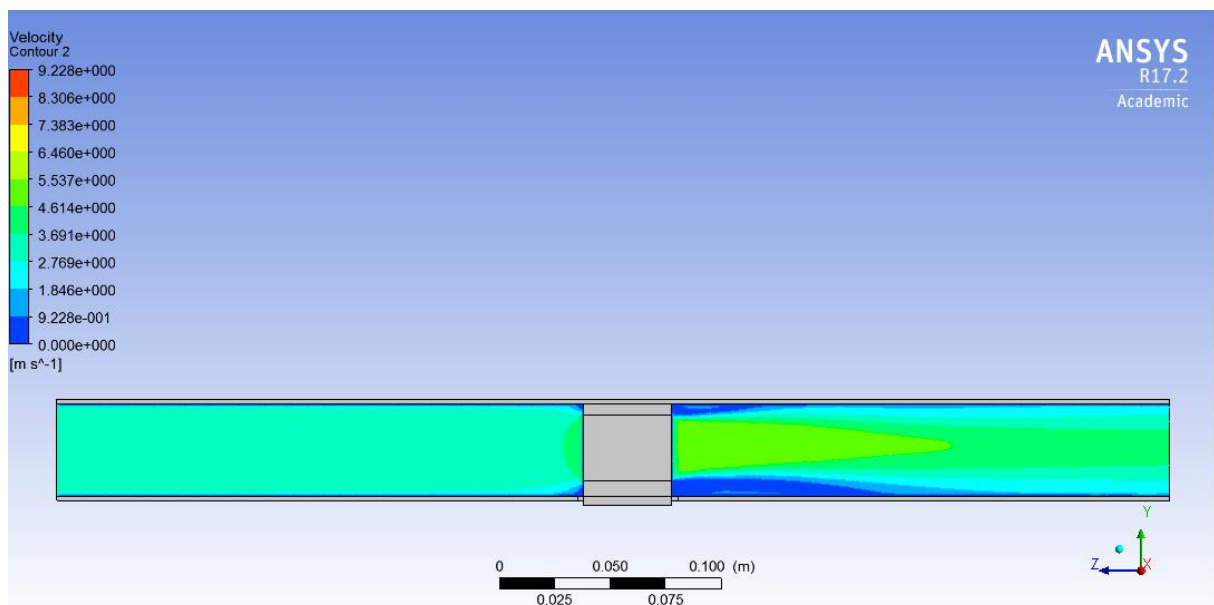


Figura 76: S'observa com la velocitat del flux d'aire varia per culpa la presència del dissipador

A partir de la *Figura 76*, es pot avaluar com l'aire va tendint a augmentar la seva velocitat aigües avall del dissipador (es passa de tenir una velocitat inicial de 3 m/s a una velocitat que va de 4,614 m/s a 5,537 m/s) però com després intenta recuperar el valor inicial que presentava inicialment. Tal com mostra la *Figura 76*, l'aire disminueix la seva velocitat en els seus extrems inferior i superior (presenta un rang de velocitats que va de 0 a 1,846 m/s), quan entra en contacte amb el dissipador, i augmenta la seva velocitat en el centre per tal de poder passar a través de les aletes del dissipador (augmenta la velocitat d'entrada de 3 m/s i es té una velocitat de circulació compresa entre 3,691 i 4,614 m/s).

Si la simulació amb millor resultat energètic (que disposa d'una major àrea d'intercanvi en tenir 16 aletes), es compara amb els resultats que s'obtenen en les simulacions produïdes amb el menor i major valor de velocitat d'entrada (0,5 i 5 m/s), el resultat és el següent:

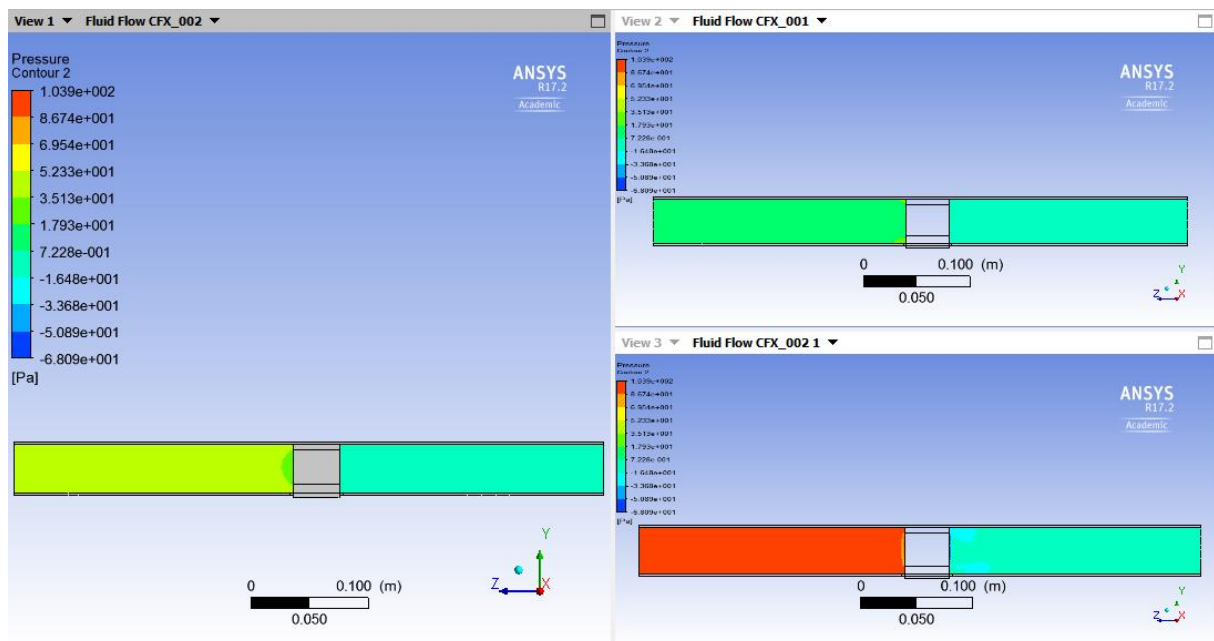


Figura 77: Comparació de pressions segons el valor d'entrada d'aire

A la *Figura 77*, es compara les pressions obtingudes pel model durant les simulacions amb millor balanç net d'energia (a 3 m/s, imatge més gran), amb la velocitat d'entrada més baixa (a 0 m/s, imatge superior de la dreta) i amb la velocitat d'entrada més alta (a 5 m/s, imatge inferior de la dreta). Es pot apreciar com les pressions d'aire augmentant aigües amunt del dissipador, a mesura que s'augmenta la velocitat d'entrada. Per la simulació amb major valor d'entrada, es mostra com la pressió en els extrems superior i

inferior aigües a baix del dissipador, és un valor inferior que llavors tendeix a augmentar assolint un rang de pressions compreses entre -1,648 i 7,228 Pa. Això és a causa de la velocitat d'entrada de l'aire que fa assolir valors de pressió bastants elevats que fan que a l'aire li dificulti més recuperar-se i estabilitzar-se en un valor de pressió concret just a la sortida del dissipador.

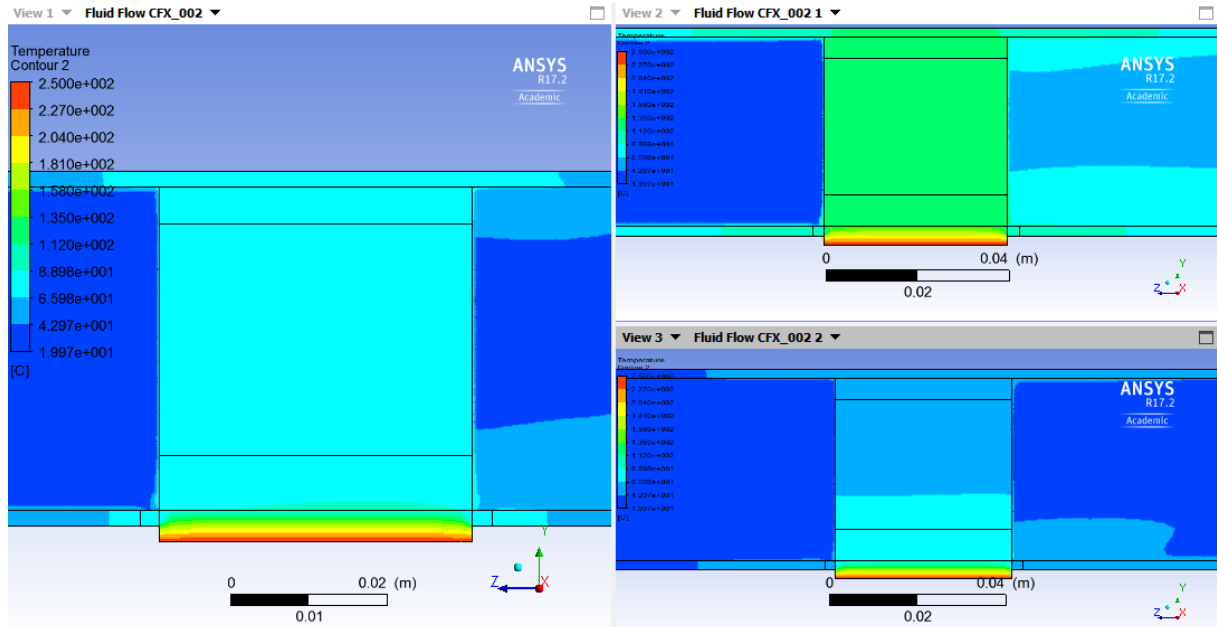


Figura 78: Temperatura aconseguida en els diferents objectes segons el valor d'entrada d'aire

Així mateix, la *Figura 78*, mostra el comportament tèrmic que presenten les parts sòlides: dissipador, mòdul termoelectrònic i plaquetes de llautó. Utilitzant el mateix ordre de col·locació de les imatges segons la velocitat d'entrada, tal com s'havia fet en la *Figura 77*, es mostra com la velocitat d'entrada de l'aire influeix bastant a assolir menors temperatures en aquestes parts sòlides. Una velocitat d'entrada baixa no refrigera prou les aletes del dissipador per tal que dissipin de forma adequada la calor emesa per la cara freda del mòdul a la seva base. Això comporta un augment de la temperatura de la cara freda del mòdul i a una disminució de la diferència de temperatures entre les cares que es pot traduir en una potència produïda pel mòdul termoelectrònic bastant baixa. Envers, una velocitat d'aire d'entrada major, facilita la refrigeració de les aletes perquè dissipin de forma eficient la calor rebutjada per la cara freda del mòdul i impliqui una disminució de la temperatura de la cara freda que es veurà traduït en un augment de la diferència de temperatures entre les cares i de la potència produïda pel mòdul. El valor de temperatura que assolix el dissipador en la simulació amb menys velocitat d'entrada està compres en un rang entre 65,98 i 88,98 °C que produeix una temperatura en la cara

freda del mòdul de 126,55 °C (es pot consultar aquesta dada en el full de càlcul EXCEL: *Simulation_ANSYS_9* adjuntat en la còpia electrònica del projecte). Per altra banda, les temperatures que assoleix el dissipador en la simulació amb més velocitat d'entrada estan compreses en un rang entre 65,98 i 88,98 °C, en la part més pròxima a la cara freda del mòdul, i en un altre rang de temperature entre 42,97 i 65,98 °C, en la part més allunyada de la cara freda, que produeixen una temperatura en la cara freda del mòdul de 74,90 °C (es pot consultar aquesta dada de temperatura de la cara freda del mòdul en el full de càlcul EXCEL adjuntat en la còpia electrònica del projecte).

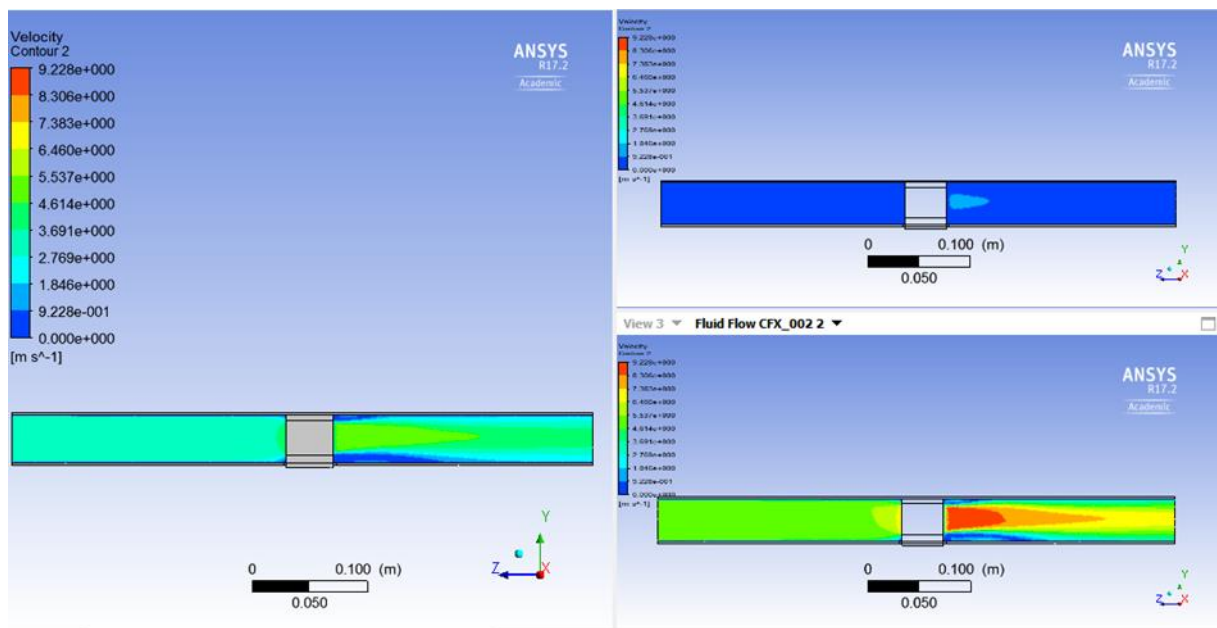


Figura 79: Velocitat amb la qual varia el flux d'aire al llarg del tub d'acer, com a conseqüència de la col·locació del dissipador

En la *Figura 79*, es visualitza com la velocitat de l'aire tendeix a mostrar valors cada vegada més elevats aigües avall del dissipador i com li costa aquest recuperar el valor inicial d'entrada. Aquest fet es pot veure bastant exemplificat en el cas amb major velocitat d'entrada, on es té uns valors de velocitat d'aire, aigües avall del dissipador, que van des de 0 m/s fins a 9,228 m/s.

Per acabar, s'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 25 €. Aquest valor de preu s'estima com a conseqüència de la utilització del mètode de fabricació anomenat "bonded" (serà bastant més car que els dissipadors fabricats per extrusió) i pel nombre d'aletes que s'hauran de col·locar. Els dissipadors amb més aletes presentaran un preu major. En aquest cas, aquest dissipador presenta un número de 16

aletes i és per això que té el preu més elevat que es pot trobar en aquest projecte (només s'han creat dissenys que van de 9 a 16 aletes).

- **Casos amb 1,5 mm de gruix d'aletes:** a diferència del grup anterior, aquests dissipadors compten amb un gruix d'aletes d'1,5 mm. A més, una altra diferència que tenen aquests casos de l'altre és que compten amb dissipadors d'11 aletes però no de 10 aletes. A continuació, a la *Taula 42*, es mostren els resultats:

Taula 42: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons un gruix d'aletes d'1,5 mm

	11 aletes i 2 mm de separació entre aletes	9 aletes i 2,8 mm de separació entre aletes	11 aletes i 2,2 mm de separació entre aletes	12 aletes i 2,1 mm de separació entre aletes	14 aletes i 1,5 mm de separació entre aletes	16 aletes i 1,1 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)					
v (m/s)	CAS 11-15-200	CAS 9-15-280	CAS 11-15-220	CAS 12-15-210	CAS 14-15-150	CAS 16-15-110
0,5	1,225	1,106	1,286	1,316	1,429	1,510
1	1,438	1,282	1,500	1,595	1,732	1,873
1,5	1,609	1,427	1,690	1,792	1,951	2,126
2	1,682	1,476	1,779	1,872	2,046	2,203
2,5	1,762	1,556	1,880	1,954	2,107	2,186
3	1,805	1,615	1,921	1,978	2,069	2,002
3,5	1,774	1,618	1,890	1,911	1,903	1,624
4	1,675	1,571	1,784	1,761	1,603	1,041
4,5	1,504	1,474	1,601	1,512	1,161	0,235
5	1,254	1,323	1,336	1,162	0,566	-0,812

Sobresurten 2 resultats a la *Taula 42*, els resultats obtinguts en el "CAS 14-15-150" i en el "CAS 16-15-110". El millor resultat és l'aconseguit en l'últim, al tenir major superfície de bescanvi, però veiem com en tots dos casos s'ha aconseguit obtenir un balanç net d'energia molt semblant o superior a la potència neta major aconseguida en l'apartat anterior. Paral·lelament, s'observa com el valor més gran de potència neta s'ha adquirit per una velocitat d'entrada menor que l'obtinguda anteriorment. Això es tradueix en el fet que el ventilador necessita consumir menys potència per tal de poder refrigerar les aletes del dissipador i que aquest pugui dissipar de forma eficient la calor generada per la cara freda. El valor de potència obtingut per 2 m/s en el "CAS 16-15-110" és de 0,291 W (es pot consultar aquest resultat i el pròxim a partir dels fulls de càlcul EXCEL adjuntats en la

còpia electrònica del projecte). Així mateix, el valor de potència neta adquirida quan el flux d'aire d'entrada és de 5 m/s, ha sigut un valor negatiu, més concretament de -0,812 W. En aquesta simulació ha succeït que el ventilador ha consumit més potència que potència generada pel mòdul termoelèctric. Com a consell per aconseguir un balanç eficient d'energia neta, durant la utilització d'aquest dissipador, es demanarà que el ventilador proporcioni com a màxim, una velocitat d'entrada superior als 4,5 m/s. Es pot veure aquesta caiguda d'eficiència energètica a la *Figura 80*:

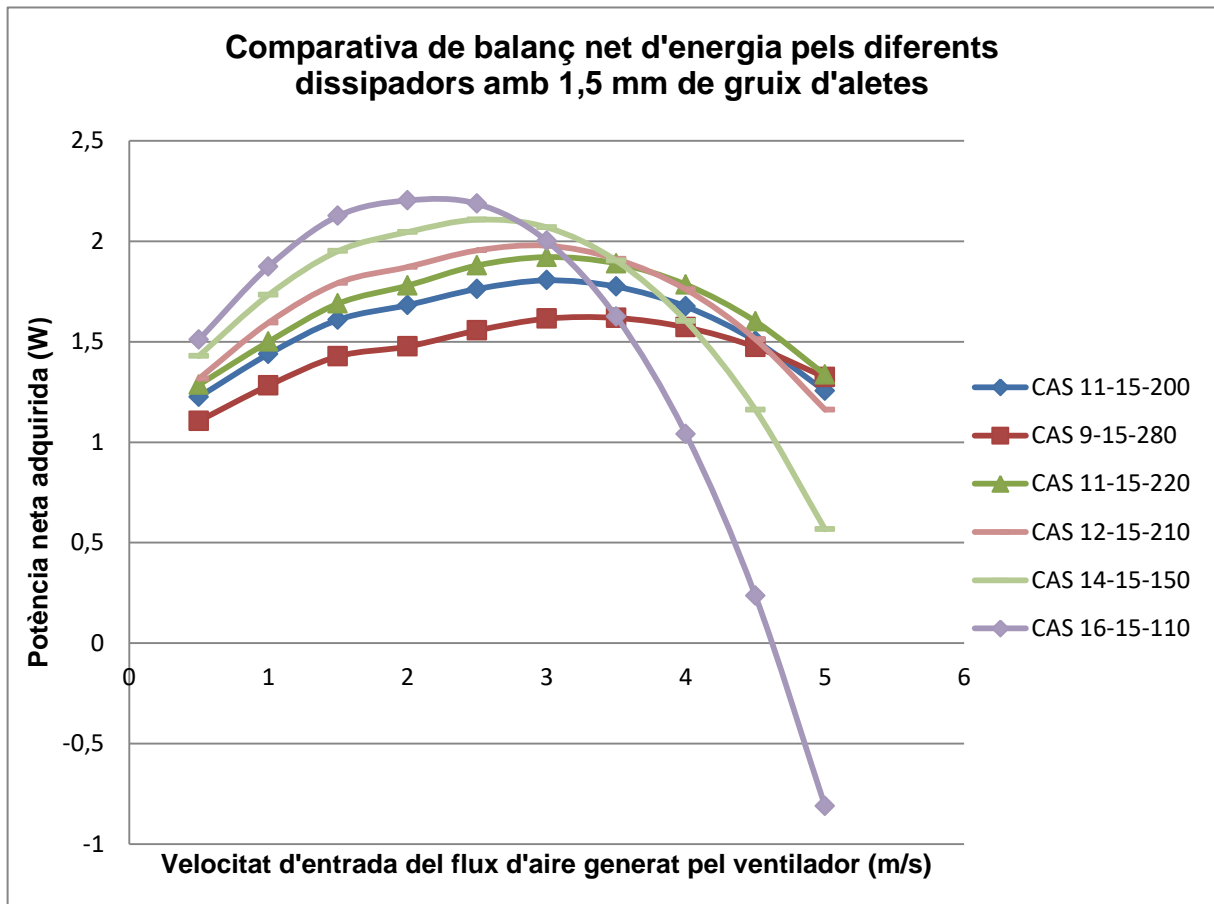


Figura 80: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb un gruix d'1,5 mm d'aletes

Com s'ha fet en el punt anterior, amb els resultat aconseguits a l'etapa "Results" de l'ANSYS, es centra amb el "CAS 16-15-110" que ha sigut el que ha aconseguit un millor balanç d'energia amb una velocitat d'entrada de 2 m/s.

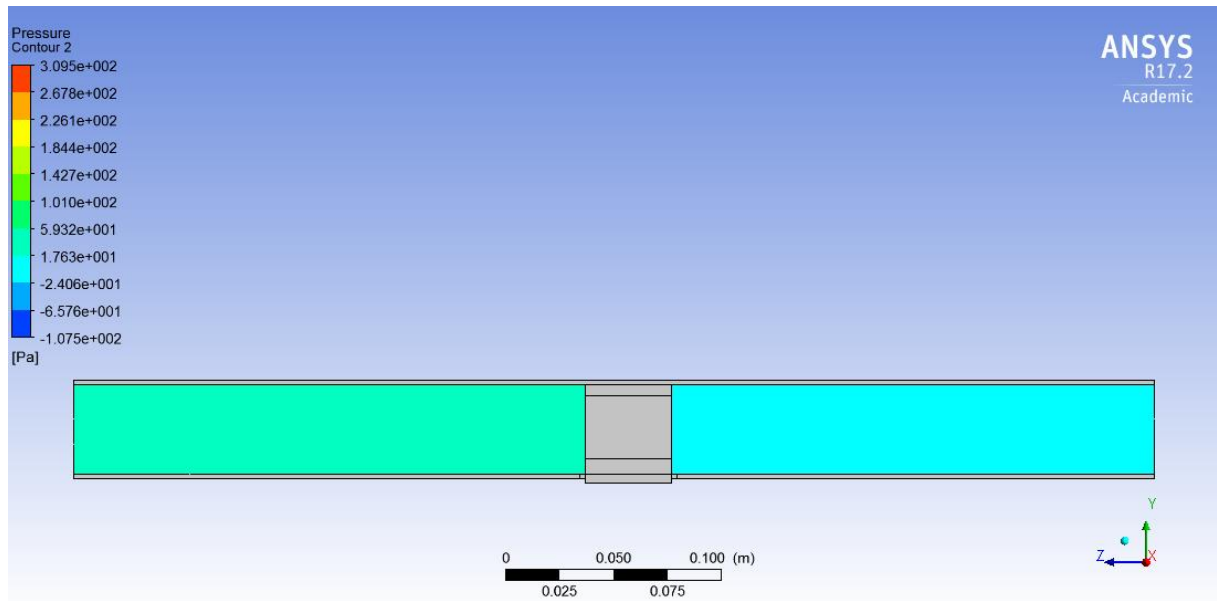


Figura 81: Pressió a la qual està sotmès l'aire en diferents trams del tub d'acer

A la *Figura 81*, l'aire disminueix la seva pressió aigües a baix del dissipador fins a obtenir un valor negatiu. La pressió que s'obté a la sortida del dissipador és de -3,53 Pa (tots els resultats es podran consultar en els fulls de càlcul EXCEL que s'adjunten en la còpia electrònica del projecte i en aquest cas en concret, en el full EXCEL: *Simulation_ANSYS_12*). La disminució de la pressió de l'aire fins a un valor negatiu es deu a la presència del dissipador que fa d'element obstructiu. L'aire presenta un valor de pressió, aigües amunt del dissipador, de 49,40 Pa (full de càlcul EXCEL: *Simulation_ANSYS_12*). És un valor bastant elevat però és a causa de la geometria del dissipador que presenta una separació entre aletes d'1,10 mm, un nombre d'aletes de 16 i un gruix de 1,5 mm que obstaculitzen el pas d'aire a través del tub.

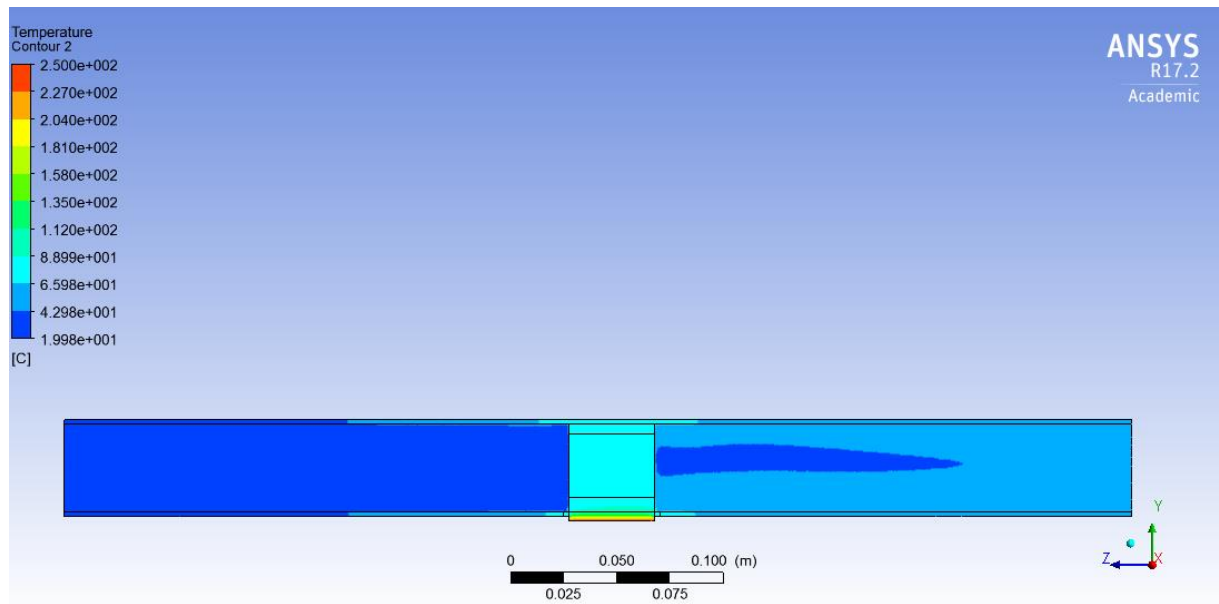


Figura 82: Temperatura a la qual estan sotmeses les diferents parts

La *Figura 82* mostra el comportament tèrmic tant de les parts sòlides com de les parts fluides del model. L'aire entra dintre el model amb una temperatura de 20 °C (veure *Annex B: Simulacions en ANSYS*) i augmenta el seu valor aigües avall del dissipador. Aquest augment de la temperatura no es produeix en tot el seu volum, tal com es pot veure a la sortida del dissipador sinó que a mesura que flueix pel tub, va recuperant el seu comportament tèrmic de 20 °C, com a conseqüència d'anar-se allunyant del dissipador d'aletes. En el centre del model, es troben el dissipador d'aletes, el mòdul termoelèctric, les plaquetes de llautó i el volum de control. Aquests presenten un comportament tèrmic més elevat que l'aire per culpa del mòdul. Com s'ha anat explicant al llarg del document, el mòdul termoelèctric s'escalfa a una temperatura constant de 250 °C en la seva cara calenta i llavors, la seva cara freda, rebutja aquesta calor. El dissipador d'aletes en estar amb contacte amb la cara freda del mòdul, s'escalfa i dissipa aquesta calor a través de les aletes. A part, les aletes, en estar amb contacte amb les plaquetes de llautó, transmeten calor a aquestes i successivament, les plaquetes de llautó, transmeten calor en el tub. Si es mira el centre del model i s'observa l'escala de colors tabulada numèricament a la part esquerra de la imatge, es pot observar com es té un valor elevat de temperatura marcat en vermell (representa la cara calenta del dissipador i està a 250 °C) que va tendint a disminuir (el dissipador va dissipant la calor rebutjada per la cara freda que es troba a 90,30 °C en aquest cas). Els resultats numèrics d'aquest cas es trobaran en els fulls de càlcul EXCEL que s'adjuntaran a la còpia electrònica.

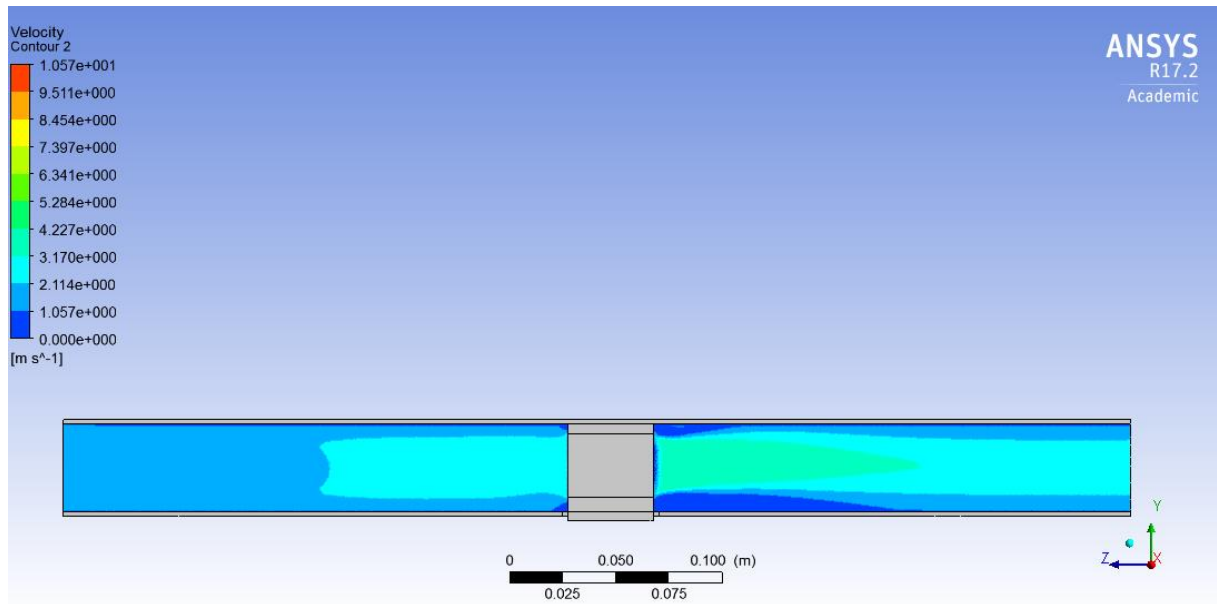


Figura 83: S'observa com la velocitat del flux d'aire varia per culpa la presència del dissipador

Amb la *Figura 83* es pot avaluar com l'aire va tendint a augmentar la seva velocitat aigües avall del dissipador però com després intenta recuperar el valor inicial que presentava inicialment. Tal com mostra la *Figura 83*, l'aire disminueix la seva velocitat en els extrems inferior i superior (presenta un rang de velocitats que va de 0 a 1,057 m/s), aigües a baix del dissipador, i augmenta la seva velocitat en el centre com a conseqüència d'haver passat a través de les aletes del dissipador (augmenta la velocitat d'entrada de 2 m/s i es té una velocitat de circulació, just a la sortida de les aletes del dissipador, entre 3,17 i 4,227 m/s).

Ara es compara la simulació amb millor rendiment amb les simulacions aconseguides pel mateix tipus de dissipador però amb valor de velocitat d'entrada mínima i màxima.

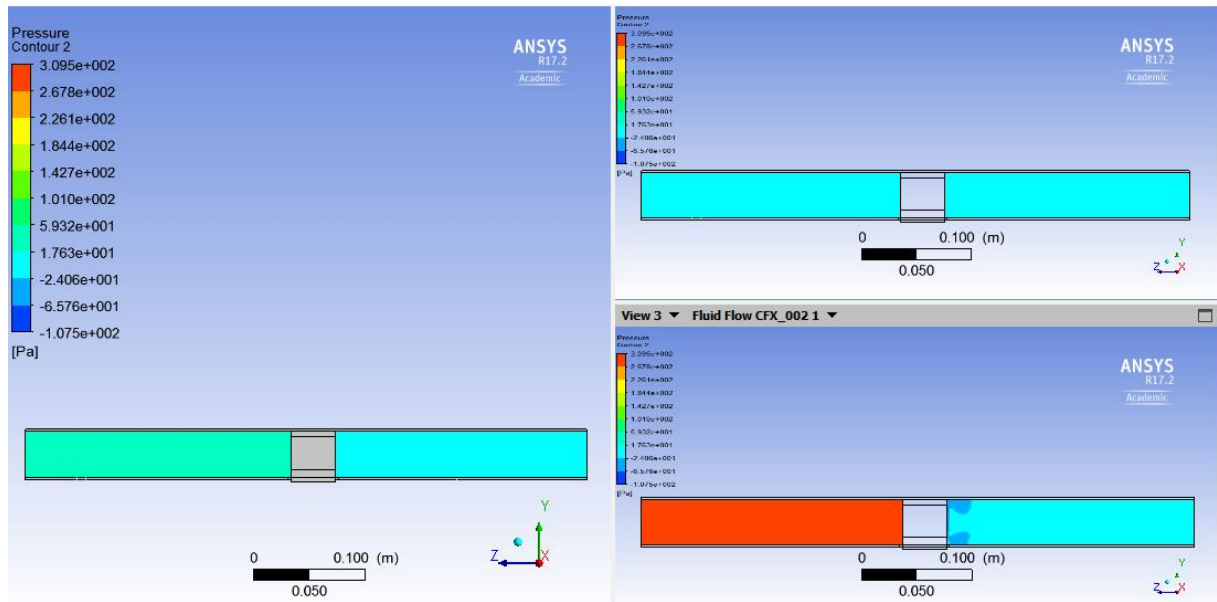


Figura 84: Comparació de pressions segons el valor d'entrada d'aire

A la *Figura 84*, es compara les pressions obtingudes durant les simulacions amb millor balanç net d'energia (a 2 m/s, imatge més gran), amb la velocitat d'entrada més baixa (a 0 m/s, imatge superior de la dreta) i amb la velocitat d'entrada més alta (a 5 m/s, imatge inferior de la dreta). Les pressions d'aire augmentant aigües amunt del dissipador a mesura que s'augmenta la velocitat d'entrada. Per la simulació amb major valor d'entrada, es mostra com la pressió en els extrems superior i inferior de l'aire aigües a baix del dissipador, és un valor inferior que llavors tendeix a augmentar assolint un rang de pressions compreses entre -2,406 i 1,763 Pa. Això és a causa de la velocitat d'entrada de l'aire que fa assolir valors de pressió bastants elevats que fan que l'aire li dificulti més recuperar-se i estabilitzar-se en un valor de pressió concret just a la sortida del dissipador.

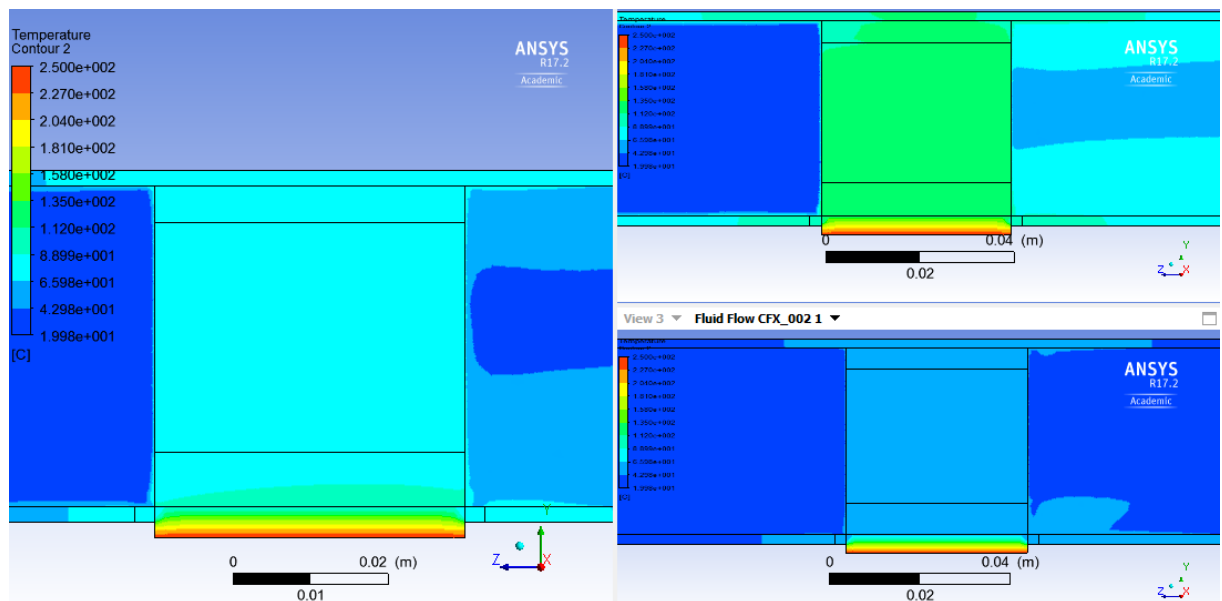


Figura 85: Es centra en la temperatura aconseguida per la cara freda del mòdul segons el valor d'entrada d'aire

Així mateix, la *Figura 85*, mostra el comportament tèrmic que presenten les parts sòlides: dissipador, mòdul termoelèctric i plaquetes de llautó. Utilitzant el mateix ordre de col·locació de les imatges segons la velocitat d'entrada, tal com s'havia fet en la *Figura 84*, es mostra com la velocitat d'entrada de l'aire influeix bastant a assolir menors temperatures en aquestes parts sòlides. Una velocitat d'entrada baixa no refrigera prou les aletes del dissipador per tal que dissipin de forma adequada la calor emesa per la cara freda del mòdul a la seva base (figura superior de la dreta). Això comporta a un augment de la temperatura de la cara freda del mòdul i a una disminució de la diferència de temperatures entre les cares que es pot traduir en una potència produïda bastant baixa. Envers, una velocitat d'aire d'entrada major, facilita la refrigeració de les aletes perquè dissipin de forma eficient la calor rebutjada per la cara freda del mòdul i impliqui una disminució de la temperatura de la cara freda que es veurà traduït en un augment de la diferència de temperatures entre les cares i de la potència produïda (figura inferior de la dreta). El valor de temperatura que assoleix el dissipador en la simulació amb menys velocitat d'entrada està compres en un rang entre 135 i 158 °C que produeix una temperatura en la cara freda del mòdul de 122,25 °C (consultar el full de càlcul EXCEL: *Simulation_ANSYS_10*). Per altra banda, la temperatura que assoleix el dissipador en la simulació amb més velocitat d'entrada està compres en un rang entre 42,98 i 65,98 °C i fa que hagi una temperatura en la cara freda del mòdul de 64,06 °C (es pot consultar aquestes dades de temperatura de la cara freda del mòdul en el full de càlcul EXCEL adjuntat en la còpia electrònica del projecte).

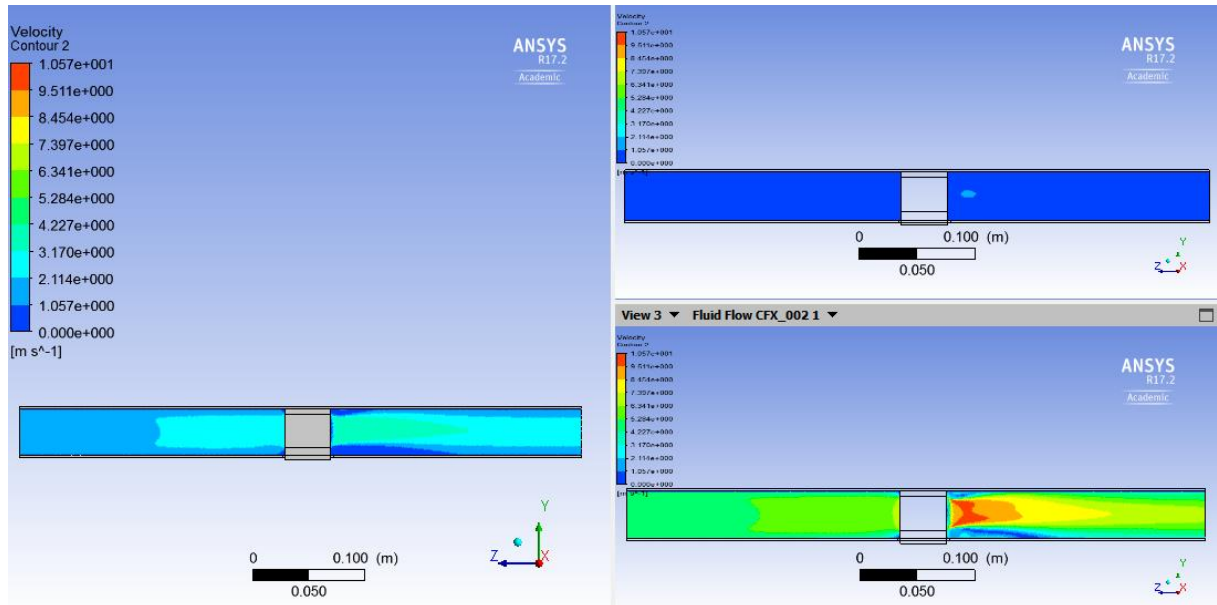


Figura 86: Velocitat amb la qual varia el flux d'aire al llarg del tub d'acer, com a conseqüència de la col·locació del dissipador

Per acabar, la *Figura 86* mostra com la velocitat de l'aire tendeix a mostrar valors cada vegada més elevats aigües avall del dissipador i com li costa aquest recuperar el valor inicial d'entrada. Aquest fet es pot veure bastant exemplificat en el cas amb major velocitat d'entrada, on es pot veure la diversitat de valors de velocitat d'aire que es té aigües avall del dissipador, on el rang de velocitats va des de 0 m/s fins a 10,57 m/s.

Finalment, s'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 25 €. Aquest valor de preu s'estima com a conseqüència de la utilització del mètode de fabricació anomenat "bonded" (serà bastant més car que els dissipadors fabricats per extrusió) i pel nombre d'aletes que s'hauran de col·locar. Els dissipadors amb més aletes presentaran un preu major. En aquest cas, aquest dissipador presenta un número de 16 aletes i és per això que té el preu més elevat que es pot trobar en aquest projecte (només s'han creat dissenys que van de 9 a 16 aletes).

8.2.2. Efecte del número d'aletes

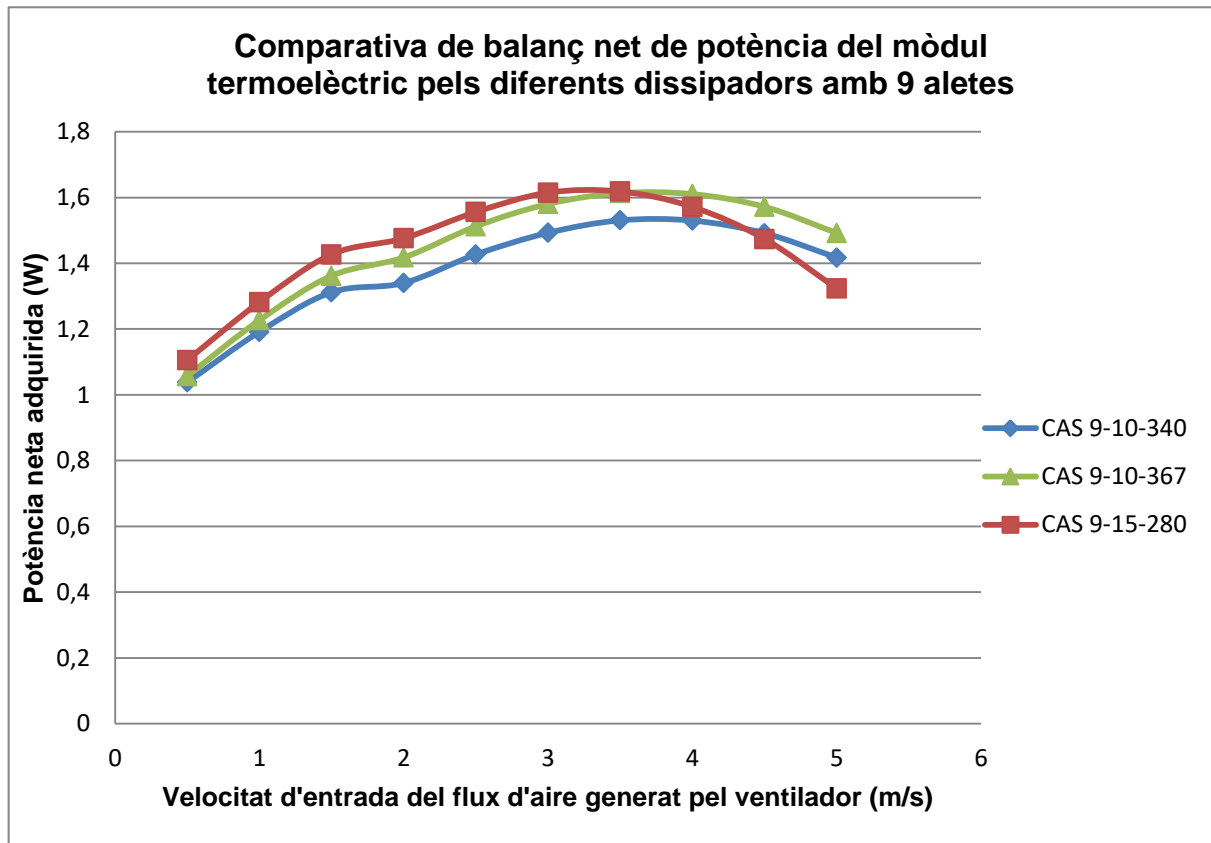
S'ajunten els dissipadors que comparteixen el mateix nombre d'aletes:

- **Casos amb 9 aletes:** el grup està conformat per tres casos, on dos d'ells tenen un gruix d'1 mm i el restant d'1,5 mm (veure *Taula 43*):

Taula 43: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons un número d'aletes igual a 9

	1 mm de gruix d'aleta i 3,4 mm de separació entre aletes	1 mm de gruix d'aleta i 3,67 mm de separació entre aletes	1,5 mm de gruix d'aleta i 2,8 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)		
v (m/s)	CAS 9-10-340	CAS 9-10-367	CAS 9-15-280
0,5	1,038	1,057	1,106
1	1,191	1,227	1,282
1,5	1,312	1,362	1,427
2	1,340	1,418	1,476
2,5	1,427	1,512	1,556
3	1,493	1,580	1,615
3,5	1,531	1,613	1,618
4	1,530	1,610	1,571
4,5	1,491	1,572	1,474
5	1,417	1,492	1,323

Resultats molt semblants s'han trobat entre els cassos "09-10-367" i "09-15-280". El fet de compartir el mateix número d'aletes pot tendir a la obtenció de resultats molt igualats per tenir una superfície de bescanvi d'aletes idèntica encara que es tinguin gruixos i separacions entre les aletes bastant diferents. El resultat més elevat és l'aconseguit en el "CAS 09-15-280" tal i com es pot veure numèricament a la *Taula 43* i gràficament a la *Figura 87*:



Gràfica 87: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb número d'aletes igual a 9

S'han presentat els resultats de manera numèrica i gràfica però ara, amb l'ANSYS, es presenta les animacions de comportament del "CAS 09-15-280".

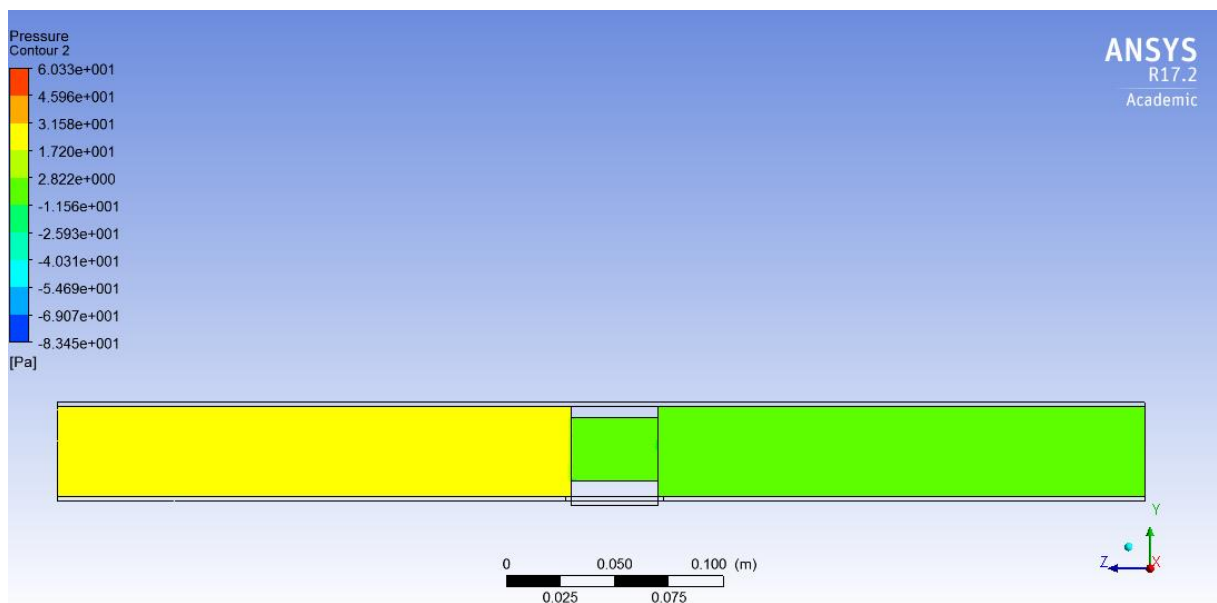


Figura 88: Pressió a la qual està sotmès l'aire en diferents trams del tub d'acer

Com mostra la *Figura 88*, l'aire disminueix la seva pressió aigües a baix del dissipador. A la sortida del dissipador es té un valor negatiu de -6,59 Pa (es podrà trobar en el full de càlcul EXCEL: *Simulation_ANSYS_5* que s'ha adjuntat en la còpia electrònica del projecte). La disminució de la pressió de l'aire fins a un valor negatiu es deu a la presència del dissipador que fa d'element obstructiu. L'aire presenta un valor de pressió, aigües amunt del dissipador, de 25,92 Pa (consulta fulls de càlcul EXCEL adjuntats a la còpia electrònica del projecte).

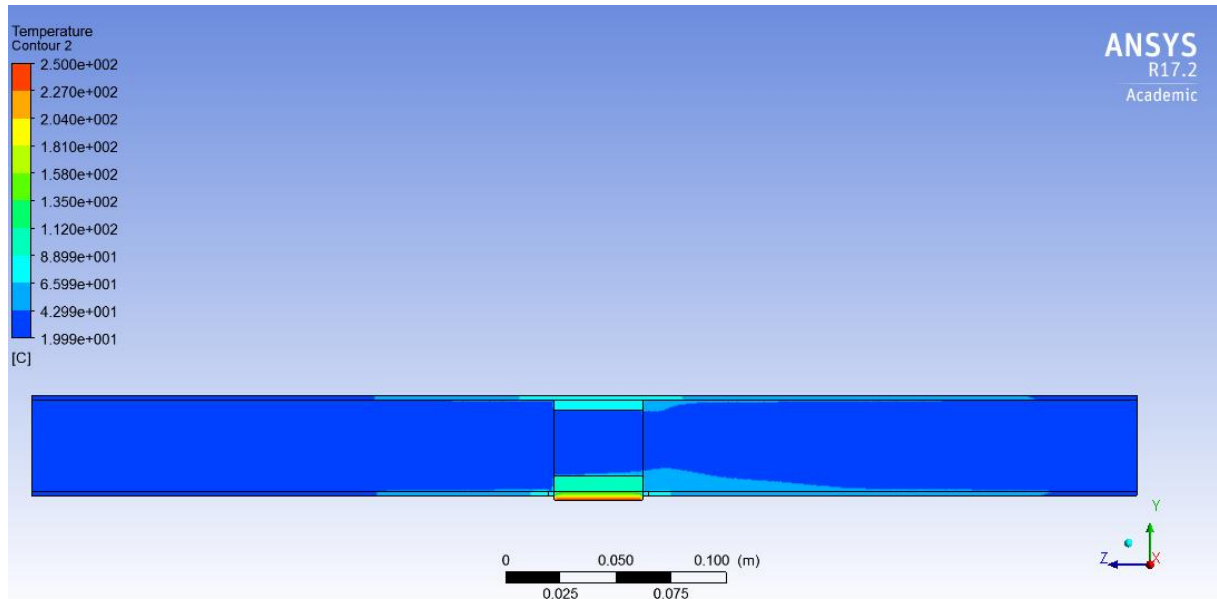


Figura 89: Temperatura a la qual estan sotmeses les diferents parts

A diferència dels casos anteriors, en aquest cas es pot visualitzar la temperatura que té l'aire dintre del dissipador d'aletes a partir de la *Figura 89*. Això és a causa del pla definit a la meitat de la geometria ja tallada prèviament del model amb l'ANSYS CFD-Post. El comportament tèrmic que es visualitza, mostra com el dissipador en la seva part inferior té una temperatura compresa entre 88,99 i 112 °C. Així mateix, les plaquetes de llautó mostren una temperatura compresa entre 65,99 i 88,99 °C. Això vol dir que el dissipador va disminuint la seva temperatura a partir de les aletes que van dissipant la calor emesa per la cara freda del mòdul termoelèctric. La temperatura de la cara freda del dissipador en aquest cas és de 107,53 °C (veure fulls de càlcul EXCEL adjuntats en la còpia electrònica del projecte).

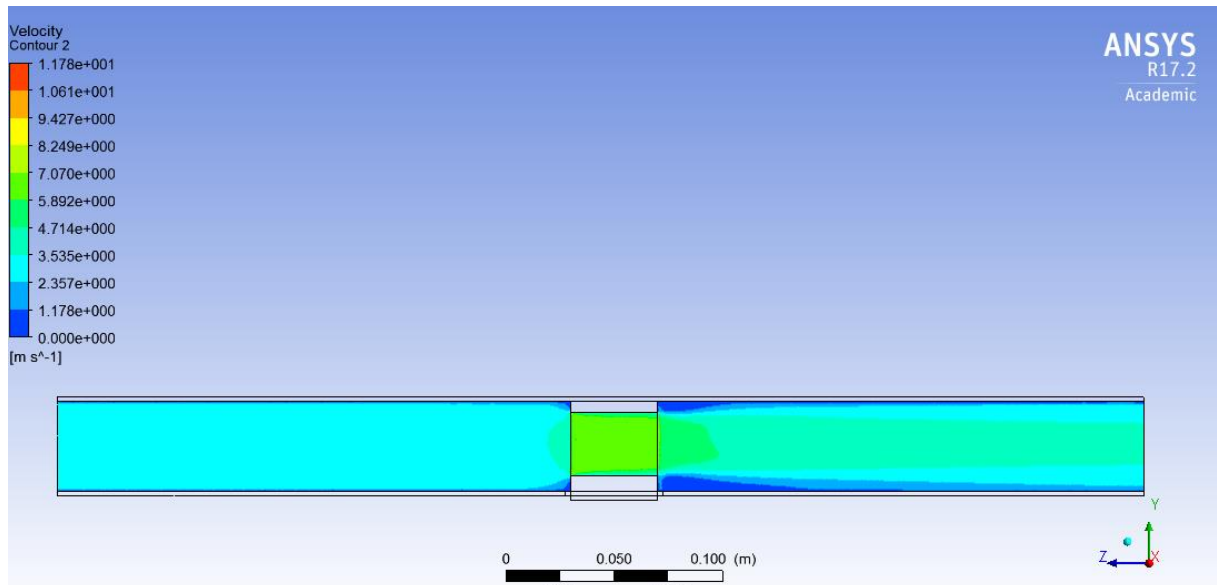


Figura 90: S'observa com la velocitat del flux d'aire varia per culpa la presència del dissipador

Pel que fa a la velocitat del flux d'aire en aquest cas, a partir de la *Figura 90*, es pot avaluar com l'aire va tendint augmentar la seva velocitat aigües avall del dissipador però com després intenta recuperar el valor inicial que presentava inicialment. A part, es pot veure com la velocitat màxima s'aconsegueix dintre el dissipador, és a dir, quan el flux d'aire es concentra per passar a través de les aletes i així refrigerar el dissipador. La velocitat màxima que s'obté es troba compresa en un rang de velocitats que va de 5,892 fins a 7,07 m/s.

A partir de les *Figures 81, 92 i 93*, s'observa com el model va presentant un comportament diferent a mesura que es va augmentant la velocitat d'entrada d'aire:

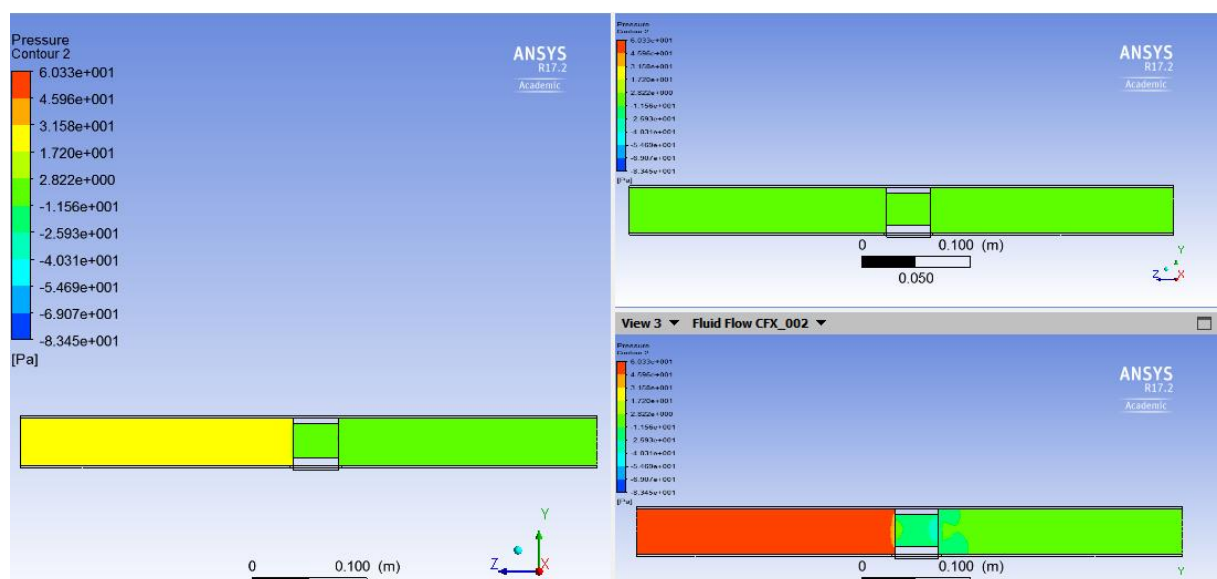


Figura 91: Comparació de pressions segons el valor d'entrada d'aire

A la *Figura 91*, es compara les pressions obtingudes pel model durant les simulacions amb millor balanç net d'energia (a 3,5 m/s, imatge més gran), amb la velocitat d'entrada més baixa (a 0 m/s, imatge superior de la dreta) i amb la velocitat d'entrada més alta (a 5 m/s, imatge inferior de la dreta). Les pressions d'aire augmentant aigües amunt del dissipador a mesura que s'augmenta la velocitat d'entrada. A part, es pot veure que no hi ha casi diferència entre les pressions d'aigües amunt i avall del dissipador en la simulació amb menys velocitat d'entrada (pressió d'entrada té un valor igual a 0,80 Pa i la pressió de sortida té un valor de -0,08 Pa (es poden consultar en els fulls de càlcul EXCEL adjuntats amb la còpia electrònica). Així mateix, es pot veure com en el cas amb major velocitat es té unes pressions menors, una vegada el flux d'aire està en contacte amb les aletes del dissipador, que en els casos amb una velocitat de 3 m/s i de 0,5 m/s. Això es traduirà a unes pèrdues de càrrega més elevades en aquest cas.

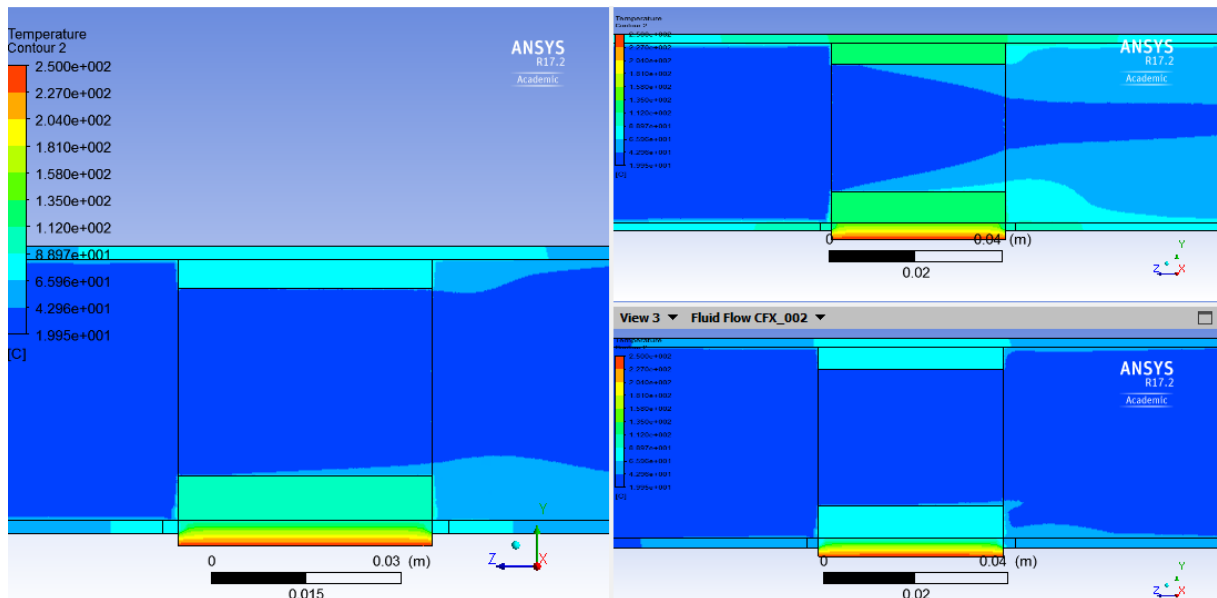


Figura 92: Es centra en la temperatura aconseguida per la cara freda del mòdul segons el valor d'entrada d'aire

A diferència dels casos anteriors, amb la *Figura 92*, no podem saber exactament quina temperatura està assolint el dissipador al llarg de la seva superfície. Tot i així, observant la part inferior d'aquest (la base) i les plaquetes de llautó, es pot saber si el dissipador ha continuat presentant un comportament tèrmic constatat al llarg de la seves aletes o si ha variat i ha anat disminuint la seva temperatura a mesura que la calor tendia allunyar-se, a través d'aquestes, de la cara freda del mòdul termoelectric. A més, es pot visualitzar la temperatura que assoleix el flux d'aire quan està en contacte amb les aletes del dissipador. La imatge que cal fer més èmfasi en relació amb la temperatura de l'aire una vegada passa a través de les aletes del dissipador, és en la simulació amb menys velocitat d'entrada d'aire. Com que la velocitat d'entrada de l'aire és bastant petita, l'aire

no pot refrigerar del tot bé les aletes del dissipador. Això comporta que aquest experimenti, a més, un augment de la seva temperatura. L'única simulació que sembla que presenta una variació de temperatura al llarg de la superfície del dissipador és la simulació realitzada amb una velocitat de 3 m/s. Els valors d'aquestes temperatures s'han exposat anteriorment quan s'ha analitzat aquesta simulació individualment.

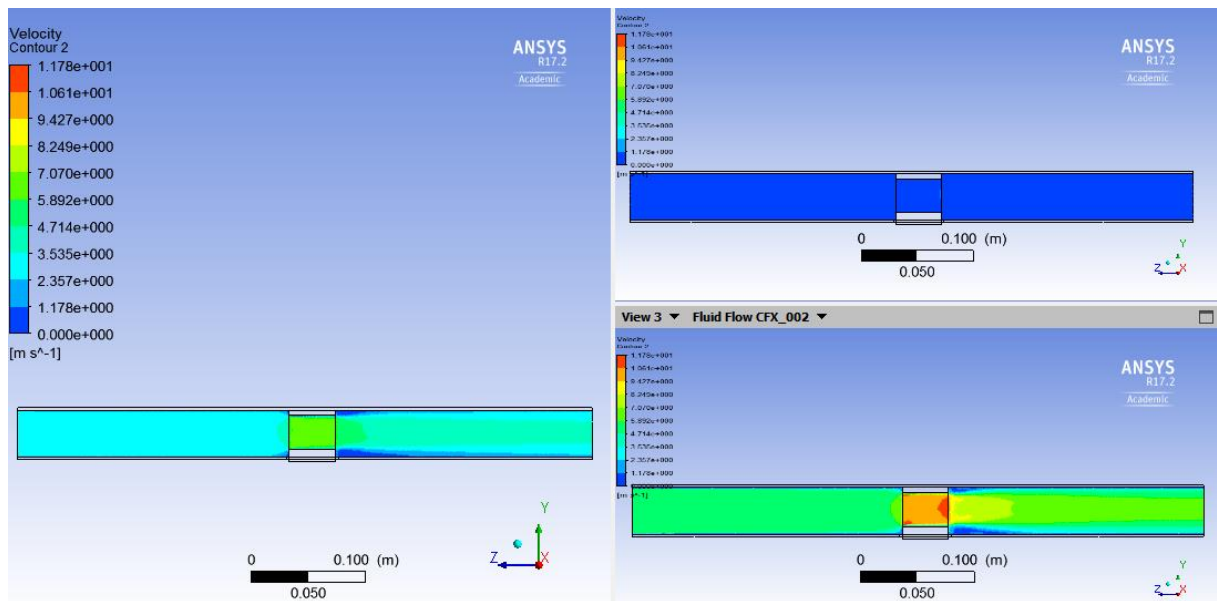


Figura 93: Velocitat amb la qual varia el flux d'aire al llarg del tub d'acer, com a conseqüència de la col·locació del dissipador

Finalment, la *Figura 93* mostra el comportament del flux de l'aire a mesura que s'augmenta la seva velocitat i com li costa recuperar el valor inicial d'entrada com a conseqüència d'anar augmentant la velocitat. En la simulació realitzada a major velocitat es pot veure com l'aire augmenta la seva velocitat en els extrems inferior i superior quan aquest es troba dins del dissipador d'aletes. El fet és a causa que l'aire necessita entrar tant pels extrems superior i inferior del dissipador però troba l'obstacle de la seva base i de les plaquetes de llautó i necessita augmentar la seva velocitat. A part, es mostra com la concentració del flux d'aire a la sortida del dissipador tendeix a augmentar la seva velocitat. Aquest augment de velocitat està entre uns valors de velocitat que van des de 10,61 m/s fins a 11,78 m/s.

S'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 12 €. A diferència dels dissipadors explicats anteriorment, en aquest apartat es té un dissipador de 9 aletes conformat pel mètode de fabricació "bonded" i és per això que el seu preu estimat és inferior que els dels dissipadors de 16 aletes presentats anteriorment.

- **Casos amb 11 aletes:** el grup està conformat per 2 casos que tenen totes les similituds possibles. A part de tenir el mateix nombre d'aletes, també tenen el mateix espessor d'aletes i la separació entre aletes és major a 2 mm i menor a 3 mm. Per tant, es pot confirmar que els resultats són molt igualats si es mira la *Taula 44*:

Taula 44: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons un número d'aletes igual a 11

	1,5 mm de gruix d'aleta i 2 mm de separació entre aletes	1,5 mm de gruix d'aleta i 2,2 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)	
v (m/s)	CAS 11-15-200	CAS 11-15-220
0,5	1,225	1,286
1	1,438	1,500
1,5	1,609	1,690
2	1,682	1,779
2,5	1,762	1,880
3	1,805	1,921
3,5	1,774	1,890
4	1,675	1,784
4,5	1,504	1,601
5	1,254	1,336

S'observa que el "CAS 11-15-220" és el que ha obtingut millor rendiment energètic. Així mateix, s'ha detectat un dubte pel que fa a aquest cas. En teoria, el que hauria de donar millor balanç energètic és el "CAS 11-15-200" pel fet de comptar amb menor separació entre les aletes. La resposta aquest fenomen és per culpa de l'amplada que presenta el dissipador del "CAS 11-15-220" i el fet de no haver posat plaquetes de llautó laterals per evitar el pas d'aire a través dels laterals dels dissipadors dissenyats. Com que el dissipador del "CAS 11-15-220" ocupa més espai dintre el tub d'acer, concentra més el flux d'aire a través de les seves aletes. En canvi, el dissipador del "CAS 11-15-200", presenta més espai entre les cares laterals envers les parets interiors laterals del tub d'acer. Això dificulta una menor concentració del flux d'aire a través del dissipador i comporta el pas d'aire sense contactar amb les aletes del dissipador, cosa que es pot traduir en una mala dissipació del dissipador i com a conseqüència una potència produïda menor pel mòdul.

Independentment, la *Figura 94*, mostra com els resultats són molt igualats (els separa, aproximadament, 0,1 W):

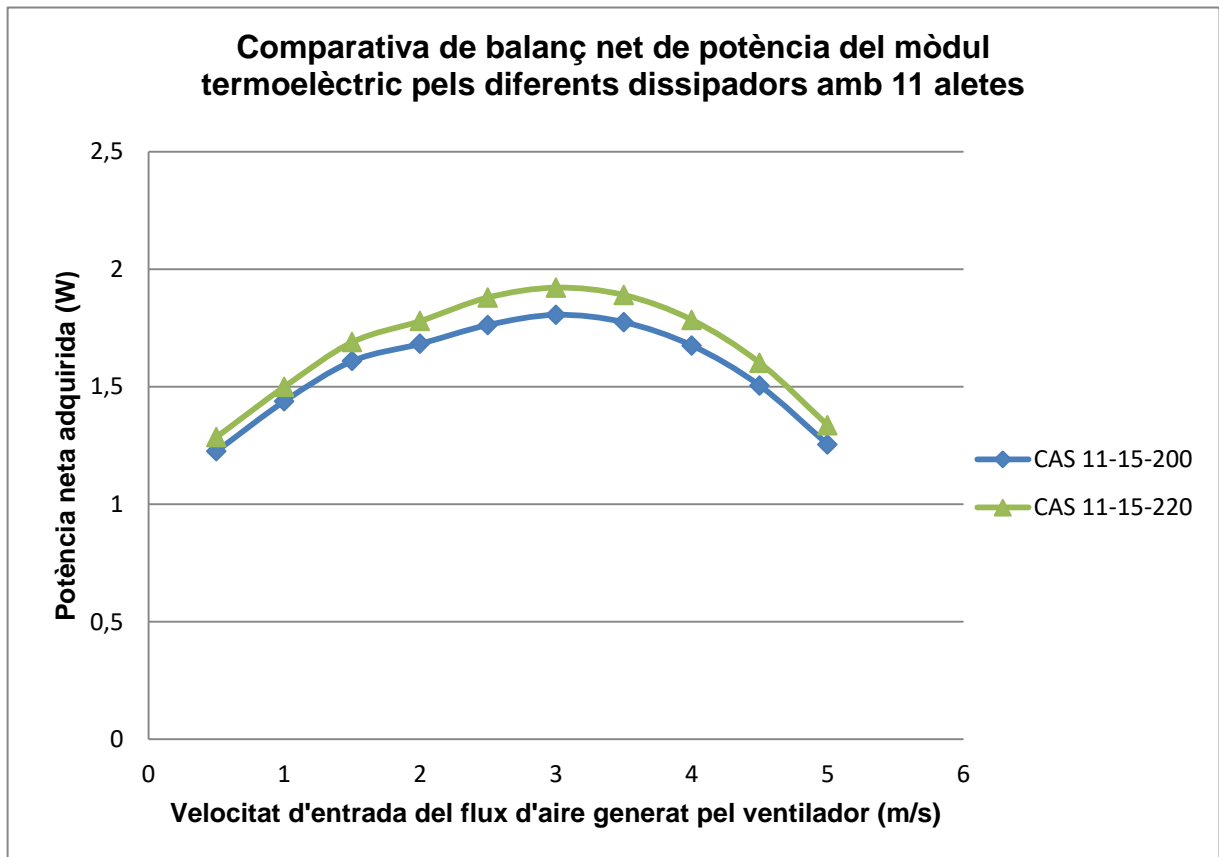


Figura 94: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb número d'aletes igual a 11

Com ja s'han fet en els punts anteriors, s'exposa els resultats obtinguts en l'etapa "Results" de l'ANSYS pel "CAS 11-15-220" quan aquest aconsegueix el major valor de rendiment energètic (veure *Figures 92, 93 i 94*):

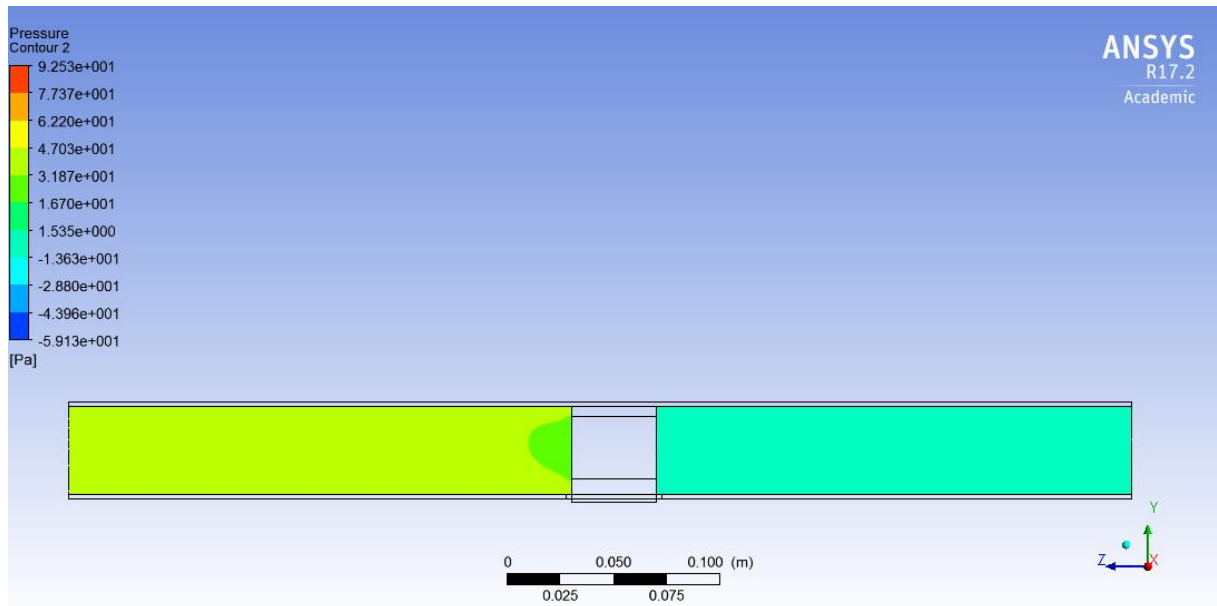


Figura 95: Pressió a la qual està sotmès l'aire en diferents trams del tub d'acer.

A la *Figura 95*, l'aire disminueix la seva pressió aigües a baix del dissipador fins a obtenir un valor negatiu. La pressió que s'obté a la sortida del dissipador és de -5,65 Pa (tots els resultats es podran consultar en els fulls EXCEL que s'adjunten en la còpia electrònica del projecte i en aquest cas en concret, en el full EXCEL: *Simulation_ANSYS_6*). La disminució de la pressió de l'aire fins a un valor negatiu es deu a la presència del dissipador que fa d'element obstructiu. L'aire presenta un valor de pressió, a la sortida del dissipador, de 31,68 Pa.

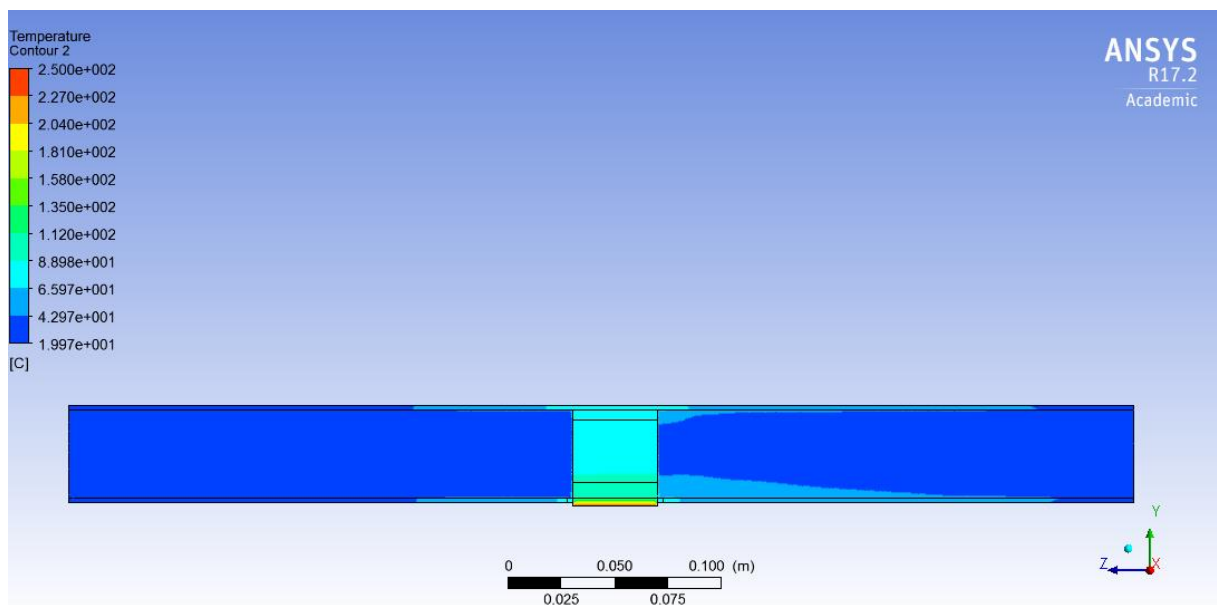


Figura 96: Temperatura a la qual estan sotmeses les diferents parts.

En la *Figura 96*, si es mira el centre del model i s'observa l'escala de colors tabulada numèricament a la part esquerra de la figura, es pot observar com es té un valor elevat de temperatura marcat en vermell (representa la cara calenta del dissipador i està a 250 °C) que va tendint a disminuir (el dissipador va dissipant la calor rebutjada per la cara freda que es troba a 98,09 °C en aquest cas). Els resultats numèrics d'aquest cas es trobaran en els fulls de càlcul EXCEL que s'adjuntaran a la còpia electrònica.

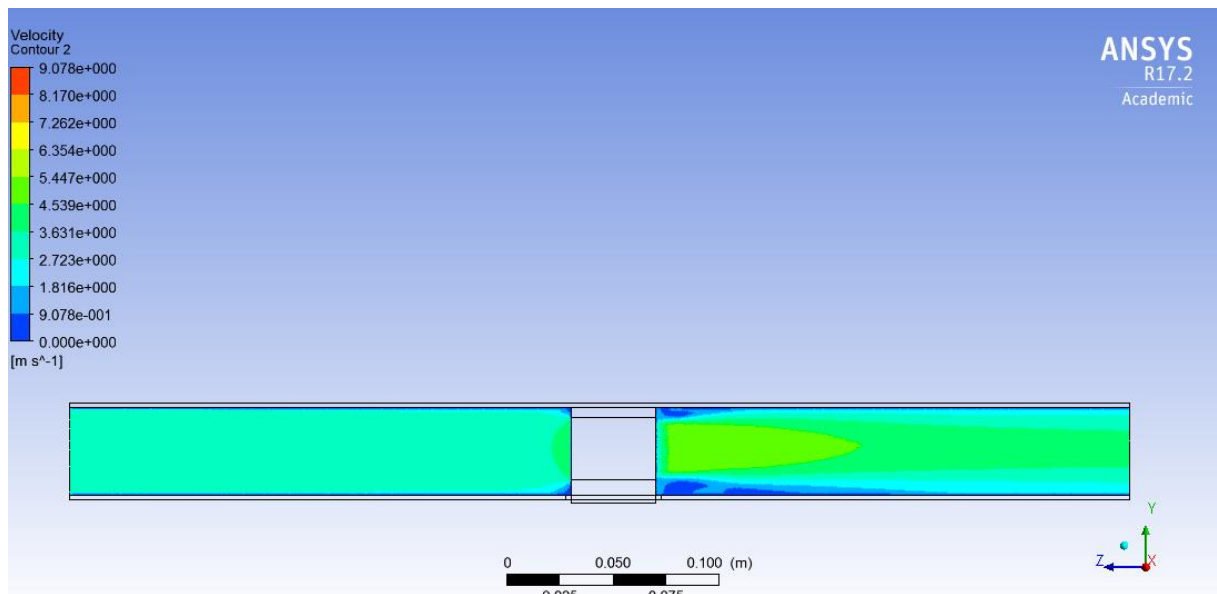


Figura 97: S'observa com la velocitat del flux d'aire varia per culpa la presència del dissipador

A partir de la *Figura 97*, es pot avaluar com l'aire va tendint augmentar la seva velocitat aigües avall del dissipador però com després intenta recuperar el valor inicial que presentava inicialment. L'aire disminueix la seva velocitat en els extrems (presenta un rang de velocitats que va de 0 a 1,816 m/s), aigües a baix del dissipador, i augmenta la seva velocitat en el centra com a conseqüència d'haver passat a través de les aletes del dissipador (augmenta la velocitat d'entrada de 3 m/s i es té una velocitat de circulació, a la sortida de les aletes del dissipador, entre 4,54 i 5,45 m/s).

A continuació, es fa una comparativa entre valors de simulació del "CAS 11-15-220". Els valors escollits són quan la velocitat d'entrada es menor i major i quan el model presenta millor balanç energètic (veure *Figures 98, 99 i 100*):

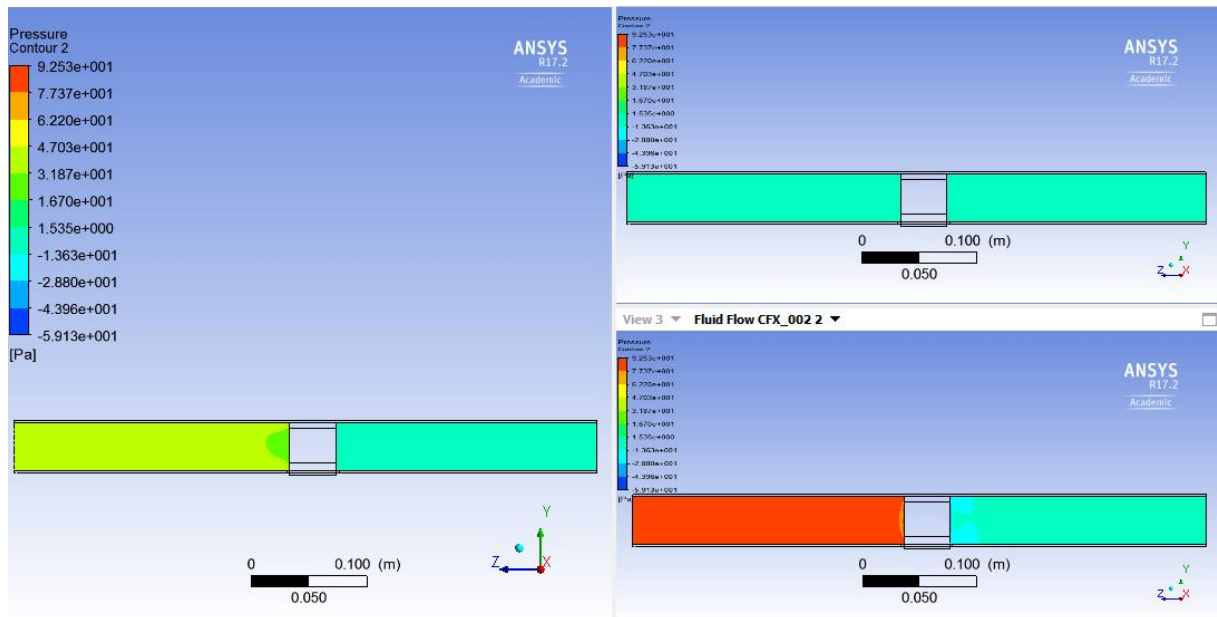


Figura 98: Comparació de pressions segons el valor d'entrada d'aire

A la *Figura 98*, es compara les pressions obtingudes pel model durant les simulacions amb millor balanç net d'energia (a 3 m/s, imatge més gran), amb la velocitat d'entrada més baixa (a 0 m/s, imatge superior de la dreta) i amb la velocitat d'entrada més alta (a 5 m/s, imatge inferior de la dreta). Les pressions d'aire augmentant aigües amunt del dissipador a mesura que s'augmenta la velocitat d'entrada. A part, es pot veure que no hi ha cap diferència entre les pressions d'aigües amunt i avall del dissipador en la simulació amb menys velocitat d'entrada (pressió d'entrada té un valor igual a 1,26 Pa i la pressió de sortida té un valor de -0,11 Pa, es poden consultar en els fulls de càlcul EXCEL adjuntats amb la còpia electrònica). Així mateix, en aquest cas, no es sap quina pressió es té una vegada l'aire entra en contacte amb les aletes del dissipador però es pot estimar que serà una pressió més petita que la que es té en les simulacions amb una velocitat d'entrada d'aire de 3 m/s i de 0,5 m/s, ja que presenta unes pressions inferiors en els extrems superior i inferior, una vegada deixa de tenir contacte amb les aletes, que van des d'una pressió de -13,63 fins a -28,80 Pa.

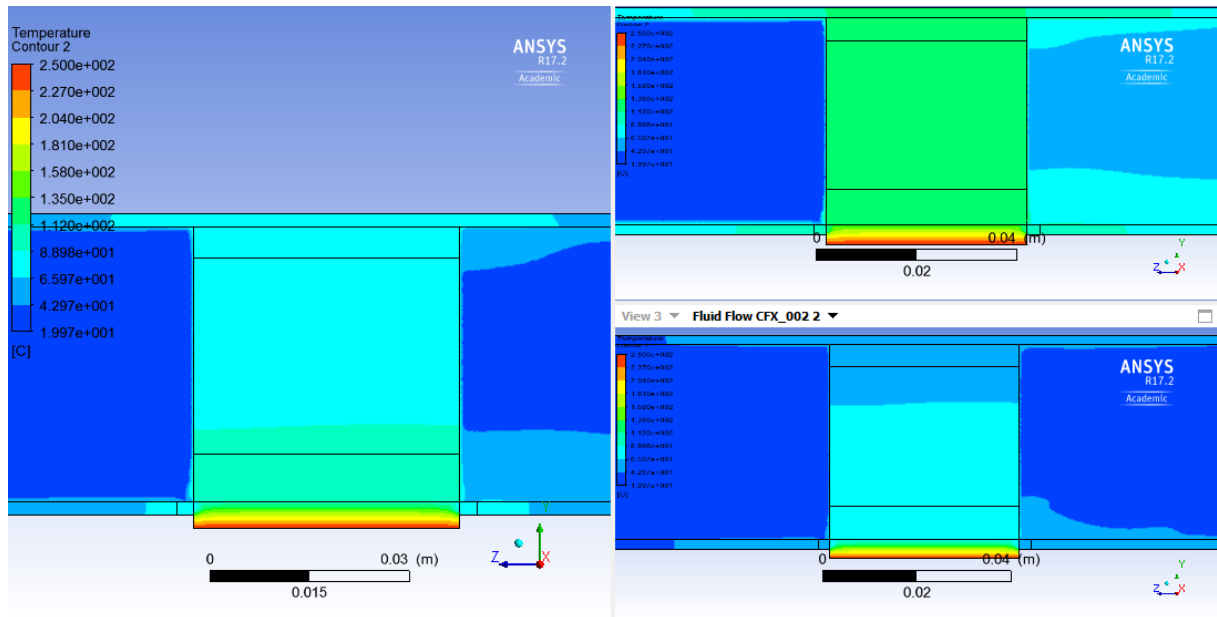


Figura 99: Es centra en la temperatura aconseguida per la cara freda del mòdul segons el valor d'entrada d'aire

En la *Figura 99*, mostra el comportament tèrmic que presenten les parts sòlides: dissipador, mòdul termoelèctric i plaquetes de llautó. Utilitzant el mateix ordre de col·locació de les imatges segons la velocitat d'entrada, tal com s'havia fet en la *Figura 98*, es mostra com la velocitat d'entrada de l'aire influeix bastant a assolir menors temperatures en aquestes parts sòlides. Les úniques simulacions que sembla ser que presenten una variació de temperatura considerable en la superfície del dissipador són les simulacions realitzades amb una velocitat d'entrada de 3 i 5 m/s. En el cas de la simulació amb una velocitat d'entrada de 3 m/s és té un rang de temperatures que compren unes temperatures que van des de 65,97 fins a 112 °C. Envers, la simulació amb una velocitat d'entrada de 5 m/s té un rang de temperatures que compren unes temperatures que van des de 42,97 fins a 88,98 °C.

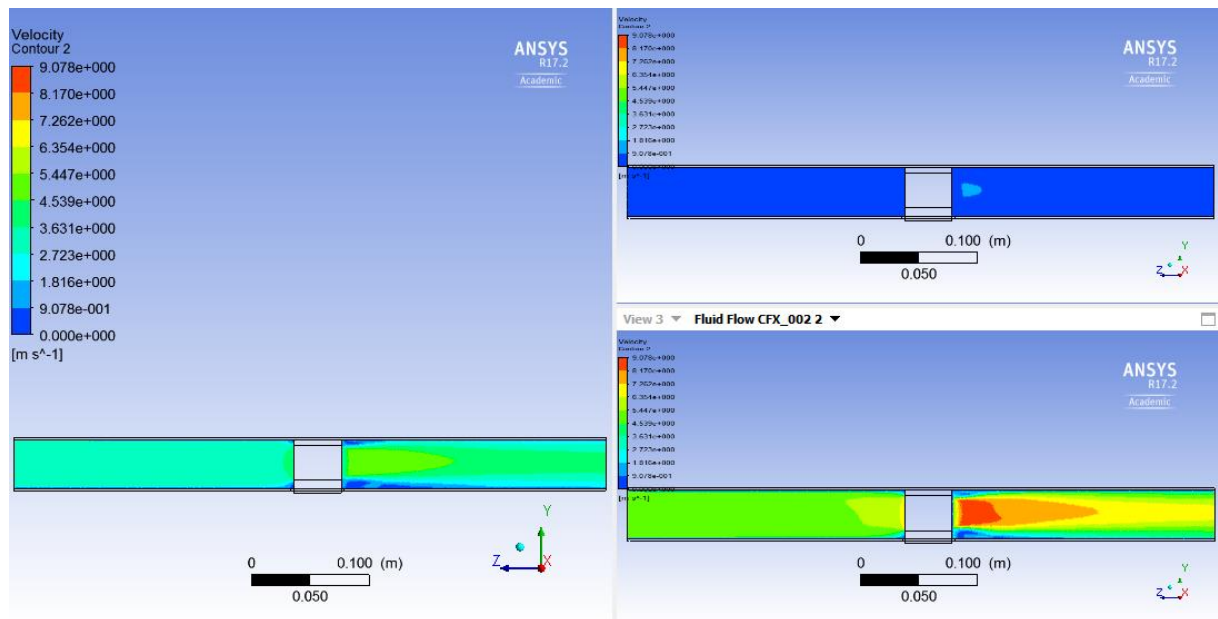


Figura 100: Velocitat amb la qual varia el flux d'aire al llarg del tub d'acer, com a conseqüència de la col·locació del dissipador

Per acabar, la *Figura 100* visualitza com la velocitat de l'aire tendeix a mostrar valors cada vegada més elevats aigües avall del dissipador i com li costa aquest recuperar el valor inicial d'entrada. Aquest fet es pot veure bastant exemplificat en el cas amb major velocitat d'entrada, on es pot veure la diversitat de valors de velocitat d'aire que es té aigües avall del dissipador, on el rang de velocitats va des de 0 m/s fins a 9,08 m/s.

S'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 18 €. A diferència dels dissipadors anteriors explicats en aquest apartat, aquest és un dissipador d'11 aletes conformat pel mètode de fabricació "bonded" i és per això que el seu preu estimat és inferior als dels dissipadors de 16 aletes però superior al del dissipador de 9 aletes presentat anteriorment.

- **Casos amb 12 aletes:** s'ha ajuntat els casos que presenten un nombre d'aletes igual a 12. A diferència del punt anterior, en aquest, els dissipadors només comparteixen el nombre d'aletes. Tant el gruix, com la separació entre aletes, presenten valors diferents. És normal que els resultats divergeixin més. La *Taula 45* serveix per corroborar-ho:

Taula 45: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons un número d'aletes igual a 12

	1 mm de gruix d'aleta i 2,6 mm de separació entre aletes	1,5 mm de gruix d'aleta i 2,1 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)	
v (m/s)	CAS 12-10-260	CAS 12-15-210
0,5	1,241	1,316
1	1,474	1,595
1,5	1,640	1,792
2	1,696	1,872
2,5	1,808	1,954
3	1,884	1,978
3,5	1,904	1,911
4	1,874	1,761
4,5	1,791	1,512
5	1,647	1,162

Es troba que els valors màxims de rendiment energètic es presenten en diferents velocitats d'entrada. És així perquè el "CAS 12-15-210" presenta menys separació entre les aletes i per tant, necessita de més potència consumida pel ventilador perquè generi més velocitat de flux perquè pugui refrigerar les aletes. El millor resultat energètic és el que presenta el "CAS 12-15-210". Tot i així, la diferència de valors màxims en tots dos casos, estan només separats per 0,074 W, un valor bastant insignificant. Així mateix, s'ha d'escollir el que millor balanç energètic presenti. Amb l'ajut de la *Figura 101*, es pot apreciar el comportament energètic en tots dos casos:

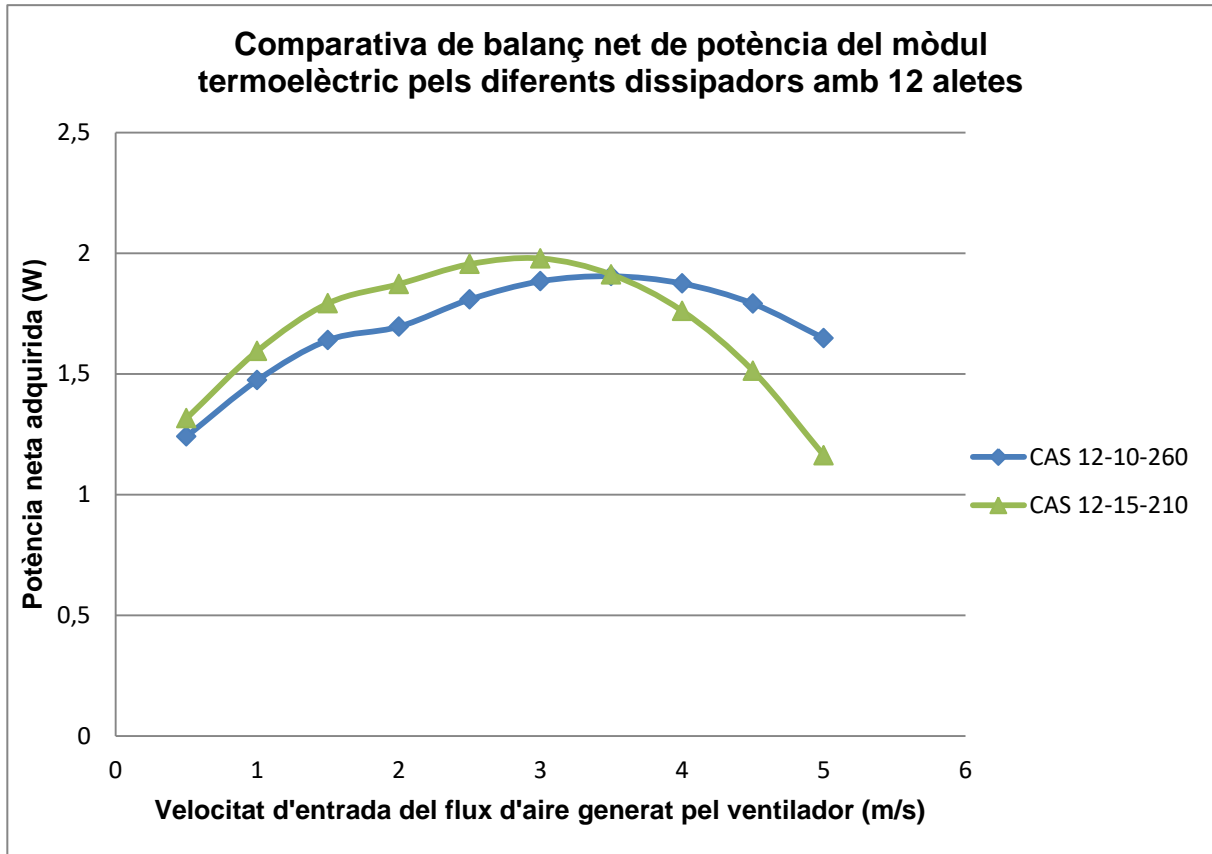


Figura 101: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb número d'aletes igual a 12

Tot seguit, s'exposen els resultats de comportament del model, en el "CAS 12-15-210" aconseguits amb l'ANSYS, quan s'obté el millor balanç energètic (veure *Figures 102, 103 i 104*):

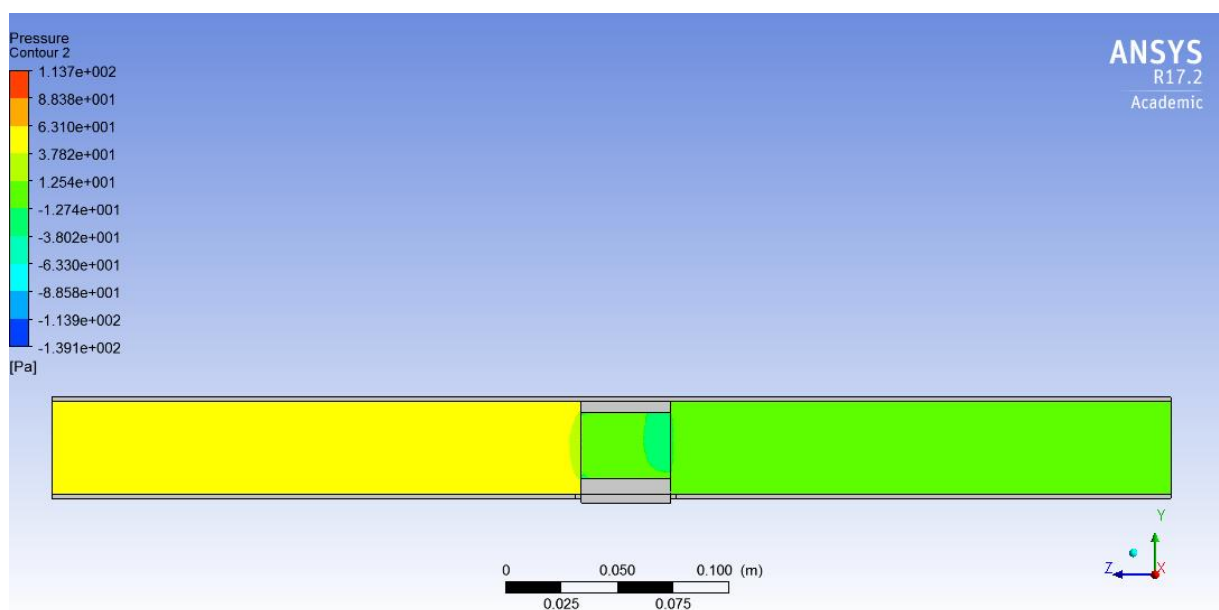


Figura 102: Pressió a la qual està sotmès l'aire en diferents trams del tub d'acer

Com mostra la *Figura 102*, l'aire disminueix la seva pressió aigües a baix del dissipador. El resultat obtingut a la sortida del dissipador ha estat un valor negatiu de -7,30 Pa (es podrà trobar en el full de càlcul EXCEL: *Simulation_ANSYS_10* que s'ha adjuntat en la còpia electrònica del projecte). La disminució de la pressió de l'aire fins a un valor negatiu es deu a la presència del dissipador que fa d'element obstructiu. L'aire presenta un valor de pressió, aigües amunt del dissipador, de 39,85 Pa (consulta fulls de càlcul EXCEL adjuntats a la còpia electrònica del projecte).

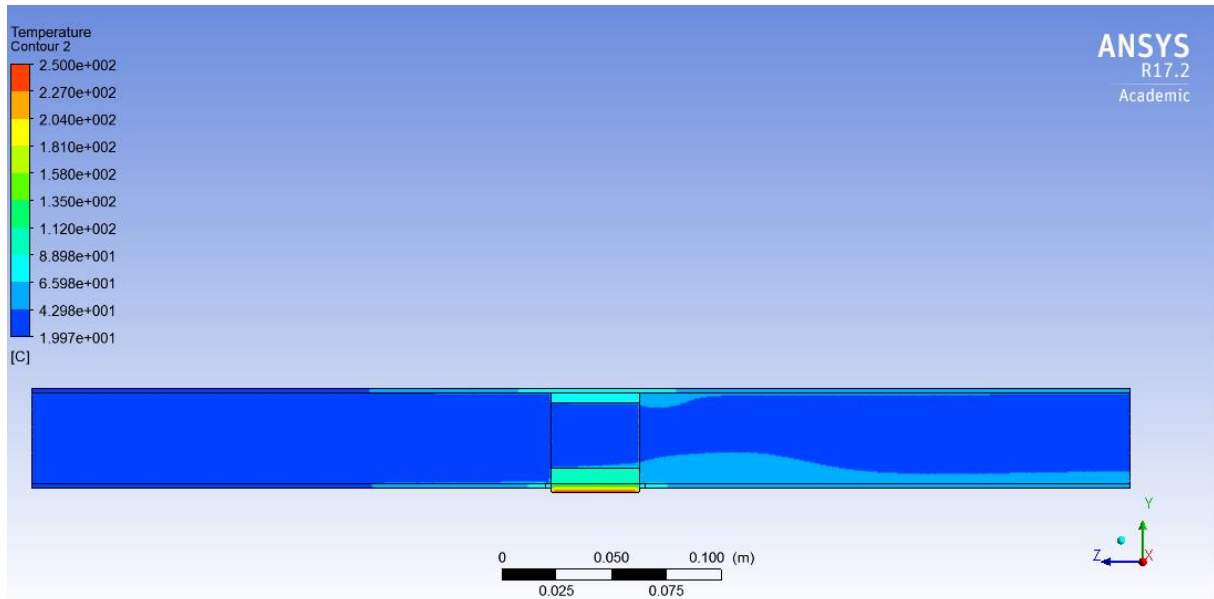


Figura 103: Temperatura a la qual estan sotmeses les diferents parts

En aquest cas, es pot visualitzar la temperatura que té l'aire dintre del dissipador d'aletes a partir de la *Figura 103*. Això és a causa del pla definit en l'ANSYS CFD-Post, com ja s'ha explicat en el punt on s'han explicat els casos per dissipadors de 9 aletes, per tal de poder analitzar el comportament d'aquest a l'interior. El comportament tèrmic que es visualitza, mostra com el dissipador en la seva part inferior té una temperatura compresa entre 88,90 i 112 °C. Així mateix, les plaquetes de llautó mostren una temperatura compresa entre 65,98 i 88,98 °C. Això vol dir que el dissipador va disminuint la seva temperatura al llarg de la seva superfície. La temperatura de la cara freda del dissipador en aquest cas és de 93,98 °C (veure fulls de càlcul EXCEL adjuntats en la còpia electrònica del projecte).

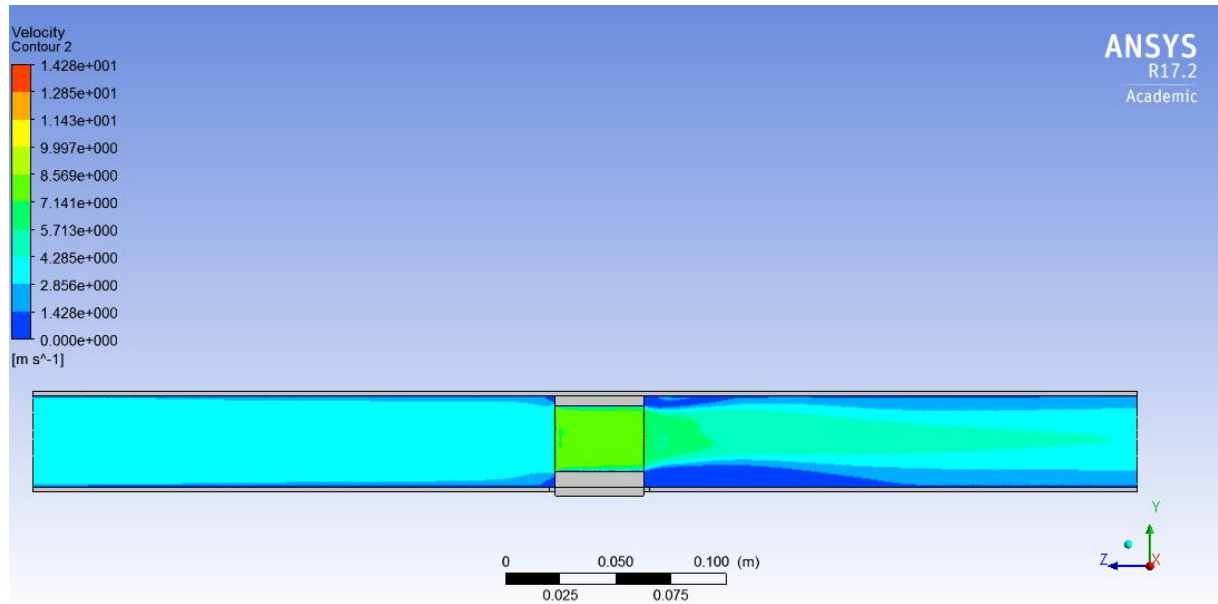


Figura 104: S'observa com la velocitat del flux d'aire varia per culpa la presència del dissipador

Pel que fa la velocitat del flux d'aire en aquest cas, a partir de la *Figura 104*, es pot avaluar com l'aire va tendint augmentar la seva velocitat aigües avall del dissipador però com després intenta recuperar el valor inicial que presentava inicialment. A part, es pot veure la velocitat màxima que s'aconsegueix dintre el dissipador, és a dir, quan el flux d'aire es concentra per passar a través de les aletes i així refrigerar el dissipador. La velocitat màxima que s'obté es troba compresa en un rang de velocitats que va de 7,141 fins a 8,569 m/s.

Conseqüentment, es mostra en les *Figures 105, 106 i 107* el comportament del model en el "CAS 12-15-210", segons diferents valors de velocitat d'entrada de l'aire:

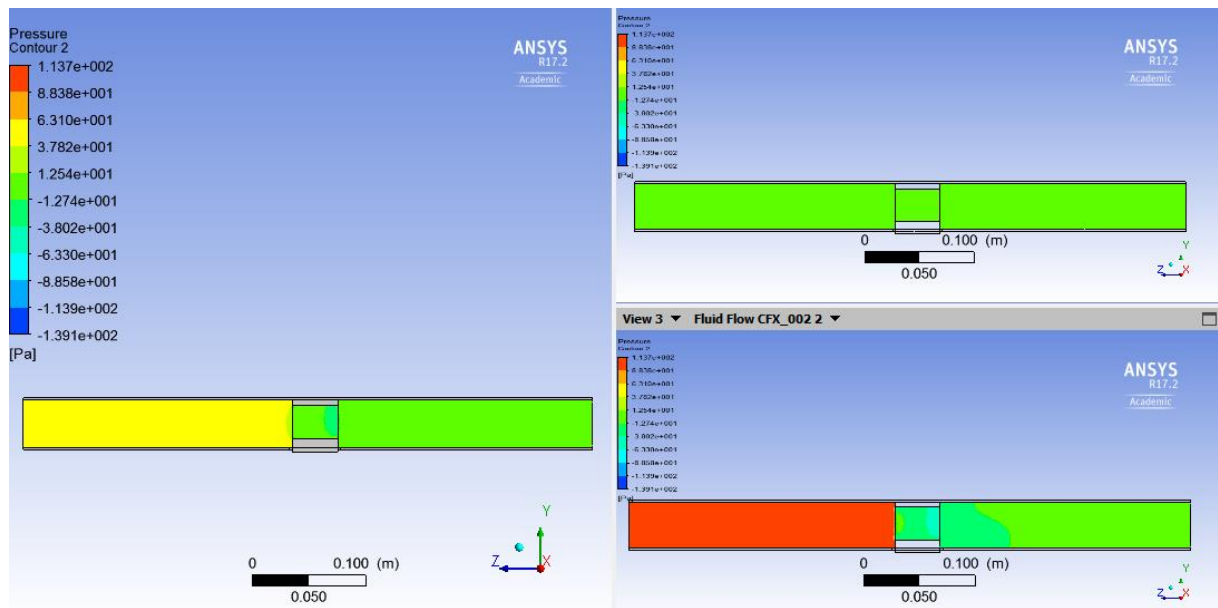


Figura 105: Comparació de pressions segons el valor d'entrada d'aire

A la *Figura 105* es compara les pressions obtingudes pel model durant les simulacions amb millor balanç net d'energia (a 3 m/s, imatge més gran), amb la velocitat d'entrada més baixa (a 0 m/s, imatge superior de la dreta) i amb la velocitat d'entrada més alta (a 5 m/s, imatge inferior de la dreta). Les pressions d'aire augmentant aigües amunt del dissipador a mesura que s'augmenta la velocitat d'entrada. A part, es pot veure que no hi ha casi diferència entre les pressions d'aigües amunt i avall del dissipador en la simulació amb menys velocitat d'entrada (pressió d'entrada té un valor igual a 1,60 Pa i la pressió de sortida té un valor de -0,16 Pa, es poden consultar en els fulls de càlcul EXCEL adjuntats amb la còpia electrònica). Així mateix, es pot veure com en el cas amb major velocitat es té unes pressions menors, una vegada el flux d'aire està en contacte amb les aletes del dissipador, que en els casos amb una velocitat de 3 m/s i de 0,5 m/s. A més, aquestes pressions amb valors menors (rang de pressions entre -38,02 i -63,33 Pa) es mantenen durant un cert tram del tub. Això comporta a tenir unes pèrdues de càrrega molt elevades, per ser més exactes, d'un valor de 124,92 Pa.

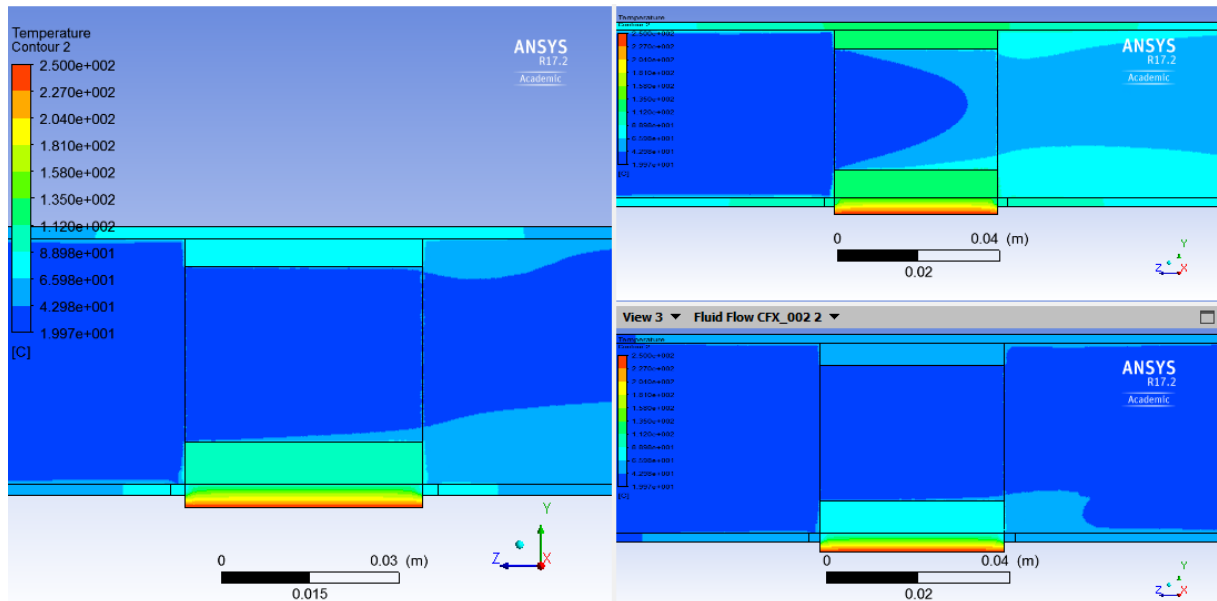


Figura 106: Es centra en la temperatura aconseguida per la cara freda del mòdul segons el valor d'entrada d'aire

Amb la *Figura 106* no es pot saber exactament quina temperatura està assolint el dissipador al llarg de les seves aletes. Tot i així, observant la part inferior d'aquest (la base) i les plaquetes de llautó, es pot saber si el dissipador ha continuat presentant un comportament tèrmic constant al llarg de la seva superfície o si ha variat i ha anat disminuint la seva temperatura a mesura que la calor tendia allunyar-se, a través de les seves aletes, de la cara freda del mòdul termoelèctric. A més, es pot visualitzar la temperatura que assoleix el flux d'aire quan està en contacte amb les aletes del dissipador. Com ja ha passat en el punt on es presentava els casos dels dissipadors amb 9 aletes, en la simulació amb menys velocitat d'entrada d'aire (imatge superior de la dreta), l'aire no pot refrigerar del tot bé les aletes del dissipador. Això comporta que aquest experimenti, a més, un augment de la seva temperatura que es veurà reflectit en una diferència de temperatura entre les cares bastant menor (la potència produïda pel mòdul termoelèctric serà d'un valor de 1,31 W). Les úniques simulacions que sembla que presenten una variació de temperatura considerable en la superfície del dissipador són les simulacions realitzades amb una velocitat d'entrada de 3 i 5 m/s. En el cas de la simulació amb una velocitat d'entrada de 3 m/s es té un rang de temperatures que compren unes temperatures que van des de 65,98 fins a 112 °C. Envers, la simulació amb una velocitat d'entrada de 5 m/s té un rang de temperatures que compren unes temperatures que van des de 42,98 fins a 88,98 °C.

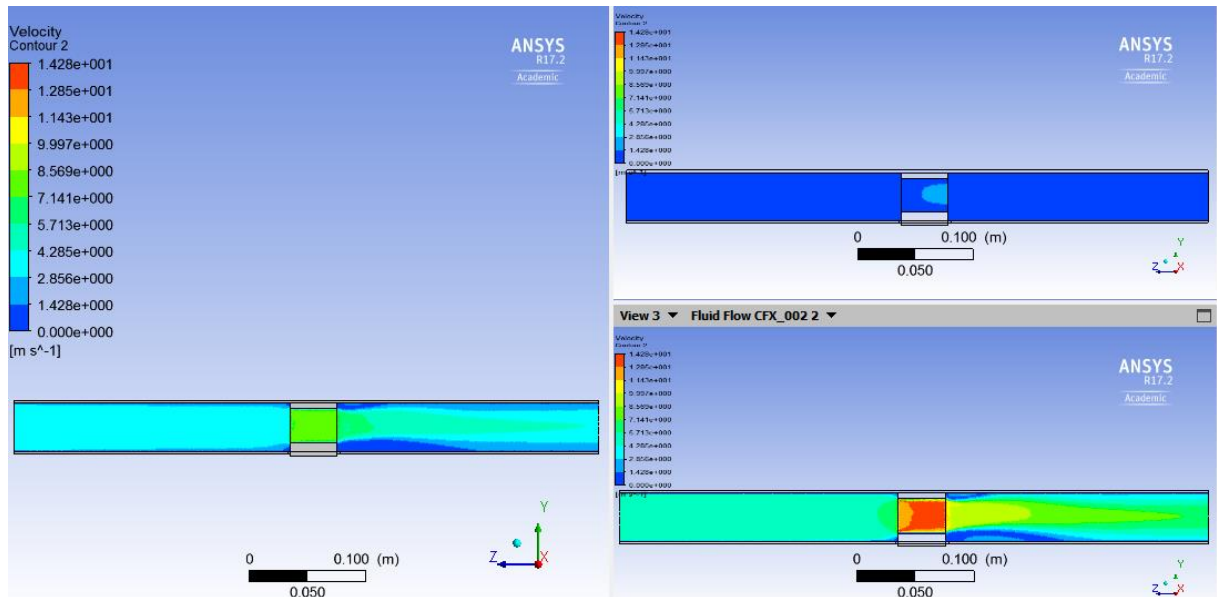


Figura 107: Velocitat amb la qual varia el flux d'aire al llarg del tub d'acer, com a conseqüència de la col·locació del dissipador

Finalment, la Figura 107 mostra el comportament del flux de l'aire a mesura que s'augmenta la seva velocitat i com li costa recuperar el valor inicial d'entrada com a conseqüència d'anar augmentant la velocitat. En la simulació realitzada a major velocitat es pot veure com l'aire, una vegada està en contacte amb les aletes, comença a augmentar la seva velocitat des dels extrems inferior i superior i va augmentant uniformement la seva velocitat al llarg de la superfície del dissipador. El fet és a causa que l'aire necessita entra tant pels extrems superior i inferior del dissipador però troba l'obstacle de la seva base i de les plaquetes de llautó i necessita augmentar la seva velocitat. A part, es mostra com la concentració del flux d'aire a la sortida del dissipador tendeix a augmentar la seva velocitat. Aquest augment de velocitat està entre uns valors de velocitat que van des de 12,85 m/s fins a 14,28 m/s.

S'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 20 €. A diferència dels dissipadors anteriors explicats en aquest apartat, aquest és un dissipador de 12 aletes conformat pel mètode de fabricació "bonded" i és per això que el seu preu estimat és inferior als dels dissipadors de 16 aletes però superior als dels dissipadors de 11 i 9 presentats anteriorment.

- **Casos amb 14 aletes:** punt on passa exactament el mateix que l'anterior, l'únic que aquest presenta 14 aletes. Tots dos cassos presenten diferents gruixos i separacions entre aletes. Els resultats numèrics es troben a la *Taula 46*:

Taula 46: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons un número d'aletes igual a 14

	1 mm de gruix d'aleta i 2 mm de separació entre aletes	1,5 mm de gruix d'aleta i 1,5 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)	
v (m/s)	CAS 14-10-200	CAS 14-15-150
0,5	1,328	1,429
1	1,590	1,732
1,5	1,787	1,951
2	1,882	2,046
2,5	1,998	2,107
3	2,066	2,069
3,5	2,069	1,903
4	2,003	1,603
4,5	1,869	1,161
5	1,662	0,566

A diferència del punt anterior, es mostra una diferència significativa entre els valors màxims de potència neta dels dos cassos exposats. Això vol dir que en aquest cas la separació entre aletes afecta bastant a la resposta energètica. La *Figura 108* mostra aquesta diferència:

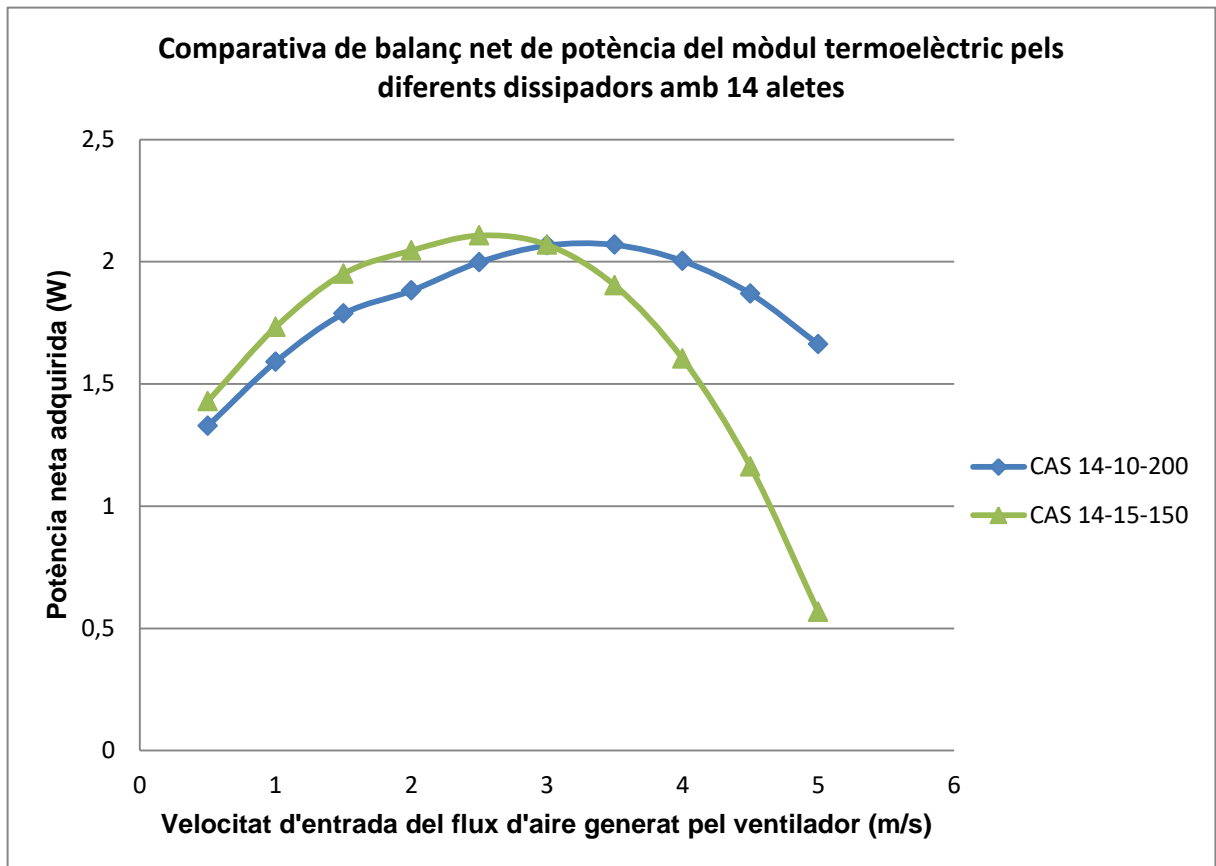


Figura 108: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb número d'aletes igual a 14

A les *Figures 109, 110 i 111*, es presenta el comportament del model en el “CAS 14-15-150” amb ANSYS, quan aquest presenta el valor més elevat de potència neta:

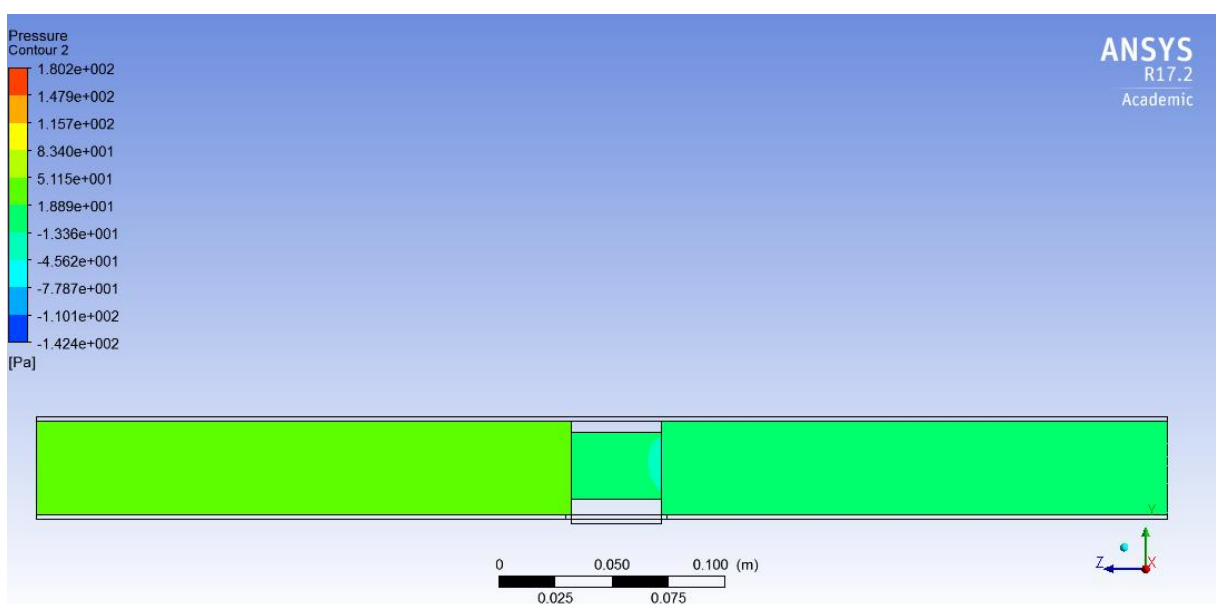


Figura 109: Pressió a la qual està sotmès l'aire en diferents trams del tub d'acer

Com mostra la *Figura 109*, l'aire disminueix la seva pressió aigües a baix del dissipador. El valor obtingut a la sortida del dissipador ha estat un valor negatiu de -5,16 Pa (es podrà trobar en el full de càlcul EXCEL: *Simulation_ANSYS_11* que s'ha adjuntat en la còpia electrònica del projecte). La disminució de la pressió de l'aire fins a un valor negatiu es deu a la presència del dissipador que fa d'element obstructiu. L'aire presenta un valor de pressió, a la sortida del dissipador, de 45,30 Pa (consulta fulls de càlcul EXCEL adjuntats a la còpia electrònica del projecte).

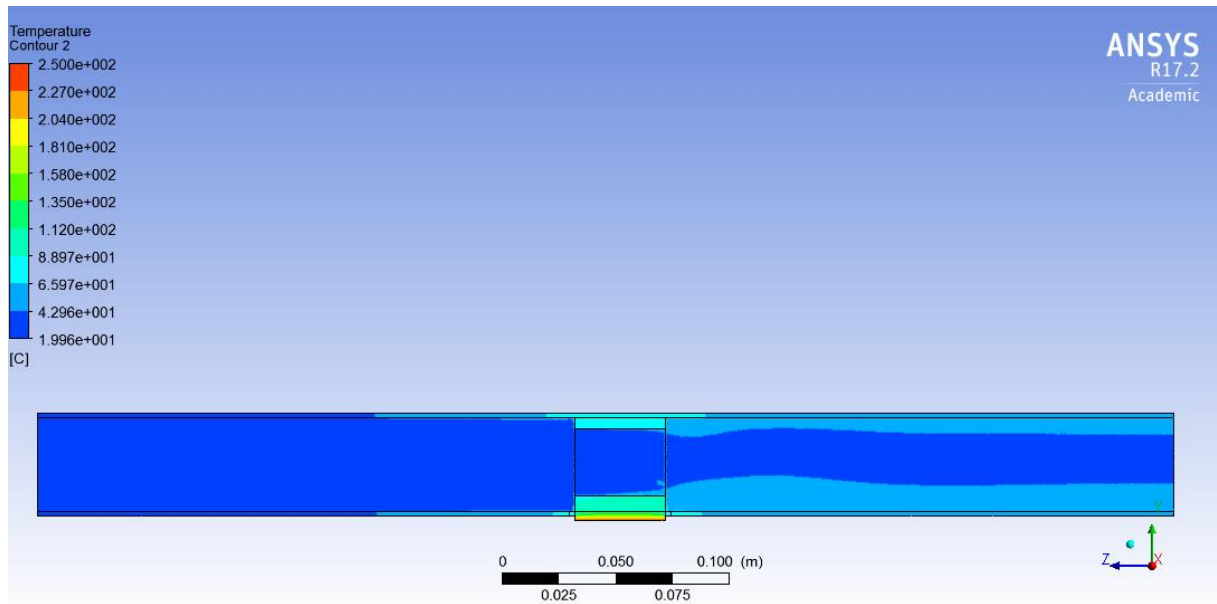


Figura 110: Temperatura a la qual estan sotmeses les diferents parts

En aquest cas es pot visualitzar la temperatura que té l'aire dintre del dissipador d'aletes a partir de la *Figura 110*. Això és a causa del pla definit en l'ANSYS CFD-Post que ja s'ha explicat en dos punts anteriors (casos amb 9 i 12 aletes). El comportament tèrmic que es visualitza, mostra com el dissipador en la seva part inferior té una temperatura compresa entre 88,97 i 112 °C. Així mateix, les plaquetes de llautó mostren una temperatura compresa entre 65,97 i 88,97 °C. Això vol dir que el dissipador va disminuint la seva temperatura a partir que les aletes dissipin la calor rebutjada per la cara freda del mòdul termoelèctric. La temperatura de la cara freda del dissipador en aquest cas és de 91,45 °C (veure fulls de càlcul EXCEL adjuntats en la còpia electrònica del projecte).

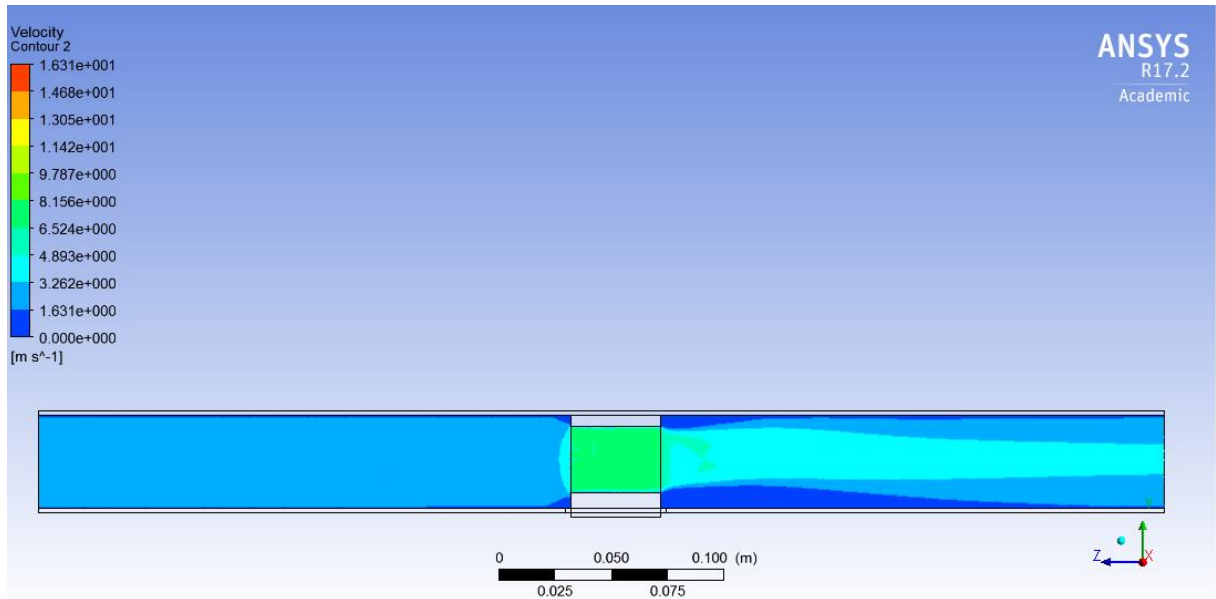


Figura 111: S'observa com la velocitat del flux d'aire varia per culpa la presència del dissipador

Pel que fa la velocitat del flux d'aire en aquest cas, a partir de la *Figura 111*, es pot avaluar com l'aire va tendint augmentar la seva velocitat aigües avall del dissipador però com després intenta recuperar el valor inicial que presentava inicialment. A part, es pot veure la velocitat màxima que s'aconsegueix dintre el dissipador, és a dir, quan el flux d'aire es concentra per passar a través de les aletes i així refrigerar el dissipador. La velocitat màxima que s'obté es troba compresa en un rang de velocitats que va de 6,524 fins a 8,156 m/s.

Es compara el "CAS 14-15-150" segons diferents velocitats d'entrada (veure *Figures 112, 113 i 114*):

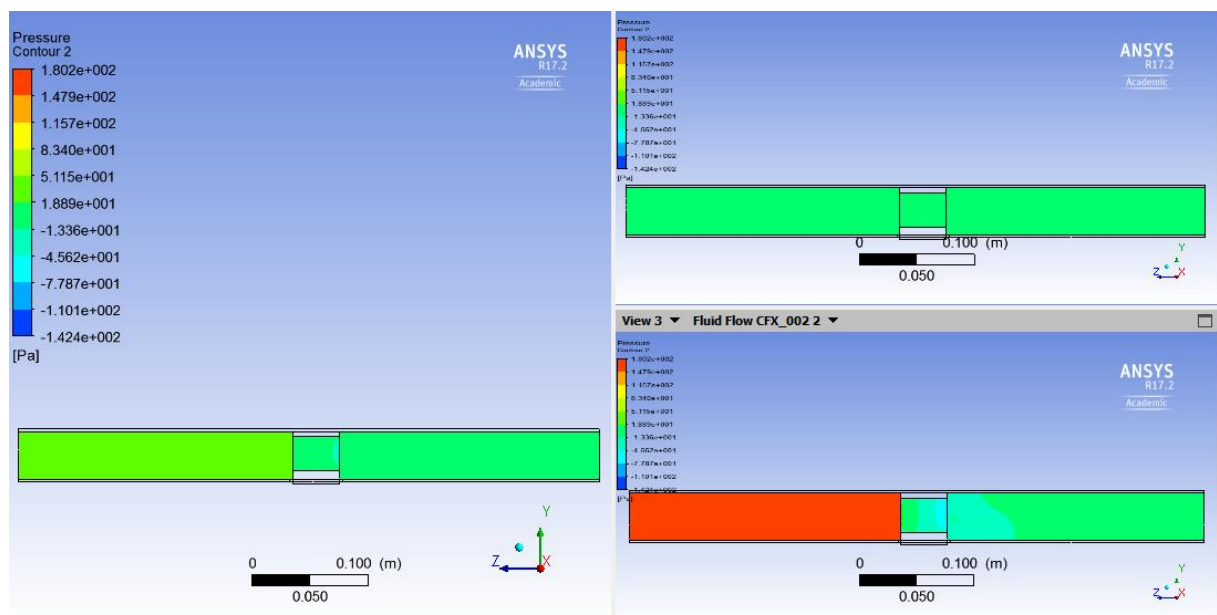


Figura 112: Comparació de pressions segons el valor d'entrada d'aire

A la *Figura 112* es compara les pressions obtingudes pel model durant les simulacions amb millor balanç net d'energia (a 3 m/s, imatge més gran), amb la velocitat d'entrada més baixa (a 0 m/s, imatge superior de la dreta) i amb la velocitat d'entrada més alta (a 5 m/s, imatge inferior de la dreta). Les pressions d'aire augmentant aigües amunt del dissipador a mesura que s'augmenta la velocitat d'entrada. A part, es pot veure que no hi ha casi diferència entre les pressions d'aigües amunt i avall del dissipador en la simulació amb menys velocitat d'entrada (pressió d'entrada té un valor igual a 2,43 Pa i la pressió de sortida té un valor de -0,165 Pa, es poden consultar en els fulls de càlcul EXCEL adjuntats amb la còpia electrònica). Així mateix, es pot veure com en el cas amb major velocitat es té unes pressions menors, una vegada el flux d'aire està en contacte amb les aletes del dissipador, que en els casos amb una velocitat de 3 m/s i de 0,5 m/s. A més, aquestes pressions amb valors menors (rang de pressions entre -13,36 i -45,62 Pa) es mantenen durant un cert tram del tub. Això comporta a tenir unes pèrdues de càrrega molt elevades, per ser més exactes, d'un valor de 192,49 Pa.

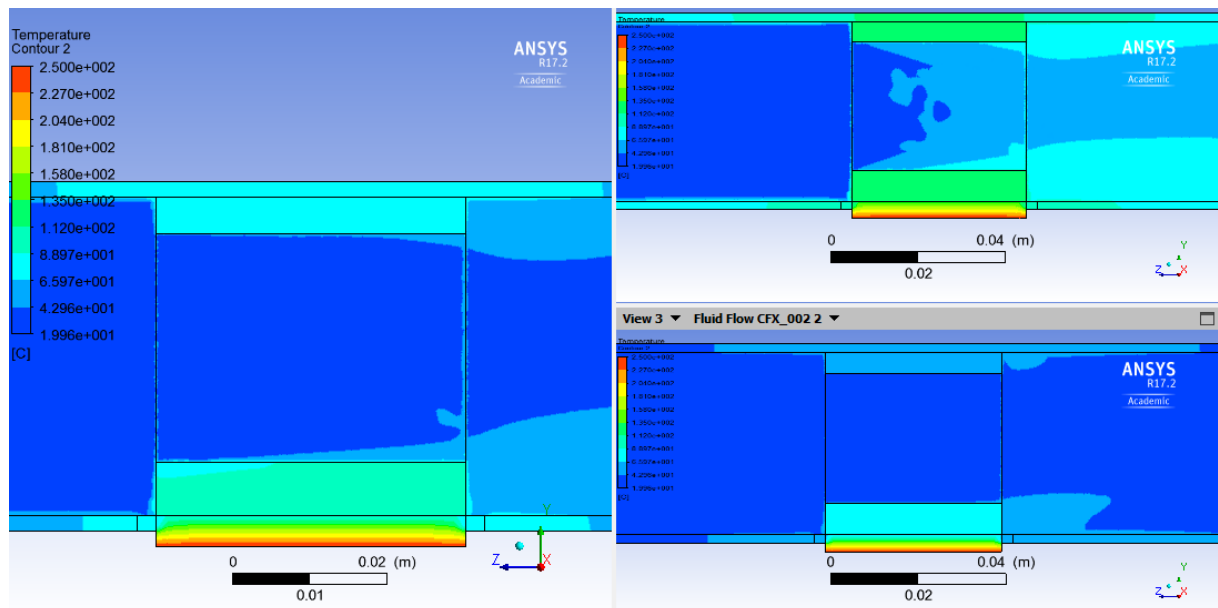


Figura 113: Es centra en la temperatura aconseguida per la cara freda del mòdul segons el valor d'entrada d'aire

Amb la *Figura 113*, no podem saber exactament quina temperatura està assolint el dissipador al llarg de la seva superfície. Tot i així, observant la part inferior d'aquest (la base) i les plaquetes de llautó, es pot saber si el dissipador ha continuat presentant un comportament tèrmic constatat o si ha variat i ha anat disminuint la seva temperatura a mesura que la calor tendia allunyar-se, a través de les seves aletes, de la cara freda del mòdul termoelèctric. A més, es pot visualitzar la temperatura que assoleix el flux d'aire quan està en contacte amb les aletes del dissipador. Anteriorment, en els casos amb

dissipadors de 9 i 11 aletes, es podia veure com l'aire, en la simulació amb menor velocitat d'entrada, tendia a disminuir la seva temperatura una vegada entrava en contacte amb les aletes del dissipador de forma uniforme. En aquest cas és diferent, l'aire presenta un comportament tèrmic dispers. Les úniques simulacions que sembla que presenten una variació de temperatura considerable en la superfície del dissipador són les simulacions realitzades amb una velocitat d'entrada de 3 i 5 m/s. En el cas de la simulació amb una velocitat d'entrada de 3 m/s es té un rang de temperatures que compren unes temperatures que van des de 65,97 fins a 112 °C. Envers, la simulació amb una velocitat d'entrada de 5 m/s té un rang de temperatures que compren unes temperatures que van des de 42,96 fins a 88,97 °C.

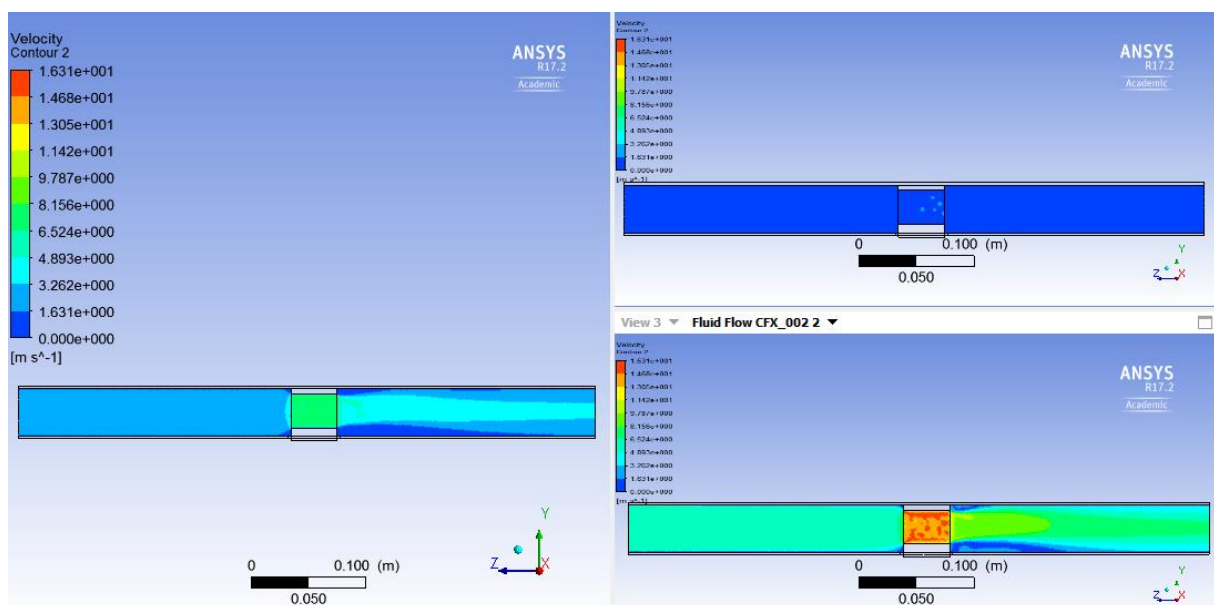


Figura 114: Velocitat amb la qual varia el flux d'aire al llarg del tub d'acer, com a conseqüència de la col·locació del dissipador

Finalment, la Figura 114 mostra el comportament del flux de l'aire a mesura que s'augmenta la seva velocitat i com li costa recuperar el valor inicial d'entrada com a conseqüència d'anar augmentant la velocitat. En la simulació realitzada a major velocitat es pot veure com l'aire, una vegada està en contacte amb les aletes, comença a augmentar la seva velocitat des dels extrems inferior i superior. A diferència del "CAS 12-15-210", velocitat de l'aire no augmenta uniformement al llarg de la superfície del dissipador. Aquest augment de velocitat està entre uns valors de velocitat que van des de 14,68 m/s fins a 16,31 m/s.

S'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 22 €. A diferència dels dissipadors anteriors explicats en aquest apartat, aquest és un dissipador

de 14 aletes conformat pel mètode de fabricació “bonded” i és per això que el seu preu estimat és inferior als dels dissipadors de 16 aletes però superior als dels dissipadors de 11, 9 i 12 aletes presentats anteriorment.

- **Casos amb 16 aletes:** com ja porta passant en els punts anteriors. Aquest cassos només comparteixen el nombre de 16 aletes. A la *Figura 47* s'exposen els resultats numèrics aconseguits:

Taula 47: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons un número d'aletes igual a 16

	1 mm de gruix d'aleta i 1,65 mm de separació entre aletes	1,5 de gruix d'aleta i 1,1 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)	
v (m/s)	CAS 16-10-165	CAS 16-15-110
0,5	1,403	1,510
1	1,707	1,873
1,5	1,923	2,126
2	2,027	2,203
2,5	2,136	2,186
3	2,188	2,002
3,5	2,159	1,624
4	2,047	1,041
4,5	1,845	0,235
5	1,551	-0,812

Com ja passava en els punts anteriors, la separació entre aletes és el factor determinant perquè un dissipador presenti millor balanç energètic que l'altre. A partir de la *Figura 115*, es mostra com el “CAS 16-15-110” s'imposa en comportament energètic al “CAS 16-10-165”:

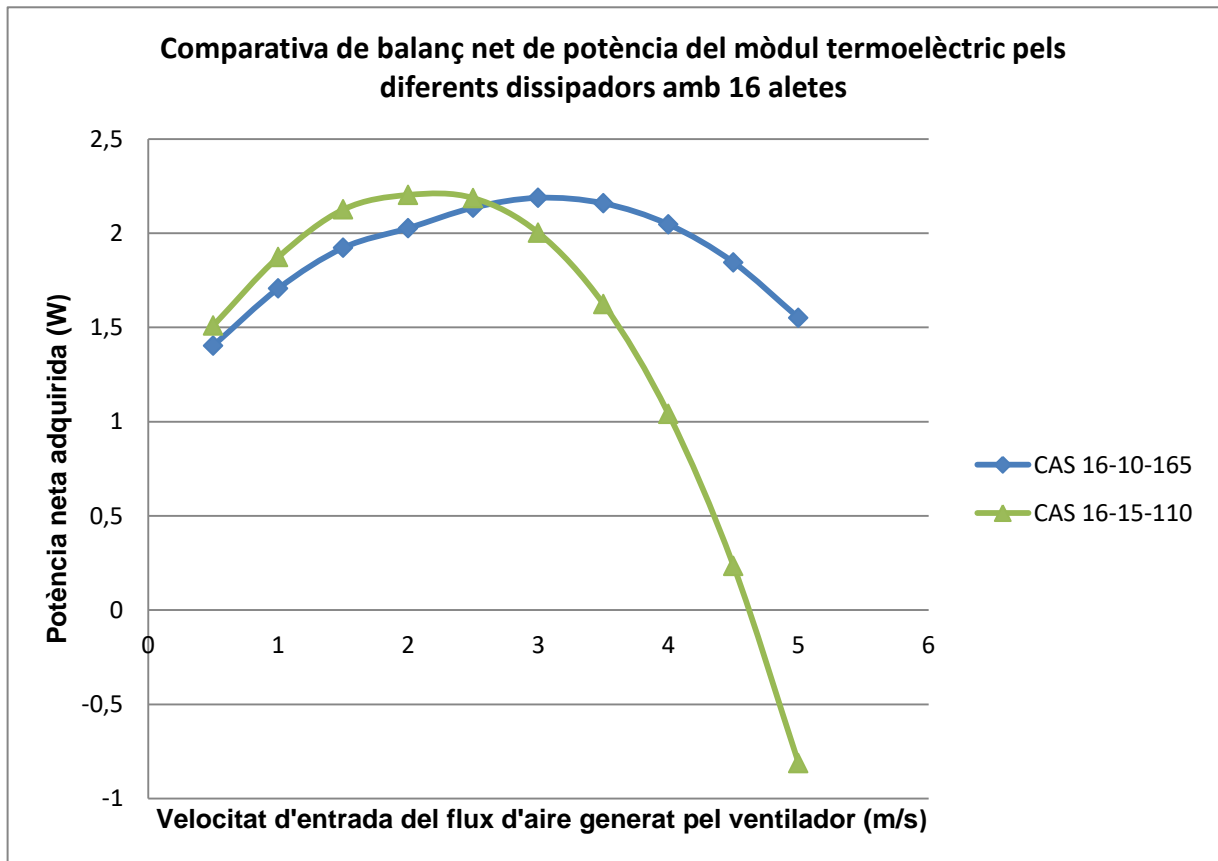


Figura 115: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb número d'aletes igual a 16

En aquest punt, no s'exposa cap imatge que representi el comportament del model en el "CAS 16-15-110", ja que anteriorment, en el punt "Casos amb 1,5 mm de gruix d'aletes", ja havia sortit que aquest cas era el que presentava millor rendiment energètic i s'han presentat les imatges de comportament. Per tornar-les a consultar, només cal anar al punt esmentat.

S'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 25 €, com s'ha descrit en els punts "Casos amb 1 mm de gruix d'aletes" i "Casos amb 1,5 mm de gruix d'aletes".

8.2.3. Efecte de la separació entre aletes

- **Casos amb una separació entre aletes de més d'1 mm i menys de 2 mm:** aquest punt presenta diferents diversitats i igualtats entre els dissipadors. Dos casos que presenten el mateix nombre d'aletes però diferent gruix d'aquestes i dos casos més que

no tenen el mateix nombre d'aletes però si el mateix gruix. El cas que comparteix característiques amb els dos restants és el "CAS 16-15-110" que es pot veure a la *Taula 48*:

Taula 48: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons una separació entre aletes de més d'1 mm i menys de 2 mm

	16 aletes, 1 mm de gruix d'aleta i 1,65 mm de separació entre aletes	14 aletes, 1,5 mm de gruix d'aleta i 1,5 mm de separació entre aletes	16 aletes, 1,5 mm de gruix d'aleta i 1,1 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)		
v (m/s)	CAS 16-10-165	CAS 14-15-150	CAS 16-15-110
0,5	1,403	1,429	1,510
1	1,707	1,732	1,873
1,5	1,923	1,951	2,126
2	2,027	2,046	2,203
2,5	2,136	2,107	2,186
3	2,188	2,069	2,002
3,5	2,159	1,903	1,624
4	2,047	1,603	1,041
4,5	1,845	1,161	0,235
5	1,551	0,566	-0,812

S'observa com els diferents casos sobrepassen els 2 W de potència neta però el que aconsegueix més, és el "CAS 16-15-110". Aquest cas, ja ha sortit bastants vegades com el que presenta un disseny de dissipador que assoleix el millor balanç d'energia entre potència consumida i produïda. Un dels motius és perquè presenta una geometria que ocupa gairebé tota la secció del tub d'acer. D'aquesta manera, impedeix el pas de l'aire pels seus laterals i fa concentrar tot l'aire entre les seves aletes. A part, com que compta amb el gruix més gran d'aletes que es té en aquest projecte, fa possible que hi hagi més superfície de material per on la calor pugui ser dissipada. A més, compta amb una separació d'aletes bastant petita que fa que la velocitat del flux d'aire que passa pel mig sigui més gran i afavoreixi la transferència de calor de l'aleta cap al fluid. Per acabar, s'exposa la *Figura 116* que mostra la comparativa de balanços energètics:

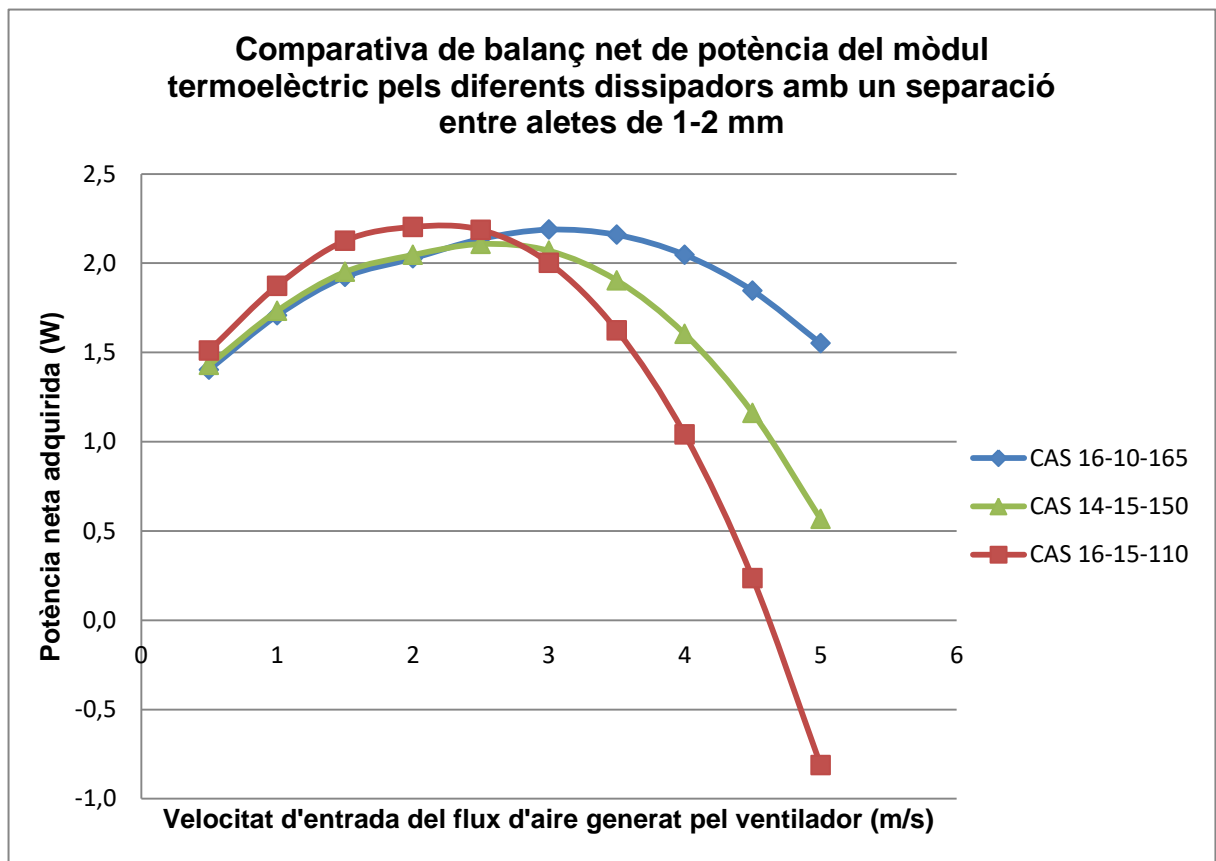


Figura 116: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb una separació entre aletes de més d'1 mm i menys de 2 mm

Torna a passar, que el millor balanç d'energia, es troba en el "CAS 16-15-110". Per tant, si es vol consultar les imatges de comportament d'aquest cas, només cal anar al punt "Casos amb 1,5 mm de gruix d'aletes".

S'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 25 €, com s'ha descrit en els punts "Casos amb 1 mm de gruix d'aletes" i "Casos amb 1,5 mm de gruix d'aletes".

- **Casos amb una separació entre aletes de més de 2 mm i menys de 3 mm:** aquesta categoria engloba la gran majoria de dissipadors d'aletes realitzats, menys el grup de 16 aletes. A part, es contemplen diferents gruixos. Aquest fet es tradueix en tenir un rang més elevat de resultats, tal com es pot veure en la *Taula 49*:

Taula 49: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons una separació entre aletes de més de 2 mm i menys de 3 mm

	11 aletes, 1,5 mm de gruix d'aleta i 2 mm de separació entre aletes	9 aletes, 1,5 mm de gruix d'aleta i 2,8 mm de separació entre aletes	11 aletes, 1,5 mm de gruix d'aleta i 2,2 mm de separació entre aletes	12 aletes, 1 mm de gruix d'aleta i 2,6 mm de separació entre aletes	14 aletes, 1 mm de gruix d'aleta i 2 mm de separació entre aletes	12 aletes, 1,5 mm de gruix d'aleta i 2,1 mm de separació entre aletes
	Potència neta (W)					
v (m/s)	CAS 11-15-200	CAS 09-15-280	CAS 11-15-220	CAS 12-10-260	CAS 14-10-200	CAS 12-15-210
0,5	1,225	1,106	1,286	1,241	1,328	1,316
1	1,438	1,282	1,500	1,474	1,590	1,595
1,5	1,609	1,427	1,690	1,640	1,787	1,792
2	1,682	1,476	1,779	1,696	1,882	1,872
2,5	1,762	1,556	1,880	1,808	1,998	1,954
3	1,805	1,615	1,921	1,884	2,066	1,978
3,5	1,774	1,618	1,890	1,904	2,069	1,911
4	1,675	1,571	1,784	1,874	2,003	1,761
4,5	1,504	1,474	1,601	1,791	1,869	1,512
5	1,254	1,323	1,336	1,647	1,662	1,162

Els resultats obtinguts mostren com els dissipadors que tenen un gruix d'aleta d'1,5 mm segueixen una tendència d'obtenir millor balanç d'energia, quan la velocitat d'entrada l'aire és de 3 m/s. Envers, l'altre grup de dissipadors, els que tenen un gruix d'1 mm, presenten un millor comportament energètic quan la velocitat d'entrada és de 3,5 m/s. Els fets es poden traduir en dir que els dissipadors amb menys gruix, necessiten més flux d'aire circulant per a la refrigeració, com a conseqüència de tenir menys superfície de dissipació. En canvi, els dissipadors d'1,5 mm, al tenir més superfície per poder dissipar la calor que prové de la base d'aquest, els és més fàcil rebutjar la calor a través de les aletes i no necessiten tant cabal d'aire circulant. El cas és que el que ha obtingut millor balanç d'energia ha estat el "CAS 14-10-200", que ha sigut l'únic de la *Taula 49*, que ha superat els 2 W de potència, tal com es pot veure, també, gràficament a la *Figura 117*:

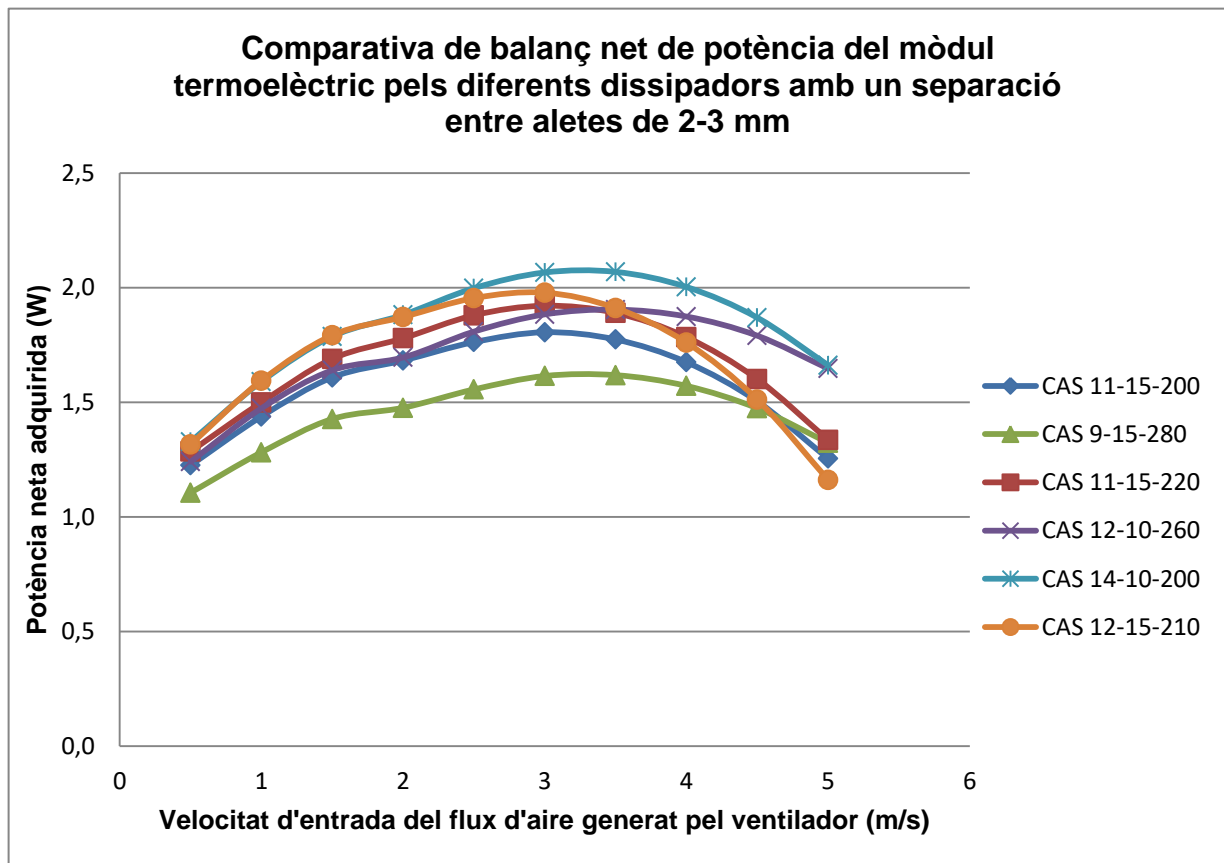


Figura 117: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb una separació entre aletes de més de 2 mm i menys de 3 mm

En aquest cas, no s'analitza el comportament que podria tenir el "CAS 14-10-200" a partir de les figures de l'ANSYS CFD-Post. La causa és perquè s'obtidrien figures de comportament molt semblants a les vistes en el punt "Casos amb 14 aletes".

S'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 22 €, com s'ha descrit en el punt "Casos amb 14 aletes".

- **Casos amb una separació entre aletes de més de 3 mm:** per acabar, es presenta els casos que compten amb una separació entre aletes de més 3 mm. Els casos que conformen aquest punt, presenten una igualtat de gruixos però només hi ha un que divergeix pel que el nombre d'aletes (CAS 10-10-300). Com que són tan iguals, els resultats seran molt semblants, com es pot comprovar amb la *Taula 50*:

Taula 50: Resultats ordenats de balanç net d'energia segons una separació entre aletes de més de 3 mm

	10 aletes, 1 mm de gruix d'aleta i 3 mm de separació entre aletes	9 aletes, 1 mm de gruix d'aleta i 3,4 mm de separació entre aletes	9 aletes, 1 mm de gruix d'aleta i 3,67 mm de separació entre aletes
v (m/s)	CAS 10-10-300	CAS 09-10-340	CAS 09-10-367
0,5	1,065	1,038	1,057
1	1,225	1,191	1,227
1,5	1,356	1,312	1,362
2	1,393	1,340	1,418
2,5	1,475	1,427	1,512
3	1,545	1,493	1,580
3,5	1,575	1,531	1,613
4	1,566	1,530	1,610
4,5	1,515	1,491	1,572
5	1,423	1,417	1,492

En aquest cas, ens tornem a topar amb un fet com el que s'ha donat el punt anterior: "Casos amb 11 aletes". El millor resultat energètic el presenta el que té una separació entre aletes major. En teoria, pels resultats que s'han anat veient, el que hauria d'haver presentat millor comportament energètic, hauria d'haver sigut el "CAS 10-10-300" perquè presenta un nombre major d'aletes que fa que el dissipador tingui més elements per on poder dissipar la calor. A part, presenta una separació d'aletes, la més petita en aquesta comparació, que faria que el flux d'aire fos més concentrat i per tant, que hi hagués una millor refrigeració de les aletes. L'explicació, com ja sabia expressat anteriorment, és per culpa de l'amplada que ocupa dintre el tub i que fa que l'aire es concentri més en les seves aletes i no passi en major mesura a través dels seus laterals. La vista gràfica del balanç net d'energia aconseguida pels diferents casos, s'exposa a la *Figura 118*:

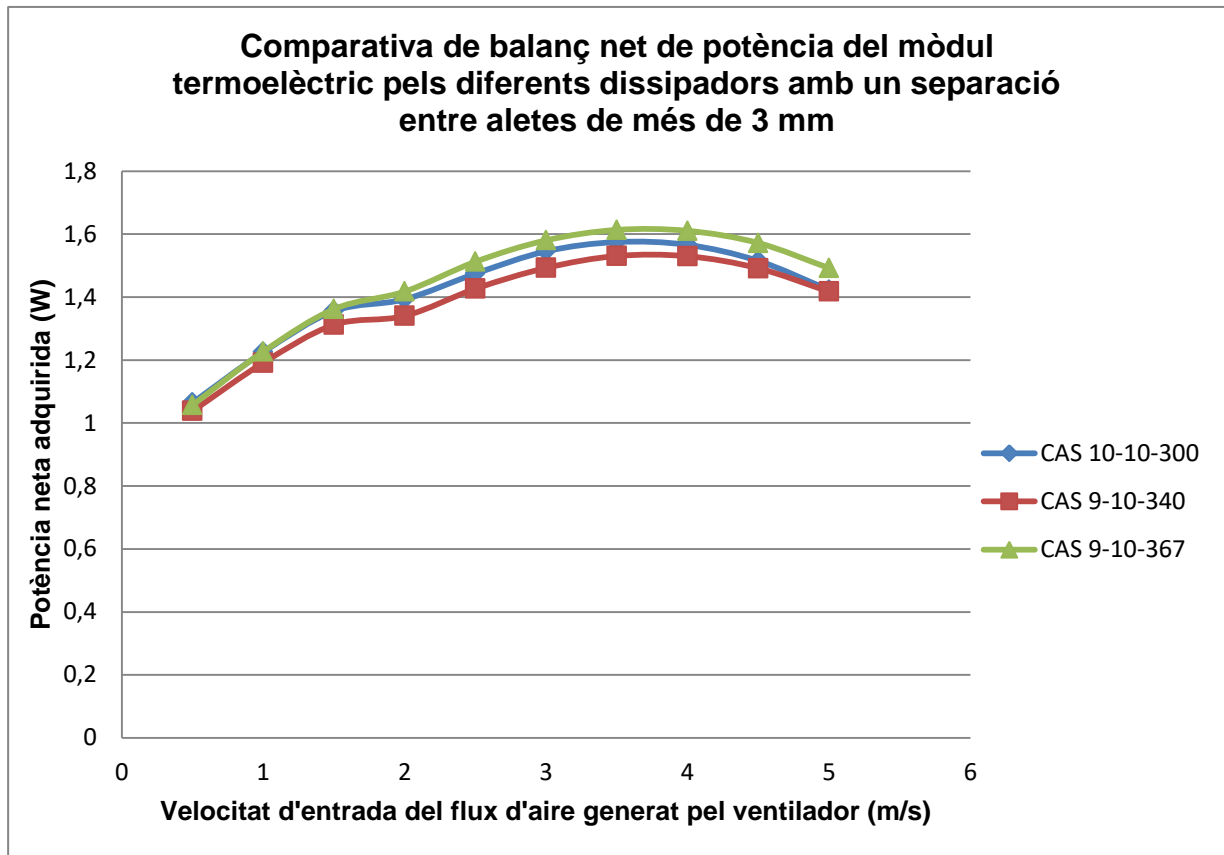


Figura 118: Comparativa de balanç net d'energia pels dissenys de dissipadors amb una separació entre aletes de més de 2 mm i menys de 3 mm

En aquest cas, no s'analitza el comportament que podria tenir el "CAS 09-10-367" a partir de les figures de l'ANSYS CFD-Post. La causa és perquè s'obtidrien figures de comportament molt semblants a les vistes en el punt "Casos amb 9 aletes".

S'estima que el valor en euros que podria costar aquest dissipador és d'uns 4 € ja que és l'únic dissipador que es pot fabricar a partir d'una extrusió perquè té una separació d'aletes de més de 3 mm. A part s'ha de tenir en compte el nombre d'aletes que té i el gruix d'aquestes.

9. CONCLUSIONS

Aquest projecte ha validat una metodologia per simular el comportament d'un dissipador d'aletes en convecció forçada acoblat a un mòdul termoelectrònic. Això ha permès estudiar diferents dissenys de dissipadors de calor d'aletes. Amb els resultats numèrics i els diferents comportaments dels casos dissenyats, aconseguits amb el programari ANSYS, s'ha pogut avaluar com reaccionaven els dissenys realitzats a partir de la convecció forçada.

Així mateix, els dissipadors que presenten millor balanç energètic, segons els criteris utilitzats en l'apartat 9 (*Resultats i discussió*) i que separen els dissipadors en categories diferents, han sigut 8 dissipadors d'aletes. Els escollits han estat els següents que s'exposen a la *Taula 51*:

Taula 51: Dissipadors en el punt de màxima potència neta

Categoria	Cas escollit	Velocitat (m/s)	Potència neta (W)
Casos amb 1 mm de gruix	CAS 16-10-165	3	2,188
Casos amb 1,5 mm de gruix	CAS 16-15-110	2	2,203
Casos amb 9 aletes	CAS 09-15-280	3	1,615
Casos amb 11 aletes	CAS 11-15-220	3	1,921
Casos amb 12 aletes	CAS 12-15-210	3	1,978
Casos amb 14 aletes	CAS 14-15-150	2,5	2,107
Casos amb 16 aletes	CAS 16-15-110	2	2,203
Casos amb una separació entre aletes de més d'1 mm i menys de 2 mm	CAS 16-15-110	2	2,203
Casos amb una separació entre aletes de més de 2 mm i menys de 3 mm	CAS 14-10-200	3,5	2,069
Casos amb una separació entre aletes de més de 3 mm	CAS 09-10-367	3,5	1,613

El "CAS 16-15-110", es troba repetit en 3 categories diferents. Això expressa que ha estat el dissipador que millor balanç energètic aconsegueix entre tots, degut, principalment a una gran superfície de bescanvi. Independentment, en aquest projecte, no es cercava quin obté el millor rendiment energètic, sinó que es buscava observar diferents comportaments dels dissipadors en relació a la potència consumida i a la produïda pel termoelectric.

Així mateix, observant els casos analitzats es pot afirmar:

- **Gruix d'aleta:** els més idonis han estat els que presentaven més número d'aletes. Això es deu atès que el número d'aletes influeix en la calor dissipada. El fet de tenir un número més elevat d'aletes propicia que el dissipador tingui més superfície de material al qual poder evacuar la calor generada des de la seva base. D'aquesta manera, s'aconsegueix dissipar millor la calor rebutjada per la cara freda i resultar d'un augment del gradient de temperatura de la cèl·lula termoelectrica que és veurà traduït en potència produïda més elevada.
- **Número d'aletes:** a l'hora d'analitzar aquests resultats, s'ha topat amb un fet. Tant el número d'aletes, com el gruix d'aletes i com la separació entre aletes, influeix en l'amplitud que ha de presentar el dissipador, que com a màxim ha de ser de 41,2 mm, com s'ha explicat en l'apartat 7: *Disseny dels dissipadors*. És per això que s'ha hagut que anar adaptant valors d'aleta, gruix i separació. El resultat ha estat un grup de dissipadors que comparteixen tant número com gruix d'aletes (casos amb 9 aletes, 11 aletes i separació entre aletes de més de 3 mm). En teoria, els dissipadors d'aletes que més dissipen, són aquells que presenten una separació entre aletes menor però per aquest grup de dissipadors no és així. En aquests casos, els que més dissipen, són aquells que presenten una major amplada de dissipador. L'explicació es deu a no haver ficat plaques de llautó laterals. Com que aquests dissipadors ocupen més espai dintre el tub d'acer, concentrant més el flux d'aire a través de les seves aletes. En canvi, els dissipadors amb separació d'aletes menors, presenten més espai entre les cares laterals d'aquests envers les parets interiors laterals del tub d'acer. Això dificulta una menor concentració del flux d'aire a través del dissipador i comporta el pas d'aire sense contactar amb les aletes del dissipador. Això pot no refrigerar prou bé les aletes i el dissipador no pot dissipar de forma correcta la calor rebutjada per la cara freda (pot comportar a una disminució del gradient de temperatura i menys potència produïda pel mòdul). L'únic avantatge que podem treure d'aquests dissipadors és que faran que la potència consumida pel ventilador no sigui tan elevada, ja que hi haurà menor pressió aplicada pel flux d'aire.

Per altra banda, els casos restants, com que no presenten els mateixos gruixos d'aleta, segueixen la teoria, i els que dissipen més són aquells que tenen més superfície de bescanvi.

- **Separació entre les aletes:** s'ha de tenir en compte el que s'ha explicat en els dos punts anteriors. Els que han destacat més sobre la resta, han estat els que han presentat més nombre d'ales i els que menor separació d'ales han tingut. Tot i així, en els casos amb una separació entre aletes de més 3 mm, s'ha tornat a trobar amb el factor amplitud, i el que millor balanç energètic ha assolit ha estat aquell que ha presentat major amplada de dissipador.

La conclusió final es podria resumir en què s'ha de trobar una relació correcta entre el nombre, el gruix i la separació d'ales. El dissipador ha de comptar amb un mínim d'ales perquè li sigui més fàcil dissipar a través d'aquestes la calor a la qual està sotmesa la seva base. Ha de tenir un gruix d'aleta considerable perquè es pugui fabricar. A més, si les aletes estan més juntes, la velocitat del flux d'aire que passa pel mig és més gran i això afavoreix la transferència de calor de l'aleta cap al fluid, però la pèrdua de càrrega és gran i això necessita més potència. Si les aletes estan separades, l'aire, per un mateix cabal que en el cas anterior, no passa a tanta velocitat i això fa reduir la transferència de calor però la pèrdua de càrrega és menor (i, per tant, la potència absorbida pel ventilador). Per mantenir la mateixa velocitat de pas entre les aletes quan tenim aletes separades en comparació amb aletes juntes, s'ha d'augmentar la velocitat del ventilador.

10. RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost per a la realització dels dissipadors amb millor balanç energètic puja a la quantitat de CENT QUARANTA-VUIT(148 €), a falta d'IVA.

11. RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document 1 Memòria i annexes

Document 2 Plànols

Document 3 Pressupost

12. BIBLIOGRAFIA

AKOSS. How heat sink fin spacing plays a key role in natural convection cooling and how you can optimize it. QATS Inc. (<https://www.qats.com/cms/2010/09/08/how-heat-sink-fin-spacing-plays-a-key-role-in-natural-convection-cooling-and-how-you-can-optimize-it/>, 25 de maig de 2017)

BAKNOR. Stamped heat sink. Baknor Thermal. (<http://www.baknorthermal.com/heat-sinks/stamped-heat-sinks>, 16 de maig de 2017)

BLUECORE. Folded Fin Heatsinks. BlueCore Heatsinks. [<http://www.bluecoreheatsinks.com/products/folded-fin-heatsinks>, 18 de maig de 2017)

ENERTRON. Skived Fins. Enertron Inc. (<http://www.enertron-inc.com/resources-skived-fins.aspx>, 24 de maig de 2017)

GARCIA, I. Disseny amb CFD d'un generador termoelèctric per a conductes circulars. Projecte/Treball Fi de Carrera. Enginyeria Tècnica Mecànica Industrial. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Juny 2016

GD RECTIFIERS. The heatsink guide. GD Rectifiers. (http://www.gdrectifiers.co.uk/news/the_heatsink_guide, 16 de maig de 2017)

GLOBALSOURCES. Die-cast Aluminum Heat Sink, MOQ of 1 Set, 60,000 Shots Lifespan, 8407 Mold Steel. Global Sources. (<http://www.globalsources.com/si/AS/Vision-Fly/6008845634636/pdtl/Die-cast-Heat-Sink/1061739212.htm>, 25 de maig de 2017)

IBERTRÓNICA. Refrigeración Tradicional VS Refrigeración Líquida. Sistema Ibertrónica. (<http://www.ibertronica.es/blog/tutoriales/refrigeracion-tradicional-vs-liquida/>, 16 de maig de 2017)

IYENGAR, M. Design For Manufacturability Of Forced Convection Air Cooled Fully Ducted Heat Sinks. Electronics Cooling (<https://www.electronics-cooling.com/2007/08/design-for->

manufacturability-of-forced-convection-air-cooled-fully-ducted-heat-sinks/, 18 de maig de 2017)

JOHN, L. 3 Reasons to use Pin Fin Heat Sink For LED Lighting today. Linked In. (<https://www.linkedin.com/pulse/20140424075535-306182495-3-reasons-to-use-pin-fin-heat-sink-for-led-lighting-today>, 25 de maig de 2017)

LC AUDIO TECHNOLOGY. Heat sink in Aluminium. LC Audio Technology. (<http://www.lcaudio.com/index.php?page=323>, 16 de maig de 2017)

LEE, S. Optimum design and selection of selection of heat sinks. Digi-Key Electronics. (<http://www.digikey.com/en/pdf/a/aavid-thermalloy/optimum-design-heatsinks>, 17 de maig 2017)

OMEGATRON. Peltier effect circuit. Wikipedia, la enciclopèdia llibre. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Peltier_effect_circuit.png, 28 de juny de 2017)

PELTIER MODULES. Peltier Modules (Thermoelectrics Coolers). PeltierModules.com. (<http://peltiermodules.com/>, 28 de maig de 2017)

QATS. MaxiFLOW™ Heat Sinks. QATS Inc. (<https://www.qats.com/eShop.aspx?q=maxiFLOW%20w/Thermal%20Tape#>, 25 de maig de 2017)

RODRÍGUEZ, B. Artic Alpine M1 Passive, dissipador pasivo para CPUs Intel LGA115x. EL CHAPUZAS INFORMATICO. (<https://elchapuzasinformatico.com/2016/01/arctic-alpine-m1-passive-disipador-pasivo-cpus-intel-lga115x/>, 16 de maig 2017)

SPECMASTER. Heat Sink Machining. Spec Master. (<http://www.specmasterinc.com/lp-heat-sink-machining/>, 25 de maig de 2017)

THERMOCOOL. Bonded Fin Heat Sinks. Thermo Cool Corp.
(<http://thermocoolcorp.com/project/bonded-fins/>, 18 de maig de 2017)

THERMOCOOL.Cold Forging: Cooper & Aluminium Heat Sinks. Thermo Cool Corp.
(<http://thermocoolcorp.com/project/cold-forging/>, 24 de maig de 2017)

T'JOLLYN, I., PUJOL, T., DE PAEPE, M., MASSAGUER, A., MONTORO, L. Plate fin heat sink modelling and design considerations for thermoelectric generators. p. 5. 2017.

WASSON, S. Core Duo on the desktop. THE TECH REPORT.
(<http://techreport.com/review/9794/core-duo-on-the-desktop>, 15 de maig de 2017)

ANNEX A: Càlculs

El principal aspecte que s'estudia al llarg del projecte és el balanç net d'energia. L'obtenció de les diverses potències netes adquirides no ha estat de forma directa. S'ha hagut de realitzar uns càlculs previs a partir de les velocitats d'entrada del flux d'aire que s'estableix just al començament del tub d'acer, de les consegüents temperatures obtingues a ambdues cares del mòdul termoelèctric i de les pressions aplicades a l'interior del tub d'acer pel cabal d'aire generat pel ventilador just abans del contacte d'aquest amb el dissipador i posteriorment a la sortida d'aquest últim.

A.1. CÀLCULS RELACIONATS AMB EL MÒDUL TERMOELÈCTRIC

S'ha realitzat la diferència de temperatures entre les cares del mòdul termoelèctric (Eq. 10):

$$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = T_{side\ hot} (^{\circ}\text{C}) - T_{side\ cold} (^{\circ}\text{C}) \quad (\text{Eq. 10})$$

On ΔT és la diferència de temperatura aconseguida pel mòdul termoelèctric, en graus Celsius, a partir de restar la temperatura de la cara calenta ($T_{side\ hot}$) i la cara freda en ($T_{side\ cold}$).

Com s'ha explicat en l'apartat 6 del document: *Validació del model de simulació*, el fabricant no proporciona la corba característica de comportament del mòdul termoelèctric en funció de la diferència de temperatures de la cara calenta i freda. Per això es van haver de realitzar diferents assajos per a determinar-la. Aquests assajos es van dur a terme en un treball anterior.

S'ha determinat una corba d'ajust entre la potència màxima obtinguda pel mòdul termoelèctric i la diferència de temperatures a les seves cares (Eq. 11):

$$Potència_{mòdul} = 1,3934 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T^2 - 9,4296 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T + 4,4603 \cdot 10^{-2} \quad (\text{Eq. 11})$$

On $Potència_{mòdul}$ és la potència produïda pel mòdul (s'expressa en W) i ΔT és la diferència de temperatures entres les cares del mòdul termoelèctric que s'expressa en Celsius o Kelvin.

A.2. CÀLCULS RELACIONATS AMB EL VENTILADOR

La velocitat d'entrada de l'aire ve lligada amb la potència que consumeix el ventilador. El ventilador és l'encarregat de generar aquest flux d'aire que farà possible l'anàlisi tèrmic de les cares del mòdul. Abans de trobar el valor de la potència consumida pel ventilador, s'ha de realitzar el càlcul del cabal d'aire que flueix a l'interior de tub d'acer (Eq. 12):

$$Q = v \cdot S \quad (\text{Eq. 12})$$

El valor Q és el cabal d'aire i s'expressa en m^3/s . Serà constant al llarg de tot el tub d'acer. La velocitat de l'aire dintre el tub és v i s'expressa en m/s . Finalment, la secció del tub (S) és en m^2 . La secció del tub ha estat sempre un valor constant, fruit de l'Equació 13:

$$S = 0,04 \cdot 0,0412 = 1,648 \cdot 10^{-4} (\text{m}^2) \quad (\text{Eq. 13})$$

Al final, l'Equació 14 expressa el valor de la potència elèctrica consumida pel ventilador a causa de l'efecte del dissipador:

$$\text{Potència}_{\text{ventilador}} = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta} \quad (\text{Eq. 14})$$

On $\text{Potència}_{\text{ventilador}}$, s'expressa en watts, i fa referència a la potència consumida pel ventilador degut a l'efecte del dissipador. El terme ΔP , representa la diferència de pressió d'aire que es té a l'entrada i a la sortida del dissipador quan hi ha un flux d'aire i la Q , com s'ha exposat abans, és el cabal que presenta l'aire quan circula a través del tub, expressat en m^3/s . Per acabar, s'ha de dir que els càlculs de potència del ventilador, s'han realitzat considerant un rendiment d'aquest del 60 %. Aquest rendiment s'expressa amb el terme η .

A.3. CÀLCULS RELACIONATS AMB EL BALANÇ NET D'ENERGIA

Una vegada es precisa tant de la potència consumida pel ventilador degut a la influència del dissipador, com de la potència produïda pel mòdul termoelectríc, s'empra l'Equació 15 per

calcular la potència neta adquirida pel dispositiu (en el cas experimental) o pel model (en el cas teòric amb ANSYS):

$$\textit{Potència}_{neta\ adquirida} = \textit{Potència}_{consumida} - \textit{Potència}_{produïda} \quad (\textit{Eq. 15})$$

On la *Potència_{neta adquirida}* ens dictamina si hi ha o no un bon balanç energètic entre ambdues potències, *Potència_{consumida}* el que consumeix el ventilador per l'efecte del dissipador i *Potència_{produïda}* el que genera el mòdul termoelèctric. Totes tres es donen en W.

ANNEX B:

Simulació en

ANSYS

Els dissipadors analitzats s'han fet a partir de l'eina de simulació ANSYS Workbench. En aquest annex s'explica com ha sigut el procés en ANSYS per poder obtenir els resultats numèrics, tant en l'apartat 6 com 8, i les figures de comportament vistes en l'apartat 8.

El producte de l'ANSYS utilitzat ha estat el paquet CFX, on es tracten processos amb fluids, incloent-hi transferència de calor. La simulació amb ANSYS CFX està formada per diferents etapes, tal com es mostra a la *Figura 119*:

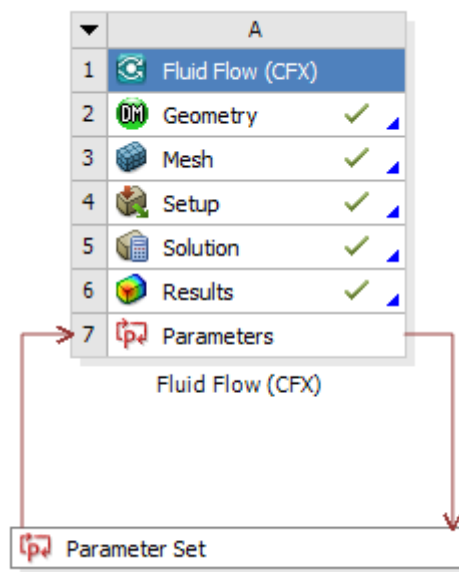


Figura 119: Eines de l'ANSYS

A continuació, s'exposen les diferents etapes segons l'ordre d'execució, a partir d'uns apartats adjuntats en aquest annex.

B.1. GEOMETRIA

La primera etapa que es du a terme és la geometria del model. Aquí s'ha creat les diferents geometries de les parts sòlides com fluids que componen els models que després s'han simulat. Cal dir que el model s'ha partit per la meitat per tal de poder reduir el temps de càlcul (veure *Figura 120*)

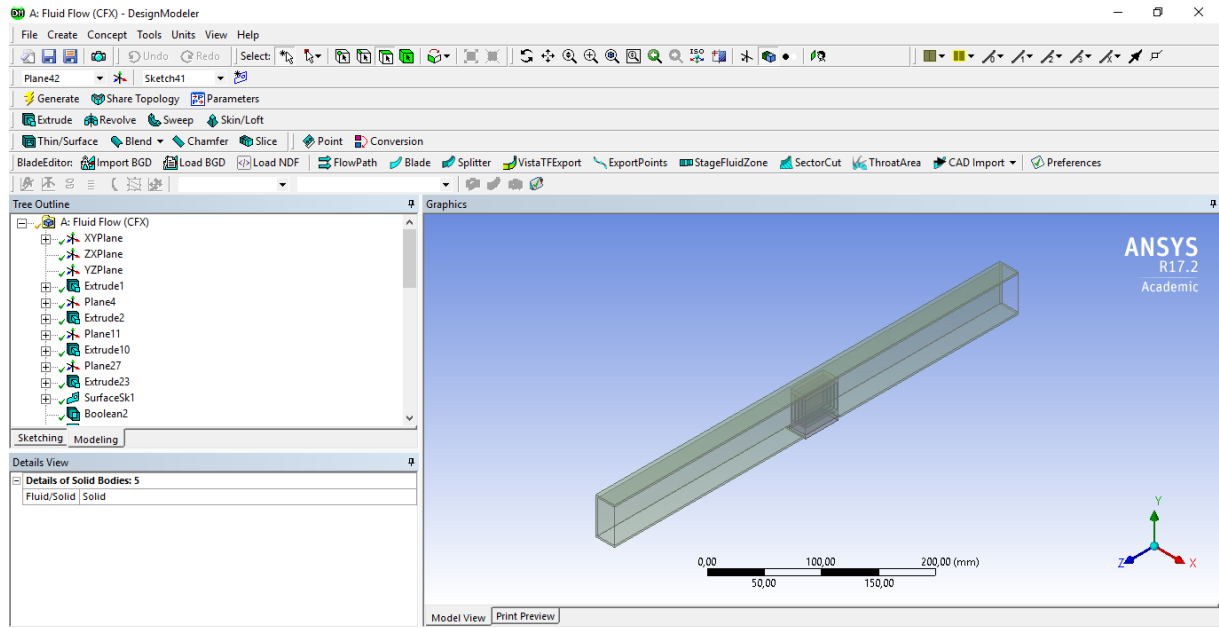


Figura 120: Aspecte de l'eina “Design Modeler” en el CAS 09-10-340

Com ja s'havia comentat en l'apartat 6 del document (*Validació del model*), la geometria del model simulat pel cas del dissipador de 12 aletes real, és l'únic que s'ha realitzat amb SolidWorks i s'ha exportat a l'ANSYS.

B.2. MALLAT

Una vegada s'ha importat o creat la geometria, s'ha realitzat el mallat amb l'eina “Meshing” (veure *Figura 121*):

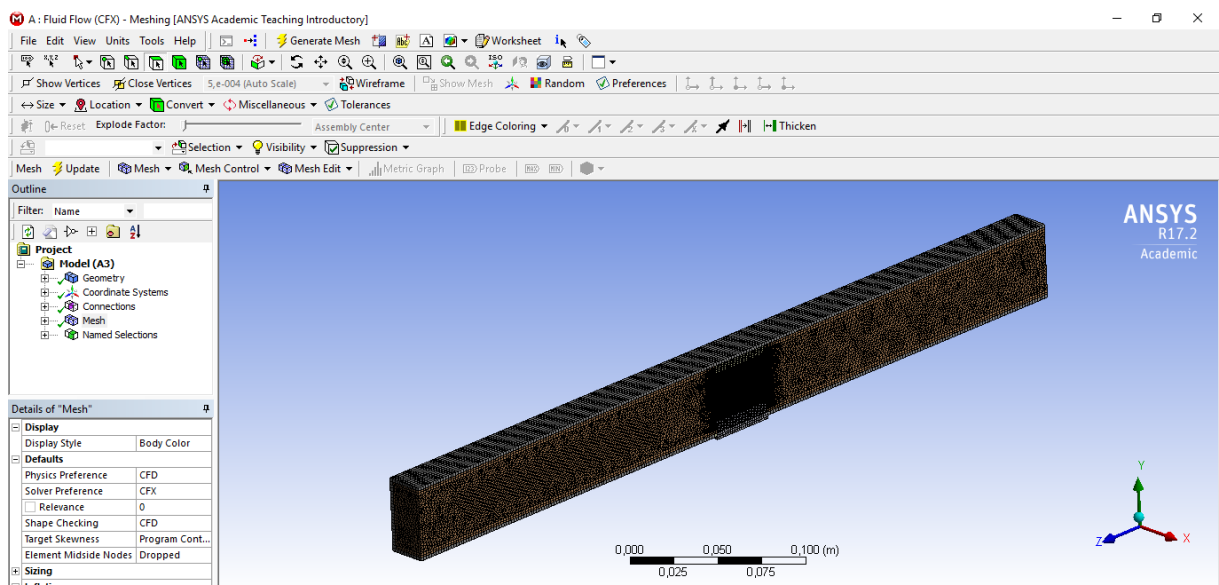


Figura 121: Aspecte de l'eina “Meshing” en el CAS 12-10-260

La creació d'aquesta malla utilitza elements en forma d'hexaedres en les parts sòlides i de forma de tetraedres en l'aire.

Les dimensions de la malla poden originar resultats molt acurats, si es dimensiona amb elements petits, o resultats poc precisos, si es dimensiona amb elements grans.

A continuació a la *Taula 52*, es presenta les característiques de mallat per cada part que compon el model que s'ha simulat en diferents casos amb l'ANSYS:

Taula 52: Característiques del mallat

Part	Nombre d'elements	Mida característica (mm)	Geometria de l'element
Tub d'acer	14.032	2	Hexaedre
Dissipador	17.600	2	Hexaedre
Plaquetes de llautó	4.200	1	Hexaedre
Mòdul termoelèctric	1.134	1,5	Hexaedre
Aire	1.276.934	2	Tetraedre
Volum de control	20	2	Hexaedre

B.3. SETUP

Aquesta ha estat la tercera etapa del procés de simulació. En el "Setup", s'estableix les relacions de contacte entre les conseqüents parts, com les condicions de contorn d'entrada que afectaran el model. En aquest projecte, la velocitat d'entrada de l'aire al tub i la conductivitat tèrmica del mòdul termoelèctric, han sigut les condicions de contorn d'entrada aplicades. Les simulacions s'han realitzat amb diferents velocitats d'entrada però en el cas de la conductivitat tèrmica del mòdul, sempre s'ha deixat un valor constant de $2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ja que a l'hora de simular, és amb el que s'obtenia millors valors. En la *Figura 122*, es pot veure l'eina "SETUP":

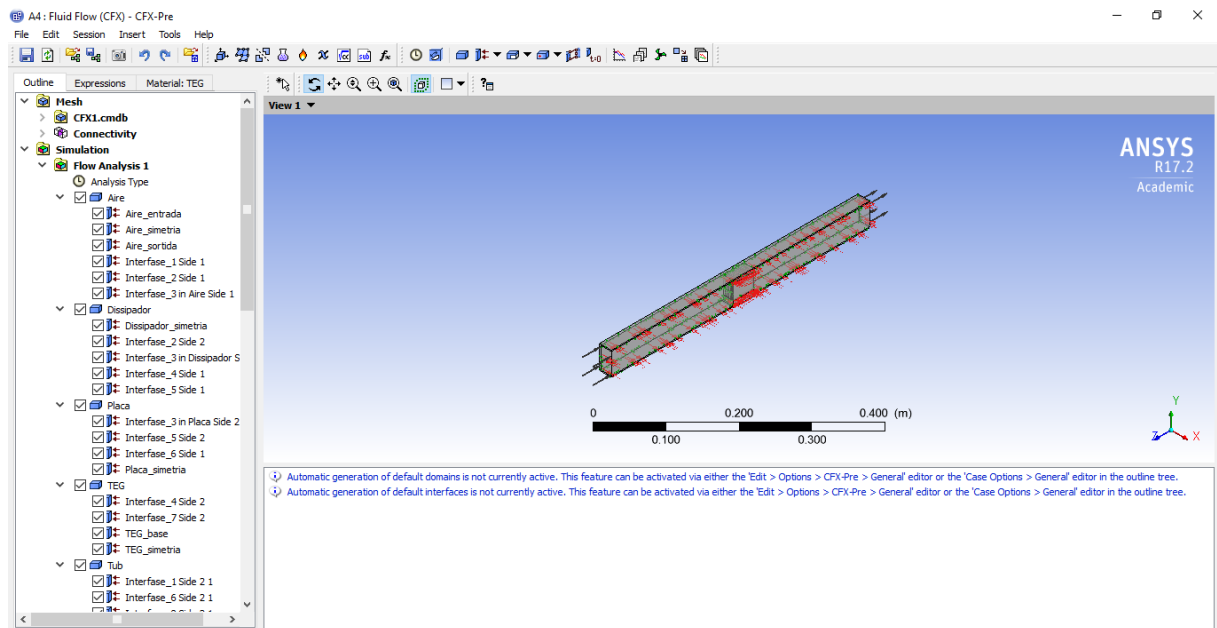


Figura 122: Aspecte de l'eina “CFX-Pre” en el “Setup” el CAS 12-10-260

Llavors, les interferències de contacte que s'han establert són les següents (veure *Figura 123*):

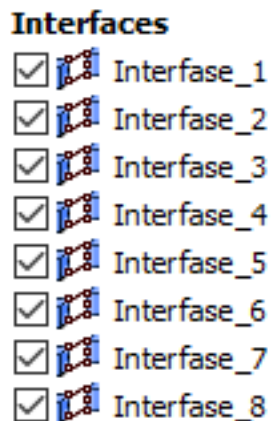


Figura 123: Interfases de contacte aplicades a les simulacions

- **Interfase 1:** relaciona el contacte entre el flux d'aire i les parets interiors del tub d'acer.
- **Interfase 2:** relaciona el contacte entre l'aire i les aletes del dissipador.
- **Interfase 3:** relaciona les cares davantera, posterior i laterals del dissipador i les plaquetes de llautó, amb l'aire circulant.

- **Interfase 4:** relaciona el contacte entre la base del dissipador i la cara freda del mòdul termoelèctric.
- **Interfase 5:** relaciona el contacte entre les cares superiors de les aletes amb la base de les plaquetes de llautó.
- **Interfase 6:** relaciona el contacte entre la cara superior de les plaquetes amb la cara interna superior del tub d'acer.
- **Interfase 7:** relaciona el contacte entre el volum de control i la cara davantera i posterior del mòdul termoelèctric.
- **Interfase 8:** relaciona el contacte entre el volum de control i les parets del forat del tub d'acer amb el qual està en contacte.

A part d'això, cada element presenta unes característiques:

- **Aire:** s'ha considerat que és un gas ideal al qual la seva pressió de referència és d'1 atm. A part s'ha activat l'opció de transferència de calor i s'ha aplicat un model de turbulència K-epsilon estàndard. Presenta una temperatura de 20 °C inicialment.
- **Dissipador:** en l'assaig experimental, el dissipador del qual es disposava, era d'alumini. Per això, aquí també hem fixat que el dissipador és d'alumini. A part, s'ha activat l'opció de transferència de calor.
- **Plaques de llautó:** s'ha fixat que les plaquetes estan fetes de coure amb una transferència de calor activada.
- **Mòdul termoelèctric:** a partir dels assajos que es van realitzar en el laboratori, es van poder trobar, la capacitat de calor específica i la densitat que presenta aquest element. Amb aquestes dades conegudes, s'ha creat un nou material anomenat "TEG" al qual li hem aplicat la capacitat de calor específica ($425 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) que necessita el TEG per augmentar la seva temperatura i la seva densitat ($3280 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). A part, se li ha afegit la condició de conductivitat tèrmica de valor $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.
- **Tub d'acer:** material del qual està fet és d'acer. La temperatura exterior a la qual està sotmès és la temperatura ambient que hi ha en el laboratori, que s'ha considerat que és

de 20 °C. A més, s'ha aplicat un coeficient de transferència de calor de $10 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ per determinar les pèrdues per convecció amb l'exterior del tub.

En el "Setup" es va fixar el valor dels residuals a 10^{-4} i unes iteracions màximes de 300.

B.4. SOLUCIÓ

En aquesta etapa anomenada "Solution" en l'ANSYS, l'ordinador realitza el procés de càlcul per llavors poder obtenir els resultats. Es pot anar observant com es produeix el càlcul en totes les iteracions.

B.5. RESULTATS

És l'última eina que presenta l'ANSYS. A partir de l'etapa "Results", es pot comptar amb les animacions del comportament del fluid (veure *Figura 124*):

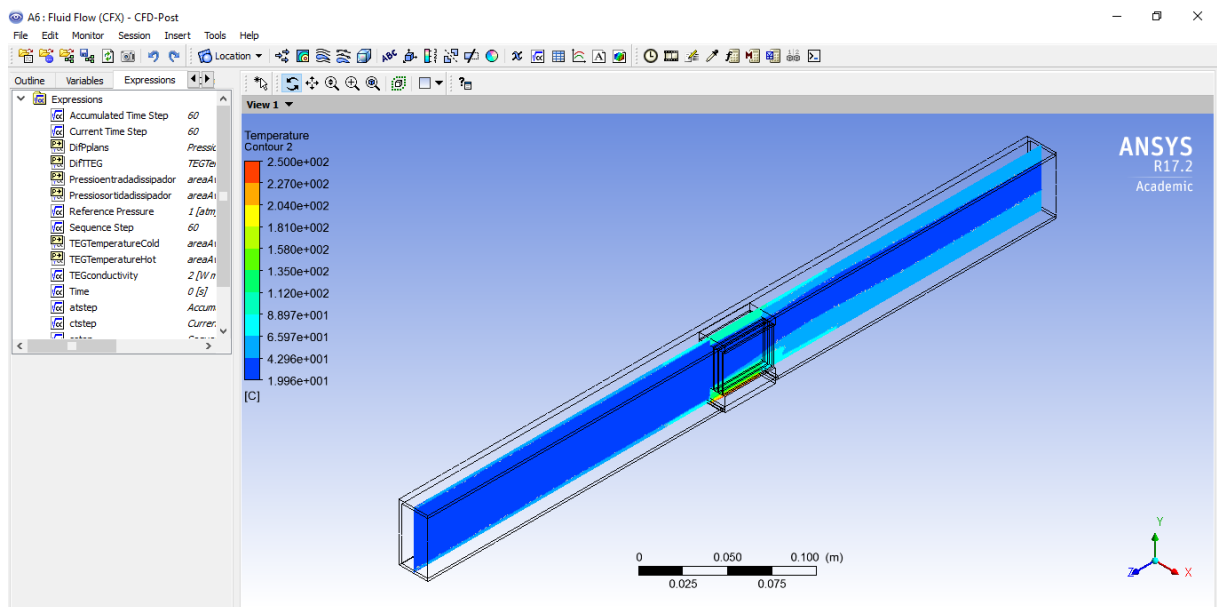


Figura 124: Aspecte de l'eina "CFD-Post" en l'etapa de resultats en el CAS 12-10-260

B.6. PARÀMETRES

Per poder visualitzar els resultats numèrics extrets de les simulacions, es compta amb aquesta etapa on es dóna de manera ordenada (segons com s'ha configurat al llarg del procés de simulació), tant els valors d'entrada que s'havien entrat en l'etapa del "Setup", com els valors de sortida, que són els resultats numèrics que s'han extret de simular el model (veure *Figura 125*):

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - TEGconductivity	P2 - veiriet	P3 - TEGTemperatureCold	P4 - Pressioortidadissipador	P5 - Pressioentradadissipador	P6 - TEGTemperatureHot	P7 - DiffTE
2	Units	W m ⁻¹ K ⁻¹	m s ⁻¹	K	Pa	Pa	K	K
3	DP 0 (Current)	2	2	386,42	-2,2024	9,839	523,15	136,73
4	DP 1	2	1	396,65	-0,48564	2,8804	523,15	126,51
5	DP 2	2	1,5	389,71	-1,1757	5,8998	523,15	133,44
6	DP 3	2	0,5	406,5	-0,10217	0,8805	523,15	116,65
7	DP 4	2	2,5	380,61	-3,5286	14,624	523,15	142,54
8	DP 5	2	3	375,41	-5,1647	20,394	523,15	147,74
9	DP 6	2	3,5	371,13	-7,124	27,023	523,15	152,02
10	DP 7	2	4	367,41	-9,4199	34,553	523,15	155,74
11	DP 8	2	4,5	364,12	-12,053	42,943	523,15	159,03
12	DP 9	2	5	361,28	-15,039	52,204	523,15	161,87
13	*							

Figura 125: Taula de valors d'entrada com de sortida del model