

OPTIMITZACIÓ D'EXTRACCIÓ DE DILUENTS NO REACTIUS EN TINTES / ADHESIUS APLICATS SOBRE SUBSTRATS PER A ENVASOS FLEXIBLES

Josep Ricart Ferrer

Per citar o enllaçar aquest document:
Para citar o enlazar este documento:
Use this url to cite or link to this publication:
<http://hdl.handle.net/10803/672370>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



TESI DOCTORAL

**OPTIMITZACIÓ D'EXTRACCIÓ DE DILUENTS NO
REACTIUS EN TINTES/ADHESIUS APLICATS
SOBRE SUBSTRATS PER A ENVASOS FLEXIBLES**

Josep Ricart Ferrer

2018



TESI DOCTORAL

**OPTIMITZACIÓ D'EXTRACCIÓ DE DILUENTS NO
REACTIUS EN TINTES/ADHESIUS APLICATS
SOBRE SUBSTRATS PER A ENVASOS FLEXIBLES**

Josep Ricart Ferrer

2018

PROGRAMA DE DOCTORAT EN TECNOLOGIA

Dirigida per:

Dr. Josep Ramon González Castro

Dr. Lino Montoro Moreno

Tutors COMEXI:

Sr. Carles Fortià Solé (2014 - 2015) i Sr. Manel Molina Masó (2015 - 2018)

Memòria presentada per optar al títol de doctor per la Universitat de Girona

Als meus pares Francesc i Rosalia,
al meu germà Joaquim,
i a la meva cunyada Sílvia

Agraïments

En primer lloc, voldria agrair als meus tutors de la Universitat de Girona, el Dr. Josep Ramon González Castro i al Dr. Lino Montoro Moreno, pel seu suport, consells, paciència, dedicació i ajuda que m'han dedicat durant el transcurs d'aquests anys; la seva ajuda ha estat indispensable per portar a terme aquest treball amb èxit.

Voldria agrair a la família Xifra, així com als Srs. Miquel Marcó i Jordi Puig per considerar la possibilitat de portar a terme un projecte de Doctorat Industrial a COMEXI, i convertir-ho en una realitat. Vull donar-los les gràcies per haver confiat en mi i donar-me la possibilitat de treballar en aquest projecte apassionant.

Aprecio enormement la dedicació que han tingut cap a mi durant els meus inicis a COMEXI el meu primer tutor, el Sr. Carles Fortià, així com el Sr. Víctor Ortuño, per la seva dedicació i paciència en explicar-me les bases del món de la flexografia així com de la laminació, pels seus consells rebuts durant aquests anys, i per la seva predisposició a ajudar-me i guiar-me en tot moment.

Vull agrair a la multitud de companys de COMEXI que m'han ajudat a créixer professionalment durant aquests anys, i que m'han donat un cop de mà d'una manera o altra en innumerables ocasions ja sigui explicant-me el funcionament de les màquines o bé en la realització d'assaigs experimentals, no m'és possible nombrar-los a tots perquè han estat molts, però no per això la seva ajuda ha estat menys important.

Pel que fa la realització d'experiments a màquines reals, així com per l'experiència i coneixement que m'han aportat, voldria agrair especialment la dedicació del Srs. Joan Dávila, Albert Turon i David Valverde.

Voldria reconèixer l'esforç dels Srs. Pere Roger, Lluís Turon, Xavier Goy i Joaquim Quintana per la seva dedicació i per les seves contribucions, en fer possible la industrialització del nou disseny de pantalla.

Vull donar les gràcies al Sr. Manel Molina per passar a ser el meu segon tutor a COMEXI, per haver estat sempre disposat a dedicar-me part del seu temps i ajudar-me en tot allò que li ha estat possible al llarg d'aquests anys, i guiar-me en el desenvolupament d'aquest projecte.

Agrair també al meu nou cap, el Sr. Jordi Sahun per haver cregut en mi i donar-me la possibilitat de continuar formant part de l'empresa en el departament d'Innovació i Tecnologia una vegada finalitzada la beca de Doctorat Industrial, encetant i liderant una nova branca dedicada a la simulació amb l'objectiu de donar servei a les diferents línies de producte de l'empresa.

Vull agrair enormement als meus pares Francesc i Rosalia, al meu germà Joaquim i a la meva cunyada Sílvia pel suport i els ànims que m'han donat en tot moment, en els bons i mals moments, sense l'ajuda dels quals no m'hauria estat possible arribar fins aquí. Moltíssimes gràcies.

L'autor també agraeix de manera molt especial el suport proporcionat per la Generalitat de Catalunya (Departament d'Economia i Coneixement, Secretaria d'Universitats i Recerca, AGAUR) per el Projecte de Doctorat Industrial amb expedient 2013 DI 017 (Pla de Doctorats Industrials).



El Dr. Josep Ramon González Castro i el Dr. Lino Montoro Moreno de la Universitat de Girona,

DECLAREM:

Que el treball titulat “Optimització d’extracció de diluents no reactius en tintes/adhesius aplicats sobre substrats per a envasos flexibles” que presenta Josep Ricart Ferrer per a l’obtenció del títol de doctor, ha estat realitzat sota la nostra direcció.

I, perquè així consti i tingui els efectes oportuns, signem aquest document.

Dr. Josep Ramon González Castro

Dr. Lino Montoro Moreno

Girona, Juny de 2018

Nomenclatura

α	angle de la paret lateral del caixó d'impulsió amb un pla vertical [°]
β	angle de la paret superior del caixó d'impulsió amb un pla horitzontal [°]
δt	espai temporal entre iteracions consecutives [s]
δx	dimensió de la cel·la en la direcció de la velocitat [m]
η	longitud d'escala de Kolmogorov [m]
μ	viscositat dinàmica [Pa · s]
ν	viscositat cinemàtica [m^2/s]
ω	dissipació específica de turbulència [s^{-1}]
ρ	densitat [kg/m^3]
τ_w	esforç tallant a la paret [N/m^2]
\emptyset	diàmetre [m]
ε	taxa de dissipació d'energia turbulenta [m^2/s^3]
A_0	àrea visible [m^2]
$A_{bufador}$	secció del bufador [m^2]
$A_{material}$	secció del material [m^2]
A_s	àrea efectiva [m^2]
c_p	calor específic [J/kgK]
$C_{tt.assecatge}$	constant del sistema d'assecatge [Ws^2/m^2]
Co	nombre de Courant
d_{\perp}	distància perpendicular a la paret [adim.]
D_{AB}	difusivitat [m^2/s]

H_{fg}	entalpia d'evaporació [J/mol]
H_r	humitat relativa [percentatge]
k	energia cinètica turbulenta [m^2/s^2]
$M_{solvent}$	massa de solvent evaporat [g/m^2]
Nu	nombre de Nusselt
P_A	pressió parcial de vapor del solvent contingut en l'aire utilitzat per a assecar [Pa]
P_S	pressió de vapor de saturació del solvent pur [Pa]
Pr	nombre de Prandtl
$Q_{aspiració}$	cabal d'aspiració de la pantalla [m ³ /h]
$q_{bufador}$	densitat de calor del bufador [J/m^2]
Q_{fals}	cabal d'aire fals que aspira la pantalla [m ³ /h]
$Q_{impulsió}$	cabal d'impulsió de la pantalla [m ³ /h]
$q_{material}$	densitat de calor del material [J/m^2]
R_{sj}	relació de velocitats entre $V_{material}$ i V_{jet} [adim.]
t_η	escala temporal de Kolmogorov [s]
T_{in}	temperatura del bufador [K]
T_w	temperatura de la superfície d'impacte [K]
U	velocitat del fluid [m/s]
u^+	velocitat adimensional [adim.]
u_τ	velocitat de fricció [m/s]
V_{jet}	velocitat de sortida de l'aire del bufador [m/s]
$V_{material}$	velocitat d'impressió [m/s]
V_{norm}	velocitat normalitzada [adim.]
$W_{bufador}$	amplada del bufador [m]
$W_{material}$	amplada del material [m]

x_k	gruix equivalent del contingut en sòlids [m]
x_s	gruix equivalent del contingut de solvent [m]
y^+	distància adimensional respecte de la paret [adim.]
y_{adim}	distància adimensional entre el bufador i la superfície d'impacte [adim.]
A	separació entre el llavi de la pantalla i el tambor del cos impressor [m]
B	separació entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor del cos impressor [m]
Bi	nombre de Biot [adim.]
CFD	Dinàmica de Fluids Computacional
COV	Compost Orgànic Volàtil
Fo	nombre de Fourier [adim.]
H	separació entre el bufador i la superfície d'impacte [m]
h	coeficient de transferència de calor per convecció [W/m^2K]
I	intensitat de turbulència [percentatge]
k	conductivitat tèrmica del fluid [W/mK]
L	separació entre bufadors [m]
l	longitud d'escala [m]
LB	abreviatura Lam-Bremhorst
Le	nombre de Lewis [adim.]
LEL	límit inferior d'explosibilitat
LS	abreviatura Launder-Sharma
M	massa molecular [g/mol]
R	constant dels gasos ideals [$atmdm^3/molK$]
Re	nombre de Reynolds [adim.]
RTO	Oxidador Tèrmic Regeneratiu
UEL	límit superior d'explosibilitat
W	amplada del llavi en forma de ranura [m]

Índex de figures

1.1. Vista aèria de la nau de muntatge i oficines en primer pla; més al fons de la imatge, la nau de mecanització [59]	16
1.2. Sr. Xifra i Sra. a la inauguració de les instal·lacions de Riudellots de la Selva [59]	16
1.3. Impressora flexogràfica F2MC [59]	18
1.4. Laminadora ML1 [59]	18
1.5. Talladora S2DT [59]	19
1.6. Impressora òfset CI8 [59]	19
1.7. Impressora R2 [59]	20
1.8. Comexi cloud [59]	20
2.1. Mostres d'embalatge flexible [63]	21
2.2. Exemple de l'efecte de superposició dels quatre colors d'una quadricromia [60]	23
2.3. Mostrari de colors de l'empresa Pantone [61]	24
2.4. Elements o seccions bàsiques d'una impressora flexogràfica [64]	27
2.5. Esquema del control de temperatura del tambor central [64]	29
2.6. Revestiment Hastalloy del tambor central [64]	29
2.7. Diferents densitats d'alvèols per centímetre lineal en un anilox, i volum dels alvèols per centímetre quadrat [63]	31
2.8. Elements d'un grup impressor flexogràfic [62]	31
2.9. Elements del circuit d'assecatge entre tinters (màquina de 8 colors) [64]	33
2.10. Esquema del recorregut de l'aire en l'assecatge entre tinters [64]	34
2.11. Pantalla d'assecatge entre tinters [64]	35
2.12. Elements del circuit d'assecatge del túnel [64]	36
2.13. Esquema del recorregut de l'aire en l'assecatge en el túnel [64]	36
2.14. Vista interna de les pantalles del túnel, i els corròns que guien el material [64]	37
2.15. Corròns guia (ranurat en forma d'hèlix i anivellament) [64]	38
2.16. Punts de control de tensió (pisor i calandra refrescadora) [64]	39
3.1. Rang d'explosibilitat d'una substància inflamable [20]	42
3.2. Gràfic de l'efecte de la temperatura en el límit inferior d'explosibilitat per a l'Acetona. Dades experimentals obtingudes a partir de [25]. Com a valor teòric a 20°C, en aquesta mateixa referència bibliogràfica, s'ha pres el valor de 2.6%	45

3.3.	Concentració màxima admissible de substàncies inflamables, i intervals de funcionament admissible per a assecadors de concentració limitada (assecadors de tipus A)	49
3.4.	Sensor de <i>LEL</i> catalític [26]	51
3.5.	Sensor de <i>LEL</i> per infraroig [54]	52
3.6.	Ubicació dels sensor de <i>LEL</i> per una màquina amb 4 ventiladors . . .	53
3.7.	Ubicació dels sensor de <i>LEL</i> per una màquina amb 3 ventiladors . . .	54
3.8.	Configuració dels diversos apartats que configuren un treball (es mostra la imatge per 10 tinters, però es pot escollir entre 8 i 10)	60
3.9.	Exemple de paràmetres de l'assecatge entre tinters, màquina 4 ventiladors	62
3.10.	Exemple de paràmetres de l'assecatge al túnel, màquina 4 ventiladors	62
3.11.	Exemple de paràmetres de l'assecatge a tinters i al túnel, màquina 3 ventiladors, amb recirculació a tinters	63
3.12.	Exemple de paràmetres de l'assecatge a tinters i al túnel, màquina 3 ventiladors, sense recirculació a tinters	64
3.13.	Nivell de <i>LEL</i> teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 188 <i>m/min</i> i una recirculació del 40%	67
3.14.	Nivell de <i>LEL</i> teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 222 <i>m/min</i> i una recirculació del 0%	68
3.15.	Nivell de <i>LEL</i> teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 222 <i>m/min</i> i una recirculació del 31%	69
3.16.	Nivell de <i>LEL</i> teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 222 <i>m/min</i> i una recirculació del 40%	70
3.17.	Nivell de <i>LEL</i> teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 222 <i>m/min</i> i una recirculació del 50%	71
3.18.	Nivell de <i>LEL</i> teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 266 <i>m/min</i> i una recirculació del 40%	72
3.19.	Nivell de <i>LEL</i> teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 288 <i>m/min</i> i una recirculació del 40%	73
3.20.	Mostra impresa del treball núm. 1	74
3.21.	Nivell de <i>LEL</i> teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 38°C, per una velocitat de 250 <i>m/min</i> i una recirculació del 40%	76
3.22.	Nivell de <i>LEL</i> teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 333 <i>m/min</i> i una recirculació del 40%	77
3.23.	Mostra impresa del treball núm. 2	78
3.24.	Mostra impresa del treball núm. 2	78
3.25.	Nivell de <i>LEL</i> teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 122 <i>m/min</i> i una recirculació del 33%	80
3.26.	Nivell de <i>LEL</i> teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 122 <i>m/min</i> i una recirculació del 41%	81
3.27.	Mostra impresa del treball núm. 3	82
3.28.	Nivell de <i>LEL</i> teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 88 <i>m/min</i> i una recirculació del 40%	84

3.29. Nivell de <i>LEL</i> teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 200m/min i una recirculació del 40%	85
3.30. Mostra impresa del treball núm. 4	86
3.31. Estimació del nivell de <i>LEL</i> a l'aspiració del sistema d'assecatge en funció de la recirculació, per diverses velocitats d'impressió (recirculació variable del 0% al 50%)	88
3.32. Limitació de la velocitat d'impressió per a diverses recirculacions i un nivell màxim de <i>LEL</i> igual al 13%	89
3.33. Variació del nivell de <i>LEL</i> per a diverses recirculacions, en funció de la velocitat d'impressió	90
3.34. Variació del nivell de <i>LEL</i> per a diverses recirculacions, a una velocitat de 222m/min.	90
3.35. Variació del nivell de <i>LEL</i> per diversos balanços de la pantalla (del 20% al 83%) i per diverses recirculacions (a=0%, b=10%, c=20%, d=30%, e=40%, f=50%)	91
3.36. Variació del nivell de <i>LEL</i> per a un balanç del 83% i una recirculació del 40%, tot variant la temperatura d'assecatge a 50°C, 70°C i 90°C .	92
3.37. Esquema de funcionament d'un <i>RTO</i> [29]	93
4.1. Etapes per a la resolució d'un cas mitjançant CFD [37]	100
4.2. Estructura bàsica per a la resolució d'un cas [37]	102
5.1. Representació esquemàtica de la distribució de velocitats en les zones d'impulsió (esquerre) i aspiració de les pantalles (dreta)	107
5.2. Representació esquemàtica del desequilibri entre les velocitats d'impulsió i aspiració de les pantalles	107
5.3. Ubicació de les pantalles d'assecatge al voltant del tambor central d'una impressora flexogràfica de 8 colors	108
5.4. Diagrama de blocs del procés seguit per a la millora del comportament de la pantalla d'assecatge entre tinters	111
5.5. Punt de mesura experimental de la velocitat en el llavi de la pantalla	114
5.6. Muntatge experimental, i posició dels punts de mesura, per a la caracterització de velocitats en el llavi de la pantalla	114
5.7. Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsíó d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M1")	115
5.8. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M1", amplada 850mm, $\bar{v} = 33,5m/s$	116
5.9. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M1", amplada 850mm, $\bar{v} = 39,7m/s$	117
5.10. Espejament de la part corresponent a la zona impulsíó d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M2")	118
5.11. Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsíó d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M2")	119

5.12. Espejament de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M3")	120
5.13. Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M3")	121
5.14. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M3", amplada 1250mm, $\bar{v} = 43,8m/s$	122
5.15. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M3", amplada 1250mm, $\bar{v} = 50,3m/s$	123
5.16. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M3", amplada 1250mm, $\bar{v} = 58,5m/s$	123
5.17. Espejament de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M4")	124
5.18. Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M4")	125
5.19. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M4", amplada 1250mm, $\bar{v} = 40,7m/s$	126
5.20. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M4", amplada 1250mm, $\bar{v} = 51m/s$	127
5.21. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla "M4", amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	128
5.22. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla "M4" (primera meitat), amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	129
5.23. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla "M4" (segona meitat), amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	129
5.24. Distribució de velocitats al llarg del llavi de la pantalla "M4", amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ i $\bar{v} = 50m/s$ (simulació OpenFOAM)	130
5.25. Distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius, representat a diversos trams de la pantalla "M4", amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	130
5.26. Distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius, representat a diversos trams de la pantalla "M4", amplada 1250mm, $\bar{v} = 50m/s$ (simulació OpenFOAM)	131
5.27. Contorn de pressions a un tall central longitudinal de la pantalla "M4", amplada 1250mm, unitats en m^2/s^2 (simulació OpenFOAM)	131
5.28. Pressió estàtica al centre del conducte d'impulsió de la pantalla "M4", amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	132
5.29. Espejament de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M4" - 2 llavis)	133
5.30. Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M4" - 2 llavis)	134
5.31. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M4" 2 llavis, amplada 1250mm	135

5.32. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M4” 2 llavis, amplada 1250mm, $\bar{v} = 15m/s$ (simulació OpenFOAM)	135
5.33. Distribució de velocitats al llarg del llavi de la pantalla “M4” 2 llavis, amplada 1250mm, $\bar{v} = 15m/s$ (simulació OpenFOAM)	136
5.34. Contorn de pressions a un tall central longitudinal de la pantalla “M4” 2 llavis, amplada 1250mm, unitats en m^2/s^2 (simulació OpenFOAM)	136
5.35. Pressió estàtica al centre del conducte d’impulsió de la pantalla “M4” 2 llavis, amplada 1250mm, $\bar{v} = 15m/s$ (simulació OpenFOAM)	137
5.36. Especejament de la part corresponent a la zona impulsíó d’una pantalla d’assecatge entre tinters (“M5”)	139
5.37. Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsíó d’una pantalla d’assecatge entre tinters (“M5”)	140
5.38. Especejament de la part corresponent a la zona impulsíó d’una pantalla d’assecatge entre tinters (“M6”)	141
5.39. Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d’impulsió d’una pantalla d’assecatge entre tinters (“M6”)	142
5.40. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M6”, amplada 1200mm, $\bar{v} = 41,7m/s$	143
5.41. Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M6”, amplada 1200mm, $\bar{v} = 51,9m/s$	144
5.42. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M6”, amplada 1200mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	145
5.43. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M6” (primera meitat), amplada 1200mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	145
5.44. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M6” (segona meitat), amplada 1200mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	146
5.45. Distribució de velocitats al llarg del llavi de la pantalla “M6”, amplada 1200mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	146
5.46. Distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius, representat a diversos trams de la pantalla “M6”, amplada 1200mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	147
5.47. Contorn de pressions a un tall central longitudinal de la pantalla “M6”, amplada 1200mm, unitats en m^2/s^2 (simulació OpenFOAM)	147
5.48. Pressió estàtica al centre del conducte d’impulsió de la pantalla “M6”, amplada 1200mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	148
5.49. Contorn de velocitat i de pressions, amplada “c mm”, sense deflectors, a un tall longitudinal efectuat a la part central de la pantalla per diversos diàmetres d’entrada: a) “ $\emptyset_1 mm$ ”, b) “ $\emptyset_3 mm$ ”, c) “ $\emptyset_4 mm$ ”, d) “ $\emptyset_5 mm$ ”, e) “ $\emptyset_6 mm$ ”, f) “ $\emptyset_2 mm$ ” (simulació OpenFOAM)	152
5.50. Distribució de velocitats al llarg del llavi, amplada “c mm”, variant el diàmetre d’entrada i mantenint les dimensions del caixó d’impulsió originals (simulació OpenFOAM)	153

5.51. Distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, amplada " <i>c mm</i> ", variant el diàmetre d'entrada i mantenint les dimensions del caixó d'impulsió originals (simulació OpenFOAM)	154
5.52. Contorn de velocitat i de pressions, amplada " <i>c mm</i> ", sense deflectors, a un tall longitudinal efectuat a la part central de la pantalla per diverses dimensions del conducte d'impulsió: a) " $\varnothing_3 mm$ " i caixó de " <i>W_{3 mm}</i> " x " <i>H_{3 mm}</i> ", b) " $\varnothing_4 mm$ " i caixó de " <i>W_{4 mm}</i> " x " <i>H_{4 mm}</i> ", c) " $\varnothing_5 mm$ " i caixó de " <i>W_{5 mm}</i> " x " <i>H_{5 mm}</i> ", d) " $\varnothing_6 mm$ " i caixó de " <i>W_{6 mm}</i> " x " <i>H_{6 mm}</i> " (simulació OpenFOAM)	156
5.53. Distribució de velocitats al llarg del llavi, amplada " <i>c mm</i> ", variant les dimensions del conducte d'impulsió (simulació OpenFOAM)	156
5.54. Distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, amplada " <i>c mm</i> ", variant les dimensions del conducte d'impulsió (simulació OpenFOAM)	157
5.55. Definició gràfica dels paràmetres que s'han variat per a la optimització del caixó d'impulsió de la pantalla	159
5.56. Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " <i>j mm</i> ". a) alçada " <i>j mm</i> ", b) alçada " <i>k mm</i> ", c) alçada " <i>f mm</i> ", d) alçada " <i>g mm</i> ", e) alçada " <i>l mm</i> "	161
5.57. Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " <i>j mm</i> ". a) alçada " <i>j mm</i> ", b) alçada " <i>k mm</i> ", c) alçada " <i>f mm</i> ", d) alçada " <i>g mm</i> ", e) alçada " <i>l mm</i> "	162
5.58. Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " <i>k mm</i> ". a) alçada " <i>j mm</i> ", b) alçada " <i>k mm</i> ", c) alçada " <i>f mm</i> ", d) alçada " <i>g mm</i> ", e) alçada " <i>l mm</i> "	164
5.59. Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " <i>k mm</i> ". a) alçada " <i>j mm</i> ", b) alçada " <i>k mm</i> ", c) alçada " <i>f mm</i> ", d) alçada " <i>g mm</i> ", e) alçada " <i>l mm</i> "	165
5.60. Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " <i>f mm</i> ". a) alçada " <i>j mm</i> ", b) alçada " <i>k mm</i> ", c) alçada " <i>f mm</i> ", d) alçada " <i>g mm</i> ", e) alçada " <i>l mm</i> "	167
5.61. Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " <i>f mm</i> ". a) alçada " <i>j mm</i> ", b) alçada " <i>k mm</i> ", c) alçada " <i>f mm</i> ", d) alçada " <i>g mm</i> ", e) alçada " <i>l mm</i> "	168
5.62. Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " <i>g mm</i> ". a) alçada " <i>j mm</i> ", b) alçada " <i>k mm</i> ", c) alçada " <i>f mm</i> ", d) alçada " <i>g mm</i> ", e) alçada " <i>l mm</i> "	170

5.63. Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $g mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "	171
5.64. Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $l mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "	173
5.65. Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $l mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "	174
5.66. Representació tridimensional de la desviació estàndard $StDev$ de la velocitat obtinguda a la sortida del llavi de la pantalla, en funció de l'amplada W i l'alçada H del conducte d'impulsió de la pantalla, tot mantenint constant el diàmetre del conducte d'impulsió, a " $\varnothing_1 mm$ ", així com el seu posicionament respecte del llavi	175
5.67. Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 1$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	177
5.68. Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 1$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	178
5.69. Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 0,5$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	180
5.70. Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 0,5$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	181
5.71. Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 0$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	183
5.72. Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 0$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	184

5.73. Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = -0,5$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	186
5.74. Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = -0,5$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	187
5.75. Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = -1$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	189
5.76. Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = -1$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$	190
5.77. Representació tridimensional de la desviació estàndard $StDev$ de la velocitat obtinguda a la sortida del llavi de la pantalla, en funció dels angles α i β de les parets que configuren el caixó d'impulsió, tot mantenint constant el diàmetre del conducte d'impulsió a " $\varnothing_1 mm$ " i l'amplada inicial i alçada inicial del caixó en W_b i H_b respectivament	191
5.78. Imatge tridimensional de la part corresponent a la impulsió de la pantalla formada per el caixó d'impulsió, llavi i defectors, segons els resultats obtinguts de l'estudi paramètric (prototip núm. 1)	192
5.79. Distribució de velocitats al llavi de la pantalla per una amplada de " $i mm$ ", i una velocitat al llavi de $50m/s$. a) pantalla actual tipus "M4", b) nou disseny proposat, versió 1, corresponent al disseny de la fig. 5.78	193
5.80. Pressió estàtica al centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per una amplada de " $i mm$ ", i una velocitat al llavi de $50m/s$. a) pantalla actual tipus "M4", b) nou disseny proposat, versió 1, corresponent al disseny de la fig. 5.78	193
5.81. Ubicació del caixó d'impulsió dintre del conjunt de la pantalla d'assecatge. a) disseny original obtingut a partir de l'estudi paramètric, b) disseny simplificat per facilitar que l'aspiració disposi de més espai	194
5.82. Imatges del model real assajat, amb la simplificació feta segons s'ha dit a la fig. 5.81	195
5.83. Velocitat experimental mesurada en el llavi per a la pantalla "M4" $\bar{v} = 42,6m/s$ i per el primer prototip $\bar{v} = 42,4m/s$	195
5.84. Velocitat experimental mesurada en el llavi per a la pantalla "M4" $\bar{v} = 51,2m/s$ i per el primer prototip $\bar{v} = 48,1m/s$	196
5.85. Velocitat al llavi de la pantalla amb el disseny real de la fig. 5.82, valors experimentals i simulats	196

5.86. Dispositiu experimental per a la mesura de temperatures en el llavi, per a la pantalla “M4”	198
5.87. Dispositiu experimental per a la mesura de temperatures en el llavi, per al prototip 1	198
5.88. Mesura de temperatura en temps real, durant 100 segons, en 16 punts del llavi de la pantalla; a l’esquerra per a la pantalla “M4”, i a la dreta per el primer prototip	199
5.89. Temperatura mitjana en cadascun dels 16 punts del llavi de la pantalla en els quals s’ha mesurat la temperatura en temps real; a l’esquerra per a la pantalla “M4”, i a la dreta per el primer prototip	199
5.90. Disseny preliminar per al prototip 2. Doble cambra amb N_1 orificis a la cambra interna, i sense tubs guia. a) representació tridimensional, b) contorn de velocitats per a un tall longitudinal, i distribució de velocitat al llavi, c) contorn de pressió per a un tall longitudinal, i distribució de pressió estàtica en l’espai comprès entre el llavi i la primera cambra d’impulsió	203
5.91. Disseny preliminar per al prototip 2. Doble cambra amb “ N_1 ” orificis a la cambra interna, i amb tubs guia ubicats als “ N_2 ” primers orificis. a) representació tridimensional, b) contorn de velocitats per a un tall longitudinal, i distribució de velocitat al llavi, c) contorn de pressió per a un tall longitudinal, i distribució de pressió estàtica en l’espai comprès entre el llavi i la primera cambra d’impulsió	204
5.92. Disseny preliminar per al prototip 2. Doble cambra amb “ N_1 ” orificis a la cambra interna, i amb tubs guia ubicats als “ N_2 ” primers orificis. a) representació tridimensional, b) contorn de velocitats per a un tall longitudinal, i distribució de velocitat al llavi, c) contorn de pressió per a un tall longitudinal, i distribució de pressió estàtica en l’espai comprès entre el llavi i la primera cambra d’impulsió	206
5.93. Disseny preliminar per al prototip 2. Doble cambra amb “ N_3 ” orificis a la cambra interna, i amb tubs guia ubicats als “ N_4 ” primers orificis. a) representació tridimensional, b) contorn de velocitats per a un tall longitudinal, i distribució de velocitat al llavi, c) contorn de pressió per a un tall longitudinal, i distribució de pressió estàtica en l’espai comprès entre el llavi i la primera cambra d’impulsió	207
5.94. Disseny preliminar per al prototip 2. Doble cambra amb “ N_3 ” orificis a la cambra interna, i amb tubs guia situats a tots els orificis. a) representació tridimensional, b) contorn de velocitats per a un tall longitudinal, i distribució de velocitat al llavi, c) contorn de pressió per a un tall longitudinal, i distribució de pressió estàtica en l’espai comprès entre el llavi i la primera cambra d’impulsió	208
5.95. Imatge tridimensional de la part corresponent a la impulsió de la pantalla formada per dues cambres; la cambra interior amb els orificis i amb els tubs guia que actua com a pulmó interior i el caixó exterior (prototip número 2)	209

5.96. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla prototip 2, amplada “1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	210
5.97. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla prototip 2 (primera meitat), amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	211
5.98. Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla prototip 2 (segona meitat), amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	211
5.99. Línies de corrent per a la pantalla prototip 2, amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)	212
5.100.Velocitat experimental mesurada en el llavi per a la pantalla “M4” $\bar{v} = 40,7m/s$, $StDev = 0,67$ (esquerra) i per el segon prototip $\bar{v} = 40,3m/s$, $StDev = 0,27$ (dreta)	213
5.101.Velocitat experimental mesurada en el llavi per a la pantalla “M4” $\bar{v} = 51,0m/s$, $StDev = 0,53$ (esquerra) i per el segon prototip $\bar{v} = 49,9m/s$, $StDev = 0,19$ (dreta)	213
5.102.Velocitat experimental mesurada en el llavi per el segon prototip $\bar{v} = 30,4m/s$, $StDev = 0,16$ (esquerra) i $\bar{v} = 60,6m/s$, $StDev = 0,28$ (dreta)	213
5.103.Mesura de temperatura en temps real, durant 100 segons, en 16 punts del llavi de la pantalla; a l’esquerra per a la pantalla “M4”, i a la dreta per el segon prototip, per una velocitat al llavi de 40m/s	214
5.104.Mesura de temperatura en temps real, durant 100 segons, en 16 punts del llavi de la pantalla per el segon prototip, per una velocitat al llavi de 50m/s	215
5.105.Temperatura mitjana en cadascun dels 16 punts del llavi de la pantalla en els quals s’ha fet la temperatura en temps real; a l’esquerra per a la pantalla “M4”, i a la dreta per el segon prototip, per una velocitat al llavi de 40m/s	215
5.106.Temperatura mitjana en cadascun dels 16 punts del llavi de la pantalla en els quals s’ha fet la mesura de temperatura en temps real per el segon prototip, per una velocitat al llavi de 50m/s	215
5.107.Representació esquemàtica del recorregut de l’aire en una pantalla d’assecatge entre tinters (impulsió i aspiració). a) pantalles tipus “M2”, “M3”, “M5”, “M6”, b) pantalla tipus “M4”	218
5.108.Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d’aspiració d’una pantalla d’assecatge entre tinters (“M2”)	219
5.109.Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d’aspiració d’una pantalla d’assecatge entre tinters (“M3”)	220
5.110.Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d’aspiració d’una pantalla d’assecatge entre tinters (“M4”)	221
5.111.Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d’aspiració d’una pantalla d’assecatge entre tinters (“M5”)	222

5.112	Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d'aspiració d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M6")	223
5.113	Modelat tridimensional d'una pantalla "M4" simètrica i completa, d'amplada 1250mm	224
5.114	Vista en alçat de la pantalla "M4" simètrica	224
5.115	Vista de perfil de la pantalla "M4" simètrica	225
5.116	Talls en les tres direccions dels eixos de coordenades, per visualitzar el comportament del fluid en una pantalla simètrica tipus "M4" (balanç 50%)	226
5.117	Talls en les tres direccions dels eixos de coordenades, per visualitzar la pressió que experimenta el fluid en una pantalla simètrica tipus "M4" (balanç 50%)	227
5.118	Visualització del contorn de velocitats a un pla horitzontal, paral·lel a la base del llavi d'alumini de la pantalla, segons la línia de color blau de la figura (balanç 50%)	227
5.119	Velocitat de l'aire a l'espai comprès entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor, corresponent al punt blau marcat a la figura (diversos balanços). Separació entre llavi i tambor de " <i>b mm</i> " i entre obturador longitudinal i tambor de " <i>e mm</i> "	228
5.120	Dispositiu experimental per a la determinació del balanç de la pantalla (vista general)	230
5.121	Dispositiu experimental per a la determinació del balanç de la pantalla (detall de les zones més extremes de la pantalla)	230
5.122	Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " <i>b mm</i> "; separació tambor - obturador, " <i>e mm</i> " (pantalla "M4")	231
5.123	Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " <i>b mm</i> "; separació tambor - obturador, " <i>u mm</i> " (pantalla "M4")	231
5.124	Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " <i>b mm</i> "; separació tambor - obturador, " <i>o mm</i> " (pantalla "M4")	232
5.125	Llavi pantalla "M4"	234
5.126	Vista tridimensional del model assajat	235
5.127	Mostra dels vectors de velocitat en un tall transversal de la pantalla, on es pot visualitzar el recorregut de l'aire dintre les diverses cambres de la pantalla	235
5.128	Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)	236
5.129	Vista tridimensional del model assajat	237

5.130	Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)	238
5.131	Vista tridimensional del model assajat	239
5.132	Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)	240
5.133	Vista tridimensional del model assajat	241
5.134	Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)	242
5.135	Llavi pantalla "M4"	243
5.136	Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)	243
5.137	Representació esquemàtica del recorregut de l'aire en una pantalla d'assecatge entre tinters (impulsió i aspiració) per el nou prototip . .	245
5.138	Modelat tridimensional de la pantalla simètrica d'assecatge entre tinters (geometria prototip impulsió - aspiració).	247
5.139	Contorn de velocitats en un pla horitzontal de la pantalla, en l'espai que queda entre el tambor i el llavi (balanç 30%)	247
5.140	Línies de corrent de la geometria analitzada, vista lateral i vista inferior (balanç 30%)	248
5.141	Línies de corrent de la geometria analitzada, circulació de l'aire al sortir del llavi i impactar contra el tambor (balanç 30%)	249
5.142	Velocitat de l'aire a l'espai comprès entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor. Separació entre llavi i tambor de " <i>b mm</i> " i entre obturador longitudinal i tambor de " <i>e mm</i> "	250
5.143	Modelat tridimensional de la pantalla simètrica d'assecatge entre tinters (geometria prototip impulsió - aspiració, possible proposta de millora)	250
5.144	Contorn de velocitats en un pla horitzontal de la pantalla, en l'espai que queda entre el tambor i el llavi (balanç 30%)	251
5.145	Línies de corrent de la geometria analitzada, vista lateral (balanç 30%)	251
5.146	Línies de corrent de la geometria analitzada, vista inferior (balanç 30%)	252
5.147	Línies de corrent de la geometria analitzada, circulació de l'aire al sortir del llavi i impactar contra el tambor (balanç 30%)	252
5.148	Velocitat de l'aire a l'espai comprès entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor. Separació entre llavi i tambor de " <i>b mm</i> " i entre obturador longitudinal i tambor de " <i>e mm</i> "	253
5.149	Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " <i>b mm</i> "; separació tambor - obturador, " <i>e mm</i> " (pantalla prototip impulsió més aspiració)	254

5.150	Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " $b mm$ "; separació tambor - obturador, " $u mm$ " (pantalla prototip impulsió més aspiració)	255
5.151	Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " $b mm$ "; separació tambor - obturador, " $o mm$ " (pantalla prototip impulsió més aspiració)	255
5.152	Muntatge experimental al banc de proves per mesurar el balanç de la pantalla (en vermell el conducte d'impulsió i en taronja el conducte d'aspiració)	257
5.153	Posicionament de la pantalla al banc de proves	258
5.154	Obertura entre l'obturador longitudinal i el tambor	258
5.155	Vista lateral de la pantalla, amb les respectives boques d'alimentació	259
5.156	Detall de la cambra d'impulsió (esquerra). Detall de cambra d'aspiració (dreta)	259
5.157	Vistes longitudinals de la pantalla	260
5.158	Detall de la unió o posicionament entre els dos passamans d'alumini que formen el llavi, i la seva unió amb les tapes laterals i la carcassa externa de la pantalla	261
5.159	Vista general del llavi de la pantalla	261
5.160	Cara exterior del caixó d'aspiració, amb la corresponent porta de registre	262
6.1.	Descripció del procés de turbulència, amb la simulació numèrica <i>DNS</i> [35]	269
6.2.	Component mitjà i component fluctuant d'una variable[10]	270
6.3.	Distribució de la velocitat adimensional u^+ en funció de la distància adimensional respecte de la paret y^+ [30]	275
6.4.	Modelització prop de la paret, resolent la subcapa viscosa[30]	276
6.5.	Modelització prop de la paret, modelant la capa intermèdia i la subcapa viscosa[30]	277
6.6.	Diferenciació de les diverses regions que apareixen en un bufador [3]. H , és la separació vertical entre el substrat i el bufador. W , és l'amplada del bufador.	292
6.7.	Geometria del cas analitzat, per validar les dades experimentals aportades experimentalment per [6] i recopilades per [4]	293
6.8.	Divisió del domini general en diverses zones per a la generació del mallat per un bufador d'una sola ranura	294
6.9.	Ajustament entre dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] resumides per A. Oliva i altres [4], i l'expressió polinòmica ajustada a les dades.	296

6.10. Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k - \varepsilon$	298
6.11. Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k - \varepsilon, LS$	299
6.12. Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k - \varepsilon, LB$	300
6.13. Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k\omega, SST$	301
6.14. Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k\omega, SST$ (modelització compressible / incompressible) . .	302
6.15. Evolució del nombre de Nu en funció dels diversos mallats, $H/W = 2.6, Re = 10400$	304
6.16. Valor de y^+ en funció dels diversos mallats, $H/W = 2.6, Re = 10400$	304
6.17. Distribució del número de Nusselt per un bufador d'una sola ranura de "a mm" d'amplada, $Re = 6500$, i diferents relacions H/W des de 1 fins 3	306
6.18. Efecte de la separació entre el bufador i la superfície d'impacte, en la component vertical de velocitat, representada just al centre del bufador	308
6.19. Distribució de velocitats d'un bufador de ranura, $Re = 6500, W = "a mm"$, $H/W = 1$ (a la imatge superior) i $H/W = 3$ (a la imatge inferior)	309
6.20. Longitud adimensional del nucli potencial, i del jet lliure, per a diverses relacions H/W	310
6.21. Longitud real del nucli potencial, i del jet lliure, per a diverses separacions entre el bufador i el substrat	310
6.22. Distribució Nu per diverses velocitats al llavi $30m/s \leq V_{jet} \leq 60m/s$, $W = "a mm"$, $H = "b mm"$	311
6.23. Valor del coeficient h per diverses velocitats al llavi $30m/s \leq V \leq 60m/s$, $W = "a mm"$, $H = "b mm"$	311
6.24. Distribució Nu per diverses velocitats d'avanç del substrat $0m/min \leq V_{material} \leq 400m/min$, $H = "b mm"$, $W = "a mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $T_{jet} = "T_1 ^\circ C"$, $T_{base} = "T_{tambor} ^\circ C"$	313
6.25. Distribució Nu per $Re = 6.500$, $H = "b mm"$ i W entre " a_1 " i " $a_2 mm$ "	316
6.26. Distribució \bar{h} per $Re = 6.509$, $H = "b mm"$ i W entre " a_1 " i " $a_2 mm$ "	317
6.27. Distribució Nu , $4.339 \leq Re \leq 6.509$, $W = "a_1 mm"$ i $H = "b mm"$.	318
6.28. Distribució Nu , $4.881 \leq Re \leq 9.763$, $W = "1,5 \cdot a_1 mm"$ i $H = "b mm"$	319
6.29. Distribució Nu , $5.207 \leq Re \leq 9.763$, $W = "2 \cdot a_1 mm"$ i $H = "b mm"$	319
6.30. Distribució Nu , $6.509 \leq Re \leq 9.492$, $W = "2,5 \cdot a_1 mm"$ i $H = "b mm"$	320

6.31. Distribució \bar{h} , $5.000 \leq Re \leq 9.000$, " $a_1 mm$ " $\leq W \leq$ " $2,5 \cdot a_1 mm$ " i $H = "b mm"$	321
6.32. Variació del nombre de Nusselt en funció de la temperatura	323
6.33. Esquema bàsic de funcionament d'una pantalla d'assecatge entre tinters (tipus "M2")	325
6.34. Esquema de la geometria d'un llavi amb confinament	325
6.35. Esquema bàsic de funcionament d'una pantalla d'assecatge entre tinters (disseny antic tipus "M7")	326
6.36. Esquema de la geometria d'un llavi sense confinament	326
6.37. Distribució Nu , $Re = 6.509$ i $Re = 8.136$, $W = "a mm"$, $H = "b mm"$ i $H' = "m mm"$, amb confinament i sense confinament	327
6.38. Distribució Nu , $Re = 6.509$, $W = "a_1 mm"$, $H = "b mm"$ i $H' = "m mm"$, amb confinament i sense confinament	327
6.39. Balanç pantalla d'assecatge entre tinters	330
6.40. Variació de paràmetres per al càlcul del balanç de la pantalla	330
6.41. Paràmetres definitoris de la geometria analitzada per a l'estudi d'un bufador de doble ranura	334
6.42. Distribució del nombre de Nusselt, per un bufador de doble ranura, per diverses separacions entre les dues ranures, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/2 = "a/2 mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $0mm \leq L \leq 9mm$	335
6.43. Detall de distribució del nombre de Nusselt, per un bufador de doble ranura, per diverses separacions entre les dues ranures (detall), $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/2 = "a/2 mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $0mm \leq L \leq 9mm$	335
6.44. Contorn de velocitat del bufador de doble ranura, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/2 = "a/2 mm"$, $L = "b mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$	336
6.45. Paràmetres definitoris de la geometria analitzada per a l'estudi d'un bufador de tres ranures	337
6.46. Distribució del nombre de Nusselt, per un bufador de triple ranura, per diverses separacions entre les ranures, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $0mm \leq L \leq 6mm$	337
6.47. Contorn de velocitat del bufador de triple ranura, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 4mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$	338
6.48. a) Contorn de velocitat del bufador de triple ranura (detall zona central), b) Esforç tallant a la superfície d'impacte (detall zona central), $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 2mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$	339
6.49. a) Contorn de velocitat del bufador de triple ranura (detall zona central), b) Esforç tallant a la superfície d'impacte (detall zona central), $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 4mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$	339

6.50. a) Contorn de velocitat del bufador de triple ranura (detall zona central), b) Esforç tallant a la superfície d'impacte (detall zona central), $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 6mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$	340
6.51. Distribució del nombre de Nusselt i de l'esforç tallant a la paret d'impacte del bufador, per un bufador de triple ranura, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 6mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$	341
7.1. Vista lateral de la impressora per a activitats de recerca, "M8"	344
7.2. Muntatge experimental impressora "M8" (representació esquemàtica), per a validació del coeficient de transferència de calor per convecció \bar{h} (diàmetre en mm)	345
7.3. Muntatge experimental impressora "M8" (vista real del posicionament dels punts A, B i C de la fig. 7.2)	346
7.4. Muntatge experimental impressora "M8" (detall dels punts A i B de la fig. 7.2)	346
7.5. Muntatge experimental impressora "M8" (detall del punt C de la fig. 7.2)	347
7.6. Velocitat d'impressió per obtenir una mostra totalment seca en el punt C segons l'experiment de la fig. 7.2, per una temperatura d'assecatge de " $T_1 \check{z} C$ "	349
7.7. Esquema del procés d'assecatge que es porta a terme en la pantalla testejada a la "M8" (cota en mm)	351
7.8. Coeficient de transferència de calor per convecció en funció de la velocitat de sortida de l'aire del llavi (s'ha considerat l'amplada del llavi igual a " $W_{llavi} mm$ ")	351
7.9. Representació esquemàtica de la transferència de calor que es produeix entre el bufador i la superfície d'impacte, en el treball d'impressió portat a terme a la "M8"	352
7.10. Representació gràfica de les dades recopilades a la taula. 7.14. Capacitat d'assecatge d'un 74% en blau, d'un 49% en vermell i d'un 26% en verd	365
8.1. Elements bàsics del sistema d'assecatge entre tinters	370
8.2. Reaprofitament de la calor residual del cabal d'aire d'extracció, mitjançant un intercanviador de calor	371
8.3. Caixó d'impulsió i caixa d'aspiració	372
8.4. Representació esquemàtica del sistema d'assecatge entre tinters i del túnel d'una impressora flexogràfica, amb quatre ventiladors	373
8.5. Punts de mesura de pressió per al càlcul del cabal mitjançant el factor k (extret a partir de catàlegs de Soler & Palau) [66]	375
8.6. Punt de funcionament assolit pel circuit d'impulsió tinters, amb les pantalles tipus "M3", a una freqüència de 35Hz [66]	377

8.7.	Representació gràfica dels diversos punts de funcionament assajats al circuit d'impulsió de tinters, amb les pantalles tipus "M3"	378
8.8.	Punt de funcionament assolit pel circuit d'aspiració tinters, amb les pantalles tipus "M3", a una freqüència de 50Hz [66]	380
8.9.	Representació gràfica dels diversos punts de funcionament assajats al circuit d'aspiració tinters, amb les pantalles tipus "M3"	380
8.10.	Punts on s'aplica Bernoulli per al càlcul de la corba característica de la pantalla, per a la part corresponent a la impulsió	383
8.11.	Comparativa punt de funcionament ventilador impulsió, amb les pantalles actuals tipus "M3" i el nou model de pantalla proposat	385
8.12.	Punt de funcionament assolit pel circuit d'impulsió tinters, amb les pantalles tipus prototip, a una freqüència de 37,5Hz [66]	386
8.13.	Ajustament entre les dades experimentals i la corba ajustada, de la pressió estàtica a la boca d'aspiració d'una pantalla "M3", per diversos cabals d'aspiració	387
8.14.	Ajustament entre les dades experimentals i la corba ajustada, de la pressió estàtica a la boca d'aspiració de la pantalla prototip, per diversos cabals d'aspiració	388
8.15.	Punts on s'aplica Bernoulli per al càlcul de la corba característica de la pantalla, només per la cambra addicional que s'ha col·locat a l'aspiració (recorregut de l'aire des del punt 1 al punt 2)	389
8.16.	Ajustament entre les dades experimentals i la corba ajustada, de la pèrdua de càrrega provocada per la cambra addicional amb orificis que s'ha col·locat a l'aspiració de la pantalla	389
8.17.	Comparativa punt de funcionament ventilador aspiració, amb les pantalles actuals tipus "M3" i el nou model de pantalla proposat	390
8.18.	Punt de funcionament assolit pel circuit d'aspiració tinters, amb les pantalles tipus prototip, a una freqüència de 39Hz [66]	391
9.1.	Balanç d'energia per al node situat a la base del substrat	396
9.2.	Balanç d'energia per al node situat a la base del substrat (node a temperatura constant)	398
9.3.	Balanç d'energia per a un node intermedi (un sol material)	399
9.4.	Balanç d'energia per a un node intermedi entre dos materials (dos materials amb el mateix Δx a cada material)	401
9.5.	Balanç d'energia per al node situat a la part superior del material	405
9.6.	Balanç d'energia per al node situat a la part superior, amb evaporació, convecció i conducció	419
9.7.	Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a\text{ mm}$ ", " $H = b\text{ mm}$ ", per un treball tipus, sota diverses configuracions d'impressió (LEL 0%)	424

9.8. Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a un nivell de LEL del 15%, per una velocitat d'impressió de 250 m/min	427
9.9. Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a un nivell de LEL del 30%, per una velocitat d'impressió de 250 m/min	427
9.10. Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a un nivell de LEL del 45%, per una velocitat d'impressió de 250 m/min	428
9.11. Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, sota diverses configuracions d'impressió (HR 0%)	429
9.12. Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a una humitat relativa del 33% a 20°C , per una velocitat d'impressió de 50 m/min	430
9.13. Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a una humitat relativa del 66% a 20°C , per una velocitat d'impressió de 50 m/min	431
9.14. Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a una humitat relativa del 100% a 20°C , per una velocitat d'impressió de 50 m/min	431
9.15. Capacitat d'assecatge d'un túnel de longitud 5 m , amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", i amb una separació entre pantalles de " $W_{\text{túnel}} \text{ mm}$ ", per un treball tipus, utilitzant per a l'assecatge un aire amb un $LEL = 0\%$ i una temperatura de 80°C . . .	435
9.16. Percentatge evaporat per el treball tipus, variant la separació entre pantalles, a l'esquerra és de " $W_{\text{túnel}} \text{ mm}$ " i a la dreta és de " $W'_{\text{túnel}} \text{ mm}$ ", a una velocitat de l'aire de " $V_1 \text{ m/s}$ " i a una temperatura de 80°C , amb un nivell de $LEL = 0\%$	436
9.17. Longitud del túnel necessària per assecatge en un 99% el treball estàndard que s'ha considerat, a una velocitat de l'aire de " $V_1 \text{ m/s}$ " i a una temperatura de 80°C , amb un nivell de $LEL = 0\%$, a diferents velocitats d'impressió i a diferents separacions entre el substrat i la pantalla (separació entre pantalles de " $W_{\text{túnel}} \text{ mm}$ ")	437

9.18. Longitud del túnel necessària per assecar en un 99% el treball estàndard que s'ha considerat, a una velocitat de l'aire de " $V_1 m/s$ " i a una temperatura de $80^{\circ}C$, amb un nivell de $LEL = 0\%$, a diferents velocitats d'impressió i a diferents separacions entre el substrat i la pantalla (separació entre pantalles de " $W'_{túnel} mm$ ")	437
9.19. Percentatge evaporat per el treball tipus, a diverses velocitats d'impressió, i per diverses longituds del túnel	438
9.20. Percentatge evaporat per el treball tipus, a diverses velocitats d'impressió, sense calandra escalfadora i amb calandra escalfadora	439
9.21. Percentatge evaporat per el treball tipus, a diverses velocitats d'impressió, túnel de $5m$ estàndard, i túnel $5m$ sustentació	440
9.22. Temperatura assolida per el material a la sortida del túnel, a diverses velocitats d'impressió, túnel de $5m$ estàndard, túnel $5m$ amb calandra escalfadora a $35^{\circ}C$, i túnel $5m$ sustentació	441
9.23. Variació de la capacitat d'assecatge d'un túnel d'una longitud de $5m$, amb pantalles separades " $W_{túnel} mm$ ", per diferents relacions geomètriques H/W per un treball tipus, a un nivell de LEL del 15%, una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", i una temperatura d'assecatge de $80^{\circ}C$, per diverses velocitats d'impressió	442
9.24. Variació de la capacitat d'assecatge d'un túnel d'una longitud de $5m$, amb pantalles separades " $W_{túnel} mm$ ", per diferents relacions geomètriques H/W per un treball tipus, a un nivell de LEL del 30%, una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", i una temperatura d'assecatge de $80^{\circ}C$, per diverses velocitats d'impressió	442
9.25. Evolució de l'evaporació en un assecatge tipus túnel (tintes en base solvent). $\bar{h}_{superior} = 121W/m^2K$, $\bar{h}_{inferior} = 8W/m^2K$, $T_{superior} = T_{inferior} = 80^{\circ}C$, aplicació de $12\mu m$ de tinta amb un 30% de sòlids, solvent Etanol, substrat PP $25\mu m$, condicions inicials de temperatura de la tinta i del substrat $20^{\circ}C$, velocitat material $150m/min$, aire assecatge $LEL = 0\%$	443
9.26. Variació de la capacitat d'assecatge d'un túnel d'una longitud de $5m$, amb pantalles separades " $W_{túnel} mm$ ", per diferents relacions geomètriques H/W per un treball tipus, amb una humitat relativa a $20^{\circ}C$ del 33%, una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", i una temperatura d'assecatge de $80^{\circ}C$ ($HR = 1,6\%$), per diverses velocitats d'impressió	444
9.27. Variació de la capacitat d'assecatge d'un túnel d'una longitud de $5m$, amb pantalles separades " $W_{túnel} mm$ ", per diferents relacions geomètriques H/W per un treball tipus, amb una humitat relativa a $20^{\circ}C$ del 66%, una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", i una temperatura d'assecatge de $80^{\circ}C$ ($HR = 3,3\%$), per diverses velocitats d'impressió	445

9.28. Evolució de l'evaporació en un assecatge tipus túnel (tintes en base aigua). $\bar{h}_{superior} = 121W/m^2K$, $\bar{h}_{inferior} = 8W/m^2K$, $T_{superior} = T_{inferior} = 80^{\circ}C$, aplicació de $12\mu m$ de tinta amb un 30% de sòlids, solvent aigua, substrat PP $25\mu m$, condicions inicials de temperatura de la tinta i del substrat $20^{\circ}C$, velocitat material $150m/min$, aire assecatge $HR = 0\%$	446
9.29. Calandra calefactora	448
9.30. Connexió d'entrada i sortida d'aigua de la calandra	449
9.31. Balanç d'energia entre el substrat i la calandra	449
9.32. Passat del material i punt de mesura	450
9.33. Sensor de temperatura per contacte	450
9.34. Braç magnètic articulat, amb el sensor acoblat	451
9.35. Col·locació del sensor de temperatura	451
9.36. Punt de mesura de l'experiment	452
9.37. Quantitat de calor transferida entre la calandra i el material, a diverses velocitats d'avanç del material	453
9.38. Temperatura final assolida per el material, a diverses velocitats d'avanç del material	453
9.39. Temperatura final assolida per el material, en funció del temps de contacte	454
9.40. Quantitat de calor transferida entre la calandra i el material, a diverses velocitats d'avanç	454
9.41. Temperatura final assolida per el material, a diverses velocitats d'avanç	455
9.42. Temperatura final assolida per el material, en funció del temps de contacte	455
9.43. Coeficients de transferència de calor per convecció d'un cilindre horitzontal de " $\varnothing_{calandra} mm$ " amb moviment de rotació. Termoregulador amb consigna $70^{\circ}C$	457
9.44. Temperatura final assolida per el material, en funció del temps de contacte	458
9.45. Temperatura final assolida per el material, en funció del temps de contacte (detall)	459
9.46. Coeficients de transferència de calor per convecció d'un cilindre horitzontal de " $\varnothing_{calandra} mm$ " amb moviment de rotació. Termoregulador amb consigna $90^{\circ}C$	460
9.47. Temperatura final assolida per el material, en funció del temps de contacte	460
9.48. Dominis emprats per la simulació amb <i>OpenFoam®</i> , mides en mm	462
9.49. Esquema de les condicions de contorn del domini aire	464
9.50. Esquema de les condicions de contorn del domini substrat	465
9.51. Esquema de les condicions de contorn del domini aire inferior	465
9.52. Passes que s'han seguit en la resolució del cas	467
9.53. Coeficient de transferència de calor entre els dos dominis (aire i substrat)	468

9.54. Coeficient de transferència de calor entre els dos dominis (aire inferior i substrat)	469
9.55. Representació de la temperatura del substrat a mesura que es sotmet a l'acció d'un bufador, en funció de la distància recorreguda. Els valors mostrats a la figura es corresponen amb les temperatures al centre del material sòlid. Comparativa entre els valors simulats amb <i>OpenFOAM®</i> i els valors extrets del codi que s'ha generat amb <i>QtOctave®</i>	470
9.56. Representació de la temperatura del substrat a mesura que es sotmet a l'acció d'un bufador, en funció de la distància recorreguda. Els valors mostrats a la figura es corresponen amb les temperatures al centre del material sòlid. Comparativa utilitzant valors mitjans i valors instantanis del coeficient de transferència de calor per convecció.	471
9.57. Dominis emprats per la simulació amb <i>OpenFoam®</i> , mides en mm	472
9.58. Esquema de les condicions de contorn del domini aire	472
9.59. Esquema de les condicions de contorn del domini substrat	473
9.60. Esquema de les condicions de contorn del domini aire inferior	473
9.61. Coeficient de transferència de calor entre els dos dominis (aire i substrat)	474
9.62. Coeficient de transferència de calor entre els dos dominis (aire inferior i substrat)	474
9.63. Temperatura al centre del substrat, considerant el substrat estàtic o bé en moviment (resultats obtinguts amb <i>OpenFOAM®</i>)	475
9.64. Temperatura calculada per el centre del substrat, considerant un ajustament polinòmic del coeficient de transferència de calor per convecció	475
9.65. Temperatura calculada al centre del substrat, considerant el valor mig del coeficient de transferència de calor per convecció	476
D.1. Comparativa de resultats de la velocitat a la sortida del llavi del segon prototip, segons esquemes de discretització de primer o segon ordre	518
D.2. Condicions de contorn aplicades al model	520
D.3. Vista general del mallat en una secció transversal - esquerra model 1, dreta model 2	521
D.4. Vista detallada del mallat en una secció transversal (zona pantalla) - esquerra model 1, dreta model 2	522
D.5. Vista detallada del mallat en una secció transversal (zona llavi / deflectors) - esquerra model 1, dreta model 2	523
D.6. Vista detallada del mallat en una secció transversal (zona tubs guia) - esquerra model 1, dreta model 2	523
D.7. Vista general del mallat en una secció longitudinal - model 1	524
D.8. Vista general del mallat en una secció longitudinal - model 2	524
D.9. Distribució de velocitats al llavi de la pantalla per els dos models de refinament	525
D.10. Condicions de contorn aplicades al model, tall transversal	531
D.11. Condicions de contorn aplicades al model, tall longitudinal	531

D.12. Tall transversal de la geometria analitzada	532
D.13. Detall de mallat en la secció transversal de la geometria analitzada .	533
D.14. Detall de mallat en la secció longitudinal de la geometria analitzada .	533
D.15. Dades de l'estació de treball utilitzada per els càlculs	535
E.1. Condicions de contorn de la simulació	538
E.2. Distribució del nombre de Nusselt, per a la comparativa d'esquemes de discretització fvSchemes (primer ordre i segon ordre)	548
E.3. Dimensions generals del domini utilitzat per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció (mides en m)	550
E.4. Vista general de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi amb confinament	552
E.5. Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi amb confinament	552
E.6. Vista general del refinament de la malla a la <i>paret_inferior</i> (sortida del bufador) - 1 llavi amb confinament	552
E.7. Vista en detall del doble refinament de la malla a la <i>paret_inferior</i> (sortida del bufador) - 1 llavi amb confinament	553
E.8. Vista general de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi sense confinament	553
E.9. Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi sense confinament	554
E.10. Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la sortida del llavi a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi sense confinament	554
E.11. Vista general del refinament de la malla a la <i>paret_inferior</i> - 1 llavi sense confinament	555
E.12. Vista en detall del doble refinament de la malla a la <i>paret_inferior</i> - 1 llavi sense confinament	555
E.13. Vista general de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 2 llavis amb confinament	556
E.14. Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 2 llavis amb confinament	556
E.15. Vista general del refinament de la malla a la <i>paret_inferior</i> (sortida del bufador) - 2 llavis amb confinament	556
E.16. Vista en detall del doble refinament de la malla a la <i>paret_inferior</i> (sortida del bufador) - 2 llavis amb confinament	557
E.17. Vista general de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 3 llavis amb confinament	557
E.18. Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 3 llavis amb confinament	557
E.19. Vista general del refinament de la malla a la <i>paret_inferior</i> (sortida del bufador) - 3 llavis amb confinament	558
E.20. Vista en detall del doble refinament de la malla a la <i>paret_inferior</i> (sortida del bufador) - 3 llavis amb confinament	558

Índex de taules

2.1. Percentatge de cada element bàsic d'una tinta	26
3.1. Límits inferiors d'explosibilitat per gasos inflamables i vapors ($LEL_{(20^{\circ}\text{C})}$) [21][22][23]	43
3.2. Variació de $LEL_{(\%v/v)}$ amb la temperatura	44
3.3. Variació de $LEL_{(g/m^3)}$ amb la temperatura	46
3.4. Exemple pràctic del càlcul de LEL per a una mescla de substàncies inflamables	47
3.5. Nivells d'alarma segons el LEL (a " $T_{disseny}^{\check{C}}$ "), referenciats a 20°C	50
3.6. Requisits de control que cal acomplir, segons els intervals de funciona- ment	50
3.7. Contingut de solvent en percentatge per a cada tipologia de tinta . . .	55
3.8. Additius que s'afegeixen a la tinta inicial per a millorar-ne les propietats	56
3.9. Percentatge teòric d'assecatge a tinters i a túnel, per una impressora de 8 colors	57
3.10. Percentatge teòric d'assecatge a tinters i a túnel, per una impressora de 10 colors	57
3.11. Paràmetres per al càlcul de les densitats dels solvents en estat líquid .	58
3.12. Fitxa d'impressió del treball núm. 1	65
3.13. Comparativa de nivell de LEL real / teòric per el treball núm. 1 . . .	65
3.14. Fitxa d'impressió del treball núm. 2	75
3.15. Comparativa de nivell de LEL real / teòric per el treball núm. 2 . . .	75
3.16. Fitxa d'impressió del treball núm. 3	79
3.17. Comparativa de nivell de LEL real / teòric per el treball núm. 3 . . .	79
3.18. Fitxa d'impressió del treball núm. 4	83
3.19. Comparativa de nivell de LEL real / teòric per el treball núm. 4 . . .	83
3.20. Afectació de la recirculació a la velocitat d'impressió, per no sobrepas- sar un determinat nivell de LEL	89
5.1. Recull de característiques tècniques dels diversos models de màquina estudiats	112
5.2. Quadre resum de les velocitats mesurades experimentalment al llavi per diversos tipus de pantalles d'assecatge	149
5.3. Recopilació de resultats, amplada " $c\text{ mm}$ ", variant el diàmetre d'en- trada, conducte d'impulsió " $W_2\text{ mm}$ " x " $H_2\text{ mm}$ "	154

5.4.	Recopilació de resultats, amplada “ <i>cmm</i> ”, variant el diàmetre d’entrada, i les dimensions del conducte d’impulsió	158
5.5.	Comparativa de mesures experimentals de la velocitat assolida al llavi, entre la pantalla de referència tipus “M4” i la pantalla prototip 1 . . .	197
5.6.	Comparativa de mesures experimentals de la temperatura assolida al llavi, entre la pantalla de referència tipus “M4” i la pantalla prototip	1200
5.7.	Comparativa de mesures experimentals de la velocitat assolida al llavi, entre la pantalla de referència tipus “M4” i la pantalla prototip 2 . . .	214
5.8.	Comparativa de mesures experimentals de la temperatura assolida al llavi, entre la pantalla de referència tipus “M4” i la pantalla prototip	2216
5.9.	Recull de dimensions més representatives de la carcassa exterior per les pantalles d’assecatge entre tinters	217
5.10.	Balanços experimentals de la pantalla “M4” per a diverses distàncies de separació entre l’obturador longitudinal i el tambor	232
5.11.	Balanços experimentals de la pantalla prototip per a diverses distàncies de separació entre l’obturador longitudinal i el tambor	256
6.1.	Intensitat de turbulència [30]	284
6.2.	Longitud de mescla l	285
6.3.	Coefficients del polinomi de grau 14, per als resultats experimentals del número de Nu , $Re = 10.400$, $H/W = 2,6$ per el rang de distàncies normalitzades ($\frac{x}{W} \leq 20$)	296
6.4.	Comparativa de resultats entre els diversos models de turbulència assajats, $H/W = 2,6$, $Re = 10.400$ (valor de y^+ proporcionat per la funció <i>yPlusRas</i>)	301
6.5.	Comparativa de resultats entre els diversos models de turbulència assajats, $H/W = 2.6$, $Re = 10400$	303
6.6.	Paràmetres de control del mallat per a l’estudi de refinament	305
6.7.	Coefficient de transferència de calor per convecció d’un llavi de “ <i>amm</i> ” d’amplada, a diverses separacions respecte del substrat per un nombre de $Re = 6500$ (resultats calculats per a una amplada de “ $W_{llavi} mm$ ”, és a dir, $x/W = 20$ a cada costat respecte de la part central del bufador)	306
6.8.	Coefficient \bar{h} per diverses velocitats d’avanç del substrat, $0m/min \leq V_{material} \leq 400m/min$, $H = "bmm"$, $W = "amm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $T_{jet} = "T_1 ^\circ C"$, $T_{base} = "T_{tambor} ^\circ C"$	314
6.9.	Resum de casos estudiats per a un mateix nombre de Re , separació entre llavi i tambor de “ <i>bmm</i> ”, T^a bufador “ $T_1 ^\circ C$ ” i T^a tambor $T_{tambor} ^\circ C$	317
6.10.	Resum de casos estudiats per a un mateix valor de “ $\bar{h}_1 W/m^2K$ ”, mantenint la separació entre llavi i tambor de $H = "bmm"$, T^a bufador “ $T_1 ^\circ C$ ” i T^a tambor “ $T_{tambor} ^\circ C$ ”, i variant l’amplada del bufador W .	321
6.11.	Variació del nombre de Reynolds del bufador, en funció de la temperatura, tot mantenint una mateixa velocitat de l’aire en el llavi V_{jet}	323

6.12. Variació del coeficient de transferència de calor per convecció en funció de la temperatura	324
6.13. Comparativa valors del coeficient \bar{h} , amb confinament i sense confinament	328
6.14. Balanç de la pantalla en funció del diàmetre del tambor	332
6.15. Balanç de la pantalla en funció de la distància vertical de separació entre l'obturador longitudinal i el tambor central	332
6.16. Balanç de la pantalla en funció de la distància vertical de separació entre el llavi de la pantalla i el tambor central	333
7.1. Velocitat d'impressió, en funció de la velocitat de sortida de l'aire del llavi de la pantalla d'assecatge, per tal d'obtenir una mostra totalment seca en el punt C de la fig. 7.2	349
7.2. Densitat de calor del bufador de la pantalla utilitzada en el muntatge experimental de la "M8"	353
7.3. Densitat de calor del material una vegada ha passat sota els efectes de la pantalla d'assecatge utilitzada en el muntatge experimental de la "M8"	353
7.4. Cerca de la constant de l'assecatge, en el muntatge experimental de la "M8"	354
7.5. Coeficients de transferència de calor per convecció en els trams $A - B$ ($l = 0,44869m$) i $B - C$ ($l = 2,96539m$) de la fig. 7.2.	357
7.6. Quantitat de sòlids romanents a la mostra impresa durant les proves d'impressió amb la "M8" (les dimensions de la mostra analitzada són $100cm^2$)	357
7.7. Dades de la tinta, a introduir en el model matemàtic utilitzat per al càlcul de la capacitat d'evaporació de la pantalla d'assecatge entre tinters, per reproduir els resultats de les proves d'impressió dutes a terme a la "M8"	359
7.8. Quantitat de solvent evaporada en el tram $A - B$ segons l'esquema de la fig. 7.2 (valors calculats amb el model matemàtic que s'ha generat)	359
7.9. Quantitat de solvent evaporada en el punt B segons l'esquema de la fig. 7.2 (valors calculats amb el model matemàtic que s'ha generat)	360
7.10. Quantitat de solvent evaporada en el tram $B - C$ segons l'esquema de la fig. 7.2	361
7.11. Quadre resum del percentatge de la quantitat de solvent evaporada, segons l'experiment de la fig. 7.2 (valors calculats amb el model matemàtic que s'ha generat)	361
7.12. Constant d'assecatge global del procés d'assecatge de la fig. 7.2, segons eq. 7.1	362
7.13. Constant d'assecatge global del procés d'assecatge de la fig. 7.2, segons eq. 7.4	363

7.14.	Càlcul de la constant d'assecatge d'una pantalla, per a la impressió d'un determinat treball, i per diversos percentatges de massa de solvent evaporada	365
7.15.	Quantitat d'energia necessària per evaporar el solvent en l'etapa <i>B</i> , segons els valors de la taula. 7.9	366
7.16.	Desglòs energètic que es produeix en el punt <i>B</i> (sota la pantalla d'assecatge)	367
8.1.	Mesures experimentals màquina "M3", punts de funcionament del sistema d'assecatge del cos impressor (circuit impulsíó), amb pantalles tipus "M3"	376
8.2.	Resum de valors de cabal i pressió per als punts de funcionament assajats (impulsíó tinters "M3")	378
8.3.	Mesures experimentals màquina "M3", punts de funcionament del sistema d'assecatge del cos impressor (circuit aspiració), amb pantalles tipus "M3"	379
8.4.	Resum de valors de cabal i pressió per als punts de funcionament assajats (aspiració tinters "M3")	381
8.5.	Dades experimentals per determinar la corba característica de la part corresponent a la impulsíó d'una pantalla entre tinters tipus "M3"	383
8.6.	Dades experimentals per determinar la corba característica de la part corresponent a la impulsíó d'una pantalla entre tinters corresponent al nou prototip	384
8.7.	Resum dels punts de funcionament, per el circuit d'assecatge d'impulsíó entre tinters, per les pantalles tipus "M3", i per la pantalla prototip	385
8.8.	Mesures experimentals pantalla "M3", aspiració, banc de proves	387
8.9.	Mesures experimentals pantalla prototip, aspiració, banc de proves	387
9.1.	Coeficients per al càlcul de la pressió de vapor de saturació del solvent	415
9.2.	Correspondència $LEL_{20^{\circ}\text{C}}(\% \frac{v}{v})$, $LEL_{20^{\circ}\text{C}}(\frac{g}{m^3})$	416
9.3.	Coeficients per al càlcul de la difusivitat del solvent en l'aire	418
9.4.	Coeficients per al càlcul de l'entalpia de vaporització del solvent	418
9.5.	Humitats relatives de l'aire a diverses temperatures, per comptabilitzar l'efecte de la humitat a la capacitat d'assecatge	423
9.6.	Variació en la capacitat d'assecatge que suposa incrementar la temperatura d'assecatge de 20°C a 80°C, per una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", per diverses velocitats d'impressió	425
9.7.	Condicions de temperatura a la base de la calandra	458
9.8.	Temperatures assolides per el substrat (considerant que està en moviment o bé estàtic), calculades amb QtOctave®, a partir de les dades del coeficient de transferència de calor per convecció obtingudes per simulació amb OpenOAM®.	476

D.1.	Valors del refinament de mallat (<i>"segon prototip"</i>)	521
D.2.	Valors del refinament de mallat (<i>segon prototip</i>)	525
D.3.	Nombre de cel·les i temps de càlcul orientatiu per al disseny de la part corresponent a la impulsió	534
D.4.	Nombre de cel·les i temps de càlcul orientatiu per al disseny de la part corresponent a la aspiració	534
E.1.	Valor del coeficient de transferència de calor per convecció per a les dues discretitzacions del diccionari <i>fvSchemes</i>	548
E.2.	Rang de valors de les variables que defineixen les dimensions generals per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció . .	551
E.3.	Paràmetres definitoris del mallat en l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció	551
E.4.	Resum de casos estudiats, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, per un bufador d'una sola ranura amb confinament. Nomenclatura segons fig. 6.7 i fig. E.3.	560
E.5.	Resum de casos estudiats, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, per un bufador d'una sola ranura sense confinament. Nomenclatura segons fig. 6.36.	561
E.6.	Resum de casos estudiats, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, per un bufador de dues ranures amb confinament. Nomenclatura segons fig. 6.41.	561
E.7.	Resum de casos estudiats, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, per un bufador de tres ranures amb confinament. Nomenclatura segons fig. 6.45.	562

Índex

Nomenclatura	vii
1. Presentació de COMEXI	13
1.1. Història de l'empresa	13
1.1.1. El primer espai (1954 - 1956)	13
1.1.2. El segon espai (1957 - 1961)	13
1.1.3. El tercer espai (1962 - 1998)	14
1.1.4. El quart espai (1979 - 1998)	15
1.1.5. El cinquè espai (1998 - actualitat)	15
1.2. Missió i valors de COMEXI	17
1.3. Línies de producte	17
2. Introducció a la flexografia	21
2.1. Procés de packaging	21
2.2. Definició de flexografia	22
2.3. Procés d'impressió	22
2.4. Tintes per a flexografia	24
2.4.1. Components bàsics d'una tinta	25
2.4.2. Tipologies de tintes	26
2.5. Elements clau d'una màquina flexogràfica	27
2.5.1. Desbobinador	28
2.5.2. Cos impressor	28
2.5.3. Assecatge tinters	32
2.5.4. Túnel d'assecatge	35
2.5.5. Corrons guia	38
2.5.6. Calandra refrescadora	38
2.5.7. Rebobinador	39
3. Emissions de solvents	41
3.1. Conceptes previs	41
3.2. Càlcul de propietats en condicions diferents a les tabulades	44
3.2.1. Influència de la temperatura en el valor del LEL	44
3.2.2. Valor de LEL per a una mescla de gasos o vapors inflamables .	46
3.3. Mesura de la quantitat de solvents a màquina	47
3.3.1. Justificació de la necessitat d'instal·lar els sensors de LEL . .	47
3.3.2. Tipus de mesuradors (catalítics/infraroig)	51

3.3.3.	Ubicació dels sensors <i>LEL</i> , en la línia de producte Flexo	52
3.4.	Estimació teòrica de les emissions de solvent d'una impressora flexo- gràfica	55
3.4.1.	Composició de les tintes	55
3.4.2.	Percentatge d'assecatge teòric a tinters i a túnel	56
3.4.3.	Densitat dels solvents en estat líquid	58
3.4.4.	Densitat dels solvents en estat gasós	58
3.4.5.	Paràmetres que defineixen el treball que es vol imprimir	59
3.4.6.	Paràmetres que defineixen el sistema d'assecatge	60
3.5.	Validació/contrastació de resultats experimentals i teòrics	64
3.5.1.	Treball núm. 1	64
3.5.2.	Treball núm. 2	75
3.5.3.	Treball núm. 3	79
3.5.4.	Treball núm. 4	83
3.5.5.	Anàlisi de resultats pels diversos treballs estudiats	86
3.6.	Evolució del nivell de <i>LEL</i> sota diverses condicions de treball	87
3.6.1.	En funció de la recirculació	88
3.6.2.	En funció del balanç de les pantalles	90
3.6.3.	En funció de la temperatura d'assecatge	92
3.7.	Incineració dels gasos continguts en l'aire	92
3.8.	Conclusions	94
4.	Introducció a <i>OpenFOAM</i>	97
4.1.	Instal·lació i aprenentatge d' <i>OpenFOAM</i>	98
4.2.	Passes a seguir per a la resolució d'un cas amb <i>OpenFOAM</i>	99
4.3.	Estructura general dels casos	101
5.	Optimització pantalles assecatge del cos impressor	105
5.1.	Descripció i plantejament de la problemàtica a resoldre	105
5.1.1.	Introducció	105
5.1.2.	Components d'una pantalla d'assecatge entre tinters i limita- cions dels dissenys actuals	105
5.1.3.	Posicionament de les pantalles d'assecatge en una impressora flexogràfica	108
5.1.4.	Definició d'objectius a complir i limitacions a tenir en compte	109
5.1.5.	Antecedents	110
5.1.6.	Procediment utilitzat en el sistema de redisseny de les pantalles	110
5.1.7.	Recull de models de màquines	112
5.1.8.	Plantejament de les simulacions amb <i>OpenFOAM</i>	113
5.2.	Tipus de pantalles utilitzades per Comexi	113
5.2.1.	Geometries actuals (impulsió)	113
5.2.2.	Recull de resultats i conclusions	149

5.3.	Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)	150
5.3.1.	Pantalles tipus “M6”	150
5.3.2.	Pantalles tipus “M4”	159
5.4.	Disseny de la part corresponent a la impulsió de la pantalla d’assecatge entre tinters	192
5.4.1.	Primer prototip	192
5.4.2.	Estudi preliminar per a definir la geometria del nou concepte que s’aplicarà al segon prototip	201
5.4.3.	Segon prototip	209
5.5.	Part corresponent a l’aspiració	217
5.5.1.	Geometries actuals	217
5.5.2.	Estudi del comportament d’una pantalla simètrica tipus “M4”	224
5.5.3.	Estudi de la nova versió del caixó d’aspiració per a poder ésser implementat a les pantalles tipus “M4”	244
5.6.	Industrialització de la pantalla	256
5.6.1.	Fotografies prototip real	257
6.	Estudi de la transferència de calor per convecció d’un bufador	263
6.1.	Descripció i plantejament de la problemàtica a resoldre	263
6.2.	Introducció - Estudis previs recollits a la bibliografia	264
6.3.	Introducció de turbulència	268
6.3.1.	Determinació del valor de y^+	281
6.3.2.	Definició dels paràmetres de turbulència a les diverses condicions de contorn	284
6.4.	Escollir el solucionador adequat per a l’estudi	289
6.5.	Plantejament de les simulacions amb OpenFOAM	290
6.6.	Introducció a la transferència de calor per convecció, mitjançant convecció forçada	290
6.7.	Bufadors d’una sola ranura	292
6.7.1.	Dades experimentals recopilades a partir de la bibliografia, validació del cas $Re=10.400$ i $H/W=2,6$ amb confinament	292
6.7.2.	Estudi paramètric d’un bufador d’una sola ranura (pantalla assecatge tinters)	305
6.8.	Bufador de doble ranura	333
6.9.	Bufador de triple ranura	336
6.10.	Conclusions	341
7.	Validació del coeficient de transferència de calor per convecció	343
7.1.	Descripció del muntatge experimental	344
7.2.	Anàlisi de resultats	350
7.2.1.	Valors del coeficient de transferència de calor per convecció obtinguts via simulació	351
7.2.2.	Càlcul teòric de la quantitat de solvent evaporada	355

7.2.3.	Càlcul de la constant d'assecatge per al procés d'impressió assajat	362
7.3.	Conclusions	367
8.	Comparativa dels punts de funcionament amb les diverses pantalles (as- secatge entre tinters)	369
8.1.	Determinació de la corba característica global del sistema d'assecatge entre tinters amb les pantalles actuals	369
8.2.	Corba característica de les pantalles d'assecatge entre tinters	381
8.2.1.	Caracterització de la part corresponent a la impulsió	382
8.2.2.	Caracterització de la part corresponent a l'aspiració	386
8.3.	Conclusions	391
9.	Càlcul de la capacitat d'evaporació d'un jet d'aire	393
9.1.	Introducció	394
9.2.	Tipologia de nodes	395
9.2.1.	Node situat a la cara inferior del substrat	395
9.2.2.	Node intermedi	399
9.2.3.	Node superior	404
9.3.	Plantejament matricial del sistema d'equacions	407
9.3.1.	Un sol material	407
9.3.2.	Diferents materials	409
9.4.	Valoració de l'evaporació	413
9.4.1.	Càlcul de les pressions de vapor	415
9.4.2.	Càlcul del número de Lewis Le	417
9.4.3.	Càlcul de l'entalpia de vaporització h_{fg} del solvent	418
9.4.4.	Node situat a la part superior amb evaporació, convecció i conducció	419
9.4.5.	Plantejament del sistema d'equacions amb convecció i evap- oració al node superior, i convecció al node inferior, diversos materials i mateix Δx	420
9.5.	Estudi paramètric de la capacitat d'assecatge d'una pantalla d'asse- catge entre tinters	421
9.5.1.	Configuració del treball	421
9.5.2.	Estudi paramètric per tintes en base solvent	424
9.5.3.	Estudi paramètric per tintes en base aigua	428
9.5.4.	Conclusions	432
9.6.	Estudi paramètric de la capacitat d'assecatge d'un túnel	433
9.6.1.	Configuració del treball	434
9.6.2.	Estudi paramètric per tintes en base solvent	435
9.6.3.	Estudi paramètric per tintes en base aigua	444
9.6.4.	Conclusions	447

9.7. Validació experimental dels resultats teòrics obtinguts amb <i>QtOctave</i> [®] , de la calandra escalfadora de la màquina “M9”	448
9.7.1. Muntatge experimental	448
9.7.2. Resultats experimentals	452
9.7.3. Resultats teòrics	455
9.8. Validació teòrica dels resultats obtinguts amb <i>OpenFOAM</i> [®] d’un substrat en moviment sota l’acció d’un jet d’aire	461
10. Conclusions globals i treballs futurs	477
A. Solucionador chtMultiRegionFoam_movingSolid	481
B. Rutines per a QtOctave, per al càlcul de l’evaporació (cos impressor)	485
C. Rutines per a QtOctave, per al càlcul de l’evaporació (túnel)	501
D. Configuració de les simulacions amb OpenFOAM corresponents a l’estudi de les pantalles d’assecatge entre tinters	509
D.1. Estudi de la part corresponent a la impulsió	510
D.1.1. Condicions de contorn	510
D.1.2. Propietats del fluid i turbulència	513
D.1.3. Discretització	514
D.1.4. Paràmetres de control	519
D.1.5. Definició i refinament del mallat	519
D.2. Estudi de la pantalla sencera (impulsió + aspiració)	526
D.2.1. Condicions de contorn	526
D.2.2. Mallat del model	531
D.3. Taula resum de mallat i hores de càlcul	534
D.4. Característiques generals de l’estació de treball	535
E. Configuració de les simulacions amb OpenFOAM corresponents a l’estudi de la transferència de calor per convecció d’un bufador	537
E.1. Condicions de contorn	538
E.2. Propietats del fluid i turbulència	544
E.3. Discretització	545
E.4. Paràmetres de control	550
E.5. Definició i refinament del mallat	550
E.5.1. Dimensions globals del domini (1 llavi amb confinament)	550
E.5.2. Dades generals del mallat (1 llavi amb confinament)	551
E.5.3. Dades generals del mallat (altres casos)	553
E.5.4. Taula resum de de casos estudiats	559
Bibliografia	563

Resum

El motiu per a la redacció de la present tesi doctoral neix de la voluntat i compromís adoptat per COMEXI de posicionar els seus productes en el mercat de manera diferenciada als de la competència fent que els seus productes siguin més sostenibles i respectuosos amb el medi ambient.

És en aquest procés de millora contínua que l'empresa s'ha marcat l'objectiu de reduir el consum energètic de les impressores flexogràfiques, impressores de rotogravat o bé laminadores. Aquestes màquines tenen en comú que totes elles disposen d'un sistema d'assecatge basat principalment en assecat per convecció forçada, el consum energètic del qual pot arribar a valors del 60 – 70% del consum energètic total de la màquina.

Durant el procés d'impressió o laminació s'utilitzen dissolvents (els més habituals són acetats, alcohols o bé aigua), la funció dels quals és facilitar l'aplicació de pigments i resines sobre el substrat que es desitja imprimir; una vegada s'ha imprès el material de suport, cal eliminar aquest solvent de la mostra impresa abans de rebobinar el material, per poder ésser utilitzat posteriorment per a l'envasat de productes. Aquest procés d'assecatge té un consum energètic molt elevat, ja que cal portar a terme l'assecatge en un interval molt breu de temps, al ser les velocitats de treball d'aquestes màquines de varis centenars de metres per minut.

L'ús de tecnologies més sostenibles com per exemple el fet d'utilitzar com a dissolvent l'aigua, en màquines que han estat dissenyades per a treballar amb dissolvents com els acetats o els alcohols comporten que el sistema d'assecatge no estigui optimitzat energèticament.

L'atenció principal d'aquest treball s'ha centrat en l'estudi del sistema d'assecatge entre tinters d'una impressora flexogràfica, posant l'atenció en concret en la millora de les pantalles d'assecatge entre tinters i deixant en un segon pla el disseny global del circuit d'impulsió o d'aspiració de la màquina.

El procés de millora i de redisseny s'ha basat en aconseguir una velocitat d'impulsió en el llavi de la pantalla d'assecatge el més uniforme possible, facilitant d'aquesta manera el redisseny de la part corresponent a l'aspiració de la pantalla.

El fet d'aconseguir una velocitat al llarg de tot el llavi de la pantalla més estable, ha fet possible que el cabal d'aspiració necessari per recollir tot l'aire que s'impulsa per a cadascuna de les pantalles sigui menor. D'aquesta manera s'ha pogut, per una banda abaixar la potència necessària del ventilador del circuit d'aspiració entre tinters, i per una altra banda que el menor volum d'aire que s'extrau de la màquina assoleixi una concentració de solvent més elevada, cosa que permet alhora que el

volum de l'incinerador que ha d'instal·lar el client per tractar els gasos que genera la màquina pugui ser de menors dimensions.

El procés de redisseny de la pantalla s'ha fet en base a mesures experimentals fetes en els dissenys de les pantalles actuals, i en els resultats obtinguts mitjançant simulació CFD per modelar el comportament de la pantalla (tant de les actuals com les noves proposades). Sempre que ha estat possible s'ha intentat correlacionar les dades experimentals amb les dades extretes de simulació.

S'han realitzat diversos prototips de pantalla que s'han assajat experimentalment fins a obtenir el concepte final que presentava el comportament desitjat, i s'ha plantejat la industrialització d'aquest disseny per a ésser implementat a una màquina situada al centre tecnològic de l'empresa per validar-lo en condicions de producció.

S'ha fet un estudi paramètric de les diverses variables que entren en joc a l'hora de dimensionar o dissenyar una pantalla d'assecatge entre tinters (del llavi en particular), per tal de determinar aquells factors que afavoreixen de manera més accentuada l'assoliment d'un major coeficient de transferència de calor per convecció de la pantalla. A partir d'aquest estudi serà possible optimitzar la capacitat d'assecatge de les màquines, escollint la configuració més adequada en cada cas.

S'ha generat un model matemàtic que permet fer una estimació teòrica de la capacitat d'assecatge d'una pantalla ja sigui en el cos impressor o bé en el túnel d'assecatge, ja sigui per tintes en base solvent o bé per tintes en base aigua. S'ha comprovat l'ajust dels resultats predits per el model matemàtic amb els resultats que s'han obtingut experimentalment en proves d'impressió reals portades a terme en una impressora flexogràfica.

Com a última aportació, s'ha generat una fulla de càlcul que permet fer una estimació de les emissions de solvent que produeix una màquina quan aquesta està en producció, per a una sèrie de treballs estàndard. En aquest cas, també ha estat possible validar els resultats teòrics amb resultats experimentals obtinguts en màquines reals.

Durant el període del doctorat també s'han portat a terme altres treballs que al no estar tan lligats a la tesi no es mencionen en aquest document, però que també s'hi ha dedicat una quantitat de temps considerable.

Resumen

La motivación para la redacción de la presente tesis doctoral nace de la voluntad y compromiso adoptado por COMEXI de posicionar sus productos en el mercado de manera diferenciada a los de la competencia de manera que sus productos sean más sostenibles, a la vez que respetuosos, con el medio ambiente.

Es en este proceso de mejora continuada que la empresa se ha marcado el objetivo de reducir el consumo energético de las impresoras flexográficas, impresoras de rotograbado así como de las laminadoras. Estas máquinas tienen en común que todas ellas disponen de un sistema de secado basado principalmente en secado por convección forzada, el consumo energético del cual puede llegar a valores del 60 – 70 % del consumo energético total de la máquina.

Durante el proceso de impresión o también de laminado se utilizan disolventes (los más comunes son acetatos, alcoholes o bien agua), la función de los cuales es facilitar la aplicación de pigmentos y resinas sobre el sustrato que se desea imprimir; una vez se ha impreso el material de soporte, es necesario eliminar este solvente de la muestra impresa antes de rebobinar el material, para poder ser utilizado posteriormente para el envasado de productos. Este proceso de secado tiene un consumo energético muy elevado, ya que se debe llevar a tiempo el secado en un intervalo de tiempo muy breve, al ser las velocidades de trabajo de estas máquinas de varios centenares de metros por minuto.

El uso de tecnologías más sostenibles como por ejemplo el hecho de utilizar como disolvente el agua, en máquinas que han sido expresamente diseñadas para trabajar con disolventes como los acetatos o los alcoholes comporta que el sistema de secado no esté optimizado energéticamente.

La atención principal de este trabajo se ha centrado en el estudio del sistema de secado entre tinteros de una impresora flexográfica, centrandolo en concreto en la mejora de las pantallas de secado entre tinteros y dejando en un segundo plano el diseño global del circuito de impulsión o aspiración de la máquina.

El proceso de mejora y de rediseño se ha basado en conseguir una velocidad de impulsión en el labio de la pantalla de secado lo más uniforme posible, facilitando de esta forma el rediseño de la parte correspondiente a la aspiración de la pantalla. El hecho de conseguir una velocidad a lo largo de todo el labio de la pantalla más estable, he hecho posible que el caudal de aspiración necesario para recoger todo el aire que se impulsa por cada una de las pantallas sea menor. De esta manera ha sido posible, por un lado reducir la potencia necesaria del ventilador del circuito de aspiración entre tinteros, y por otro lado que el menor volumen de aire que se extrae

de la máquina alcance una concentración de solvente más elevada, cosa que permite también que el volumen del incinerador que ha de instalar el cliente para tratar los gases que genera la máquina pueda ser de menores dimensiones.

El proceso de rediseño de la pantalla se ha llevado a término en base a medidas experimentales hechas en los diseños de las pantallas actuales, y en base a los resultados obtenidos mediante simulación CFD para modelar el comportamiento de la pantalla (tanto de las pantallas actuales como de las nuevas propuestas). Siempre que ha sido posible se ha intentado correlacionar los datos experimentales con los datos extraídos de simulación.

Se han realizado diversos prototipos de pantalla que se han ensayado experimentalmente hasta obtener el concepto final que presentase el comportamiento deseado, y se ha planteado la industrialización de este diseño para ser implementado en una máquina situada en el centro tecnológico de la empresa para validarlo en condiciones de producción.

Se ha realizado un estudio paramétrico de las diferentes variables que entran en juego a la hora de dimensionar o diseñar una pantalla de secado entre tinteros (del labio en particular), con tal de determinar aquellos factores que favorecen de manera más acentuada el logro de un mayor coeficiente de transferencia de calor por convección de la pantalla. En base a este estudio será posible optimizar la capacidad de secado de las máquinas, eligiendo la configuración más adecuada en cada caso.

Se ha generado un modelo matemático que permite hacer una estimación teórica de la capacidad de secado de una pantalla ya sea en el cuerpo impresor o bien en el túnel de secado, ya sea por tintas en base solvente o por tintas en base agua. Se ha comprobado el ajuste de los resultados predichos por el modelo matemático con los resultados que se han obtenido experimentalmente en pruebas de impresión reales llevadas a cabo en una impresora flexográfica.

Como última aportación, se ha generado una hoja de cálculo que permite hacer una estimación de las emisiones de solvente que produce una máquina cuando ésta está en producción, para una serie de trabajos estándar. En este caso, también ha sido posible validar los resultados teóricos con los resultados experimentales obtenidos en máquinas reales.

Durante el período del doctorado también se han llevado a cabo otros trabajos que al no estar tan ligados a la tesis no se mencionan en este documento, pero que también han requerido de una cantidad de tiempo considerable.

Summary

The reason for the writing of this doctoral thesis arises from the commitment adopted by COMEXI in order to put its products in the market in a differentiated way to those of the competitors, making his products more sustainable and environmentally friendly.

Is in this process of continuous improvement that the company has set the goal to reduce the energy consumption of the flexographic presses, rotogravure presses as well as laminators. All these machines have in common that all of them have a drying system mainly based on forced convection drying, whose consumption can reach values near to 60 – 70% of total machine's consumption.

In the printing process as well as in the laminating process, solvents are used (the more commonly used are acetates, alcohols or water), their function is to facilitate the application of pigments and resins over the substrate to be printed; once the support material has been printed, this solvent must be removed from the printed sample before rewinding the material, so that it can be used later for packaging of products. This drying process has a very high energy consumption, because it is necessary to perform the drying in a very short interval of time, since the working speeds of these machines are several hundred meters per minute. The use of more sustainable technologies such as the use of water as solvent, in machines that have been designed to work with solvents such as acetates or alcohols, provokes that the drying system is working in a not optimized way.

The main focus of this work has focused on the study of the drying system between drying decks of a flexographic printer, focusing in particular on the improvement of the drying screens located between consecutive drying decks. The overall design of impulsion or suction circuit of the machine has been left as a secondary issue.

The improvement and redesign process has been based on achieving a uniform speed distribution all over the length nozzle, thus has made easier the redesign of the part corresponding to screen's aspiration.

The fact of achieving a more stable speed along the nozzle, has made possible to reduce the suction flow necessary to collect all the air that is fed into each screen. In this way, on the one hand, it has been possible to decrease fan's suction power needed on the circuit, and on the other hand the lower quantity of volumetric air flow that is extracted from the machine reaches a higher solvent concentration, which means that the volume of the incinerator that has to be installed by the client to handle the gases generated by the machine, could be smaller.

The redesign process of the screen has been based on experimental measurements

made in the available designs of current screens, and also on the results obtained through CFD simulation to model the behavior of the screen (both current and new proposals). Whenever possible, it has been tried to correlate the experimental data with the simulation data.

Several screen prototypes have been performed and have been tested before obtaining the final concept that reached the desired performance; later, the last version, has been industrialized with the aim of being implemented in a machine located in the technology center of the company to validate it under production conditions.

A parametric study has been made of the various variables that come into play when designing a drying screen between decks (the parameters related to the nozzle), in order to determine those factors that increase in a more accentuated way the achievement of a higher value of the heat transfer convection coefficient of the screen. From this study it will be possible to optimize the drying capacity of the machines, choosing the most appropriate configuration in each case.

A mathematical model has been created that allows to calculate a theoretical estimation of the capacity of a drying screen either in the printing decks or in the drying tunnel, either by solvent-based inks or by water-based inks. The adjustment of predicted results by the mathematical model have been checked with the results that have been obtained experimentally in real print tests carried out in a flexographic printer.

As a last contribution, a spreadsheet has been created in order to estimate solvent emissions produced by a machine under working conditions, for some standard works. In this case, it has also been possible to validate the theoretical results with experimental results obtained in real machines.

During the doctorate, some other works have also been carried out, which, when not being so related to the thesis, are not mentioned in this document, but they have taken a considerable amount of time.

1. Presentació de COMEXI

En aquest capítol es presenta una breu introducció en la història de l'empresa i la seva evolució des dels seus inicis fins a l'actualitat; també es fa una presentació de les diverses línies de producte de l'empresa. La informació continguda en aquest capítol s'ha extret de la referència bibliogràfica [42] així com de la web de l'empresa [59].

1.1. Història de l'empresa

La història de Comexi començà l'any 1954 quan el senyor Manel Xifra Boada fundà **Construccions Mecàniques Xifra** en un petit taller al barri de Vista Alegre de Girona; avui en dia l'empresa està situada a una gran planta a Riudellots de la Selva al polígon industrial Polingesa (des de l'any 1998), i té fàbriques a l'estranger i una gran vocació internacional.

Comexi és una empresa que ha combinat la seva capacitat d'innovació i d'adaptació, amb els valors essencials inspirats per els seus fundadors, el senyor Manel Xifra (1928 - 2005) i la senyora Maria Loreto Pagès (1930 - 2002), i que han proporcionat a l'empresa un caràcter familiar que li aporta una gran fortalesa.

1.1.1. El primer espai (1954 - 1956)

La fundació de Comexi es va portar a terme en el carrer Taquígraf Martí, en un taller de $150m^2$ que el senyor Manel Xifra va muntar conjuntament amb el seu oncle, el senyor Manel Boada i amb el senyor Joan Viñas Tarrés. Aquest taller va néixer amb la vocació de donar servei a les indústries papereres i tèxtils de la ciutat, tot fent feines de manteniment i fabricació d'equips mecànics per a la indústria. El nombre d'empreses de la indústria tèxtil i paperera en els primers anys des de la fundació de Comexi varen proporcionar un volum de feina constant i exigia també als treballadors de l'empresa una bona preparació tècnica.

1.1.2. El segon espai (1957 - 1961)

A començaments de l'any 1957, Comexi es trasllada a la plaça Balmes a Santa Eugènia de Ter, un barri del municipi de Girona; en aquelles dates es tractava

d'una zona semi urbana en un terme municipal eminentment agrari. El senyor Xifra s'associà amb el senyor Ramon Font, passant Construccions Mecàniques Xifra a tenir quatre socis l'any 1957; però el Sr. Font es va desvincular al cap de poc de l'empresa.

En aquest espai l'empresa ja comptava amb una superfície de taller de $350m^2$ i un total de 50 treballadors; és durant aquesta etapa, que el taller es consolida. Durant els anys 1956 - 1959 Comexi es va anar especialitzant en la construcció de maquinària especialment dedicada al sector de la indústria paperera.

A finals dels anys 50 i principis dels anys 60 el Sr. Xifra va decidir iniciar la producció d'impressores flexogràfiques arran d'un viatge que va realitzar al sud de França, per així poder donar servei als mercats del plàstic aleshores emergents.

De mica en mica el plàstic va anar substituint els materials d'envasat de molts productes, sobretot dels aliments. El fet de l'aparició dels grans supermercats va propiciar que l'envàs dels productes passés a tenir un paper rellevant en el moment de compra, ja que els colors i l'emalatge ajudaven a diferenciar els productes dels de la competència. En aquell moment molts productes varen passar de la venda a granel a vendre's envasats, i això va comportar que era necessari que l'aparença de l'envàs d'aquests productes els fes més atractius.

La primera impressora flexogràfica que va fabricar l'empresa era la CF 2/35, una màquina de dos colors i que tenia uns $35cm$ d'amplada, es va dissenyar especialment per a la impressió de plàstic, i era una màquina rotativa.

La primera CF 2/35 que es va fabricar té assignat un lloc d'honor al hall d'entrada de Comexi al polígon de Riudellots de la Selva, en un clar homenatge als orígens de l'empresa.

1.1.3. El tercer espai (1962 - 1998)

És durant aquest període en què l'empresa s'expandeix i es consolida el projecte, primer en l'espai físic de la nova planta de Sant Narcís amb una superfície de $2000m^2$ i posteriorment a Sant Narcís i a la carretera Barcelona alhora. Va ésser a Sant Narcís on l'empresa va créixer, ja que es va contractar més personal, es varen renovar màquines i se'n varen adquirir de noves, i es va dividir l'empresa en dues naus on en una d'elles es realitzava el muntatge de les màquines i en l'altra es mecanitzaven els components d'aquestes.

A finals de la dècada dels 60 Comexi va considerar que el futur de l'empresa depenia de la seva capacitat d'exportació, i per tant va iniciar el seu procés d'internacionalització.

L'any 1966 es va construir la primera impressora de tambor central de quatre colors. L'any 1967 es creà el concepte de grup amb la fundació de Coemter (dedicada a la fabricació de confeccionadores de bosses de plàstic), i Elpa especialitzada en planxisteria. L'any 1970 s'incrementa el volum d'exportació de productes i s'assisteix a les

fires més importants d'arreu del món. El 1972 es construeix la primera impressora de rotogravat. El 1973 es crea la primera impressora de sis colors de tambor central.

1.1.4. El quart espai (1979 - 1998)

Als anys 80 el centre de mecanització de COMEXI es va desplaçar a la carretera de Barcelona de Girona, a poca distància de les naus de Sant Narcís.

S'implanten les cèl·lules de treball que es dediquen cadascuna d'elles a la producció d'un grup de parts o família. Totes les parts d'una família són processades amb el mateix grup de màquines, i les màquines similars poden ésser agrupades en les mateixes cèl·lules si processen la mateixa tipologia de parts.

L'any 1975 – 1976 s'aposta per a l'automatització de màquines mitjançant el control numèric.

Durant la dècada dels 80 Comexi adquireix la foneria Fungisa, mostrant la voluntat del fundador de controlar el màxim possible tot el procés productiu, des dels materials emprats fins al producte final.

L'any 1984 es presenta la primera impressora de 8 colors de tambor central.

L'any 1992 es fundà Enviroxi, una empresa del grup, destinada a la fabricació d'elements perifèrics per a la indústria del convertint, i pel compliment de normatives mediambientals.

El 1995 es posa la primera pedra de la nau del Polígon Industrial de Girona a Riudellots de la Selva. Aquest mateix any Comexi participa a la Fira Internacional DRUPA.

El 1996 es dissenya la primera impressora de 8 colors amb canvis ràpids amb sistemes de camises.

1.1.5. El cinquè espai (1998 - actualitat)

El creixement de Comexi com a empresa i la necessitat d'un espai insígnia que aglutinés la producció i alhora permetés veure la dimensió que ha adquirit l'empresa, va propiciar el trasllat de la fàbrica de Sant Narcís i de la Carretera Barcelona al Polígon Industrial de Riudellots de la Selva. En l'actualitat, la fàbrica té $39.000m^2$ en una parcel·la de $53.000m^2$ de sòl en total.

A finals de l'any 2002, Comexi obrí una planta de muntatge de maquinària al Brasil per tal d'incrementar la proximitat amb els clients sud-americans; la planta està ubicada a Montenegro.

L'any 2010 s'ha incorporat a Comexi la tecnologia i l'experiència de més de 50 anys en impressores de rotogravat en el sector de l'envàs flexible, a través de l'experiència aportada per l'equip d'Acom.

El 2013 s'inaugura la planta de mecatrònica, situada a MasJoals.



Figura 1.1.: Vista aèria de la nau de muntatge i oficines en primer pla; més al fons de la imatge, la nau de mecanització [59]



Figura 1.2.: Sr. Xifra i Sra. a la inauguració de les instal·lacions de Riudellots de la Selva [59]

1.2. Missió i valors de COMEXI

Missió

La missió de COMEXI GROUP és assolir una posició de lideratge a nivell mundial, en el disseny, producció i comercialització de béns d'equip, productes i prestació de serveis en el sector de l'envàs i embalatge flexible sobre films plàstics, paper, cartró, alumini i els seus compostos.

S'ofereix al client una solució global, tot proporcionant-li equips competitius i personalitzats, servei, suport, i finalment innovació i coneixement a través del Comexi CTec.

Valors

Cinc són els valors que sostenen la manera de procedir de Comexi: seriositat, compromís, senzillesa, humanitat i austeritat. Seriositat, en el sentit de mostrar el més alt nivell de dedicació i responsabilitat en l'interès o la preocupació d'un client. Compromís, assegurant i garantint que es complirà amb la paraula donada. Senzillesa, mantenint la naturalitat de la persona, amb valors com l'honestedat, la humilitat i l'esforç. Humanitat, amb professionals ètics, justos, amb sentit comú, i responsables. Austeritat, generositat, respecte i solidaritat, valorant les persones per allò que són i no per el que tenen.

1.3. Línies de producte

Són diverses les línies de producte que aporta l'empresa per al sector de l'envàs flexible: flexo, laminating, slitting, òfset, gravure i finalment el cloud.

Flexo

La flexografia és una tècnica d'impressió en relleu, que es basa en la transferència de la tinta que s'ha adherit en aquest relleu cap a un substrat o suport que ha de ser imprès. En l'actualitat, Comexi només fabrica màquines de tambor central, en què el material abraça el tambor mentre se li apliquen els diferents colors consecutivament.



Figura 1.3.: Impressora flexogràfica F2MC [59]

Laminating

La laminació consisteix en ajuntar diverses capes de material fins arribar a formar una sola estructura que proporcioni les propietats necessàries a l'envàs, com per exemple protecció i estètica del producte que s'envasa.



Figura 1.4.: Laminadora ML1 [59]

Slitting

Les talladores permeten passar de la bobina impresa i / o laminada de gran diàmetre i amplada a bobines de dimensions més petites que seran les que alimentaran les màquines d'envasat.



Figura 1.5.: Talladora S2DT [59]

Òfset

La impressió en òfset es basa en el principi que l'element que conté la imatge que es vol imprimir no traspasa la tinta directament al suport o substrat, sinó que la imatge en primer lloc es transfereix sobre un cautxú rotatiu i després és aquest qui transfereix la imatge al suport.

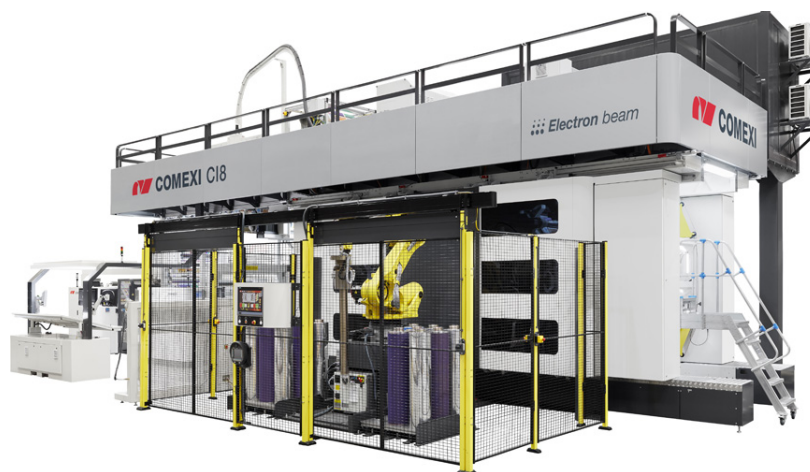


Figura 1.6.: Impressora òfset CI8 [59]

Gravure

En la tècnica d'impressió per rotogravat, la tinta es transfereix gràcies a unes depressions que s'han fet en el propi corró d'impressió (just el contrari del que es fa amb les impressores flexogràfiques). La tinta s'allotja en aquestes depressions fins que entra en contacte amb el suport que es desitja imprimir.



Figura 1.7.: Impressora R2 [59]

Cloud

Aquest software proporciona al client dades per a l'anàlisi de la seva producció, i ajudar-los a comprendre les dades i processos associats al seu procés productiu.



Figura 1.8.: Comexi cloud [59]

2. Introducció a la flexografia

L'objectiu d'aquest capítol es fer una introducció al procés de flexografia, i comentar aquells punts que es consideren clau per a poder comprendre la informació que es presenta en capítols posteriors. La informació que aquí s'exposa s'ha recopilat principalment de les referències bibliogràfiques [63], [64] i [62].

2.1. Procés de packaging

L'evolució de la indústria flexogràfica deu gran part del seu creixement a l'elevat nombre de grans superfícies i supermercats que s'han instaurat en els últims anys. L'envasat dels productes mitjançant l'embalatge flexible obeeix no només a funcions purament estètiques que ajuden a diferenciar un producte del de la competència, sinó que també aporta una protecció contra cops o rascades, i també ajuda a preservar el producte envasat dels factors externs actuant com a protecció contra la contaminació o bé actuant com a barrera al vapor d'aigua, a aromes i la llum per exemple.



Figura 2.1.: Mostres d'embalatge flexible [63]

El procés per a la obtenció d'un embalatge flexible es pot dividir en diferents processos, que es llisten a continuació: en una etapa inicial es fabrica el material de tipus film mitjançant un procés d'extrusió; tot seguit aquest film s'imprimeix amb el disseny final que el client vol aplicar a l'embalatge del seu producte; en aquells casos

en què sigui necessari es lamina el material imprès amb altres materials per aconseguir que el material laminat aporti unes determinades propietats, com per exemple actuar com a barrera (laminats de dues o més capes); el disseny que s'imprimeix en la bobina de film no té per què ocupar tota l'amplada de la bobina, doncs és molt habitual que en una mateixa bobina inclogui diverses repeticions del disseny fins a ocupar-ne tota l'amplada; la següent etapa consisteix en dividir la bobina original que conté diverses repeticions del disseny en bobines més estretes que continguin un sol disseny; com a última etapa, cadascuna d'aquestes bobines s'utilitza en el procés d'envasat del producte final.

2.2. Definició de flexografia

La flexografia és un sistema d'impressió directe (el clixé transfereix la imatge desitjada directament sobre el material que es desitja imprimir), on la forma que s'aplica consisteix en una planxa flexible de material polimèric que conté el relleu en negatiu de la imatge que es vol imprimir.

Es tracta de màquines rotatives que s'alimenten de material generalment de tipus plàstic que prèviament ha estat enrotllat en una bobina, i on s'utilitzen tintes d'assecatge ràpid. Aquest procés d'impressió va començar a desenvolupar-se a gran escala als Estats Units als voltants del 1920.

2.3. Procés d'impressió

A l'hora d'imprimir un treball es diferencia entre la impressió de fons, línies o text i finalment trames o quadricromia.

Fons

L'aplicació d'un fons s'acostuma a fer sobre materials transparents, essent el color blanc el que s'utilitza de manera més habitual; l'objectiu principal és fer que ressalti més el disseny que s'ha imprès. La impressió d'un fons implica una aportació d'un gran volum de tinta, i per tant sol ser un dels elements que és més sensible a la capacitat d'assecatge de la màquina, ja que limitarà la velocitat d'impressió en la majoria dels casos.

Text

La major part de dissenys d'envàs flexible incorporen textos, línies i codis de barres. La impressió d'aquests elements requereix un volum mig de tinta.

Quadricromia

Les quadricromies s'utilitzen per imprimir imatges, degradats, o dibuixos de múltiples colors; la impressió d'aquests elements requereix tenir el volum de tinta molt

controlat. La utilització de la quadricromia permet obtenir una gamma de colors més àmplia a partir de la mescla de quatre colors (CMYK - Cyan, Magenta, Yellow i Black).

A títol d'exemple es mostra una imatge impresa a partir de la mescla dels quatre color CMYK:



Figura 2.2.: Exemple de l'efecte de superposició dels quatre colors d'una quadricromia [60]

Colors directes

Pantone és una empresa situada als Estats Units d'Amèrica, que va idear un sistema per identificar colors, i que és àmpliament utilitzat per a les arts gràfiques. Cadascun dels colors del mostrari està enumerat i es pot recrear de manera exacta.

Diferències entre pantone i quadricromia:

-Els colors pantone s'utilitzen per a la impressió de colors directes (no es genera la tonalitat final a partir de la superposició d'altres colors com en la quadricromia). El contenidor de tinta ja conté el color amb la tonalitat desitjada.

-La impressió per quadricromia, genera el color desitjat a partir de la superposició de diverses capes en diverses proporcions dels colors cian, magenta, groc i negre.

-Els colors pantone presenten una nitidesa i una qualitat més alta que no pas que la impressió mitjançant quadricromia.



Figura 2.3.: Mostrari de colors de l'empresa Pantone [61]

En quant al procés d'impressió cal diferenciar l'etapa de disseny que es porta a terme per part d'un creatiu i és qui elabora el concepte original, de l'etapa d'adaptació on el disseny anterior s'adequa per part d'un impressor per a poder ésser imprimible. En l'etapa de disseny, el creatiu combina text, imatges i dibuixos, però en la majoria dels casos no es té en compte el sistema d'impressió amb el qual s'imprimirà aquest treball; es dóna preferència al criteri creatiu respecte del criteri productiu. De fet, les proves d'impressió que es porten a terme amb aquest disseny no reproduïxen de manera fidedigna el resultat que s'obtindrà amb el sistema d'impressió amb el qual s'imprimirà finalment el treball real.

En l'etapa d'adaptació, és l'impressor qui adapta el disseny del creatiu de manera que pugui ésser portat a terme realment amb el sistema d'impressió previst, tot adaptant el disseny al nombre de colors disponible a la impressora i determina tots aquells paràmetres relatius a la impressió (lineatura de la trama, punt mínim imprimible, i angle de trama). Una vegada es té el treball a punt es realitza una prova d'impressió de contracte segons el sistema d'impressió que s'utilitzarà realment.

Com a etapa final s'aplica el disseny obtingut en l'etapa d'adaptació en una planxa que serà la utilitzada en el procés d'impressió.

2.4. Tintes per a flexografia

La tinta és aquell element que imparteix color i que permet visualitzar la imatge impresa sobre el substrat. Aquesta, està formada per pigments, resines, dissolvents i additius, que mitjançant un procés d'impressió reproduïxen una imatge o disseny sobre un suport.

2.4.1. Components bàsics d'una tinta

Pigments

És l'element responsable d'impartir color; es tracta d'una matèria indissoluble que ha estat mòlta per reduir la dimensió de les seves partícules fins arribar a dimensions de l'ordre de micres. Com que aquest element no és soluble, la incorporació del pigment a la tinta es fa mitjançant la dispersió d'aquest pigment en un medi resínic de manera que el resultat final sigui el propi pigment envoltat de resina.

Resines

Són les que determinen l'aplicació d'una tinta i les característiques desitjades en l'element imprès. Actua com a medi per a dispersar el pigment, és a dir que la facilitat que aquest pigment es pugui transferir al suport final una vegada ha estat fluïdificat. La resina determina (entre d'altres propietats) que una determinada tinta pugui imprimir-se sobre un suport específic, l'adherència que aquesta tindrà sobre el suport, etc.

Dissolvents

La seva funció és dissoldre la resina de manera que el resultat final sigui un líquid amb la viscositat adequada per a impressió, i aportar les propietats d'assecatge necessàries gràcies a la seva volatilitat. Dintre el grups de solvents, cal distingir entre dissolvent verdader (dissol la resina continguda en la tinta), co-dissolvent (controla la viscositat) i finalment els retardants o accelerants (influeixen en l'assecatge de la tinta).

Aquests solvents han de poder dissoldre la resina, i a més a més s'han de poder evaporar progressivament. La tinta no s'ha d'assecar sobre de l'anilox, però si que s'ha d'assecar una vegada aplicada sobre el film, per evitar problemes de repintat en la bobina impresa i problemes d'olor de solvent residual en el material rebobinat.

Additius

Utilitzats per potenciar certes propietats finals d'una tinta. Els principals additius són ceres, antioxidants, plastificants, antiespumants, tensioactius, promotors d'adherència...

Tota tinta és una mescla dels elements anteriors per tal d'impartir color; en cas que el contingut de pigment sigui zero aleshores es tracta d'un vernís o recobriments. Una vegada aplicada aquesta tinta o recobriments sobre el substrat, i una vegada s'ha assecat, el que s'obté és una pel·lícula sòlida molt fina amb un gruix de micres.

La mescla d'aquests quatre components en les proporcions adequades permet aconseguir els resultats i propietats desitjades per l'impressor. De manera general, es pot establir un determinat percentatge de cada element en una tinta segons la taula. 2.1:

	Pigments	Resines	Additius	Dissolvents
%	10 ~ 15	15 ~ 30	~ 5	50 ~ 70

Taula 2.1.: Percentatge de cada element bàsic d'una tinta

2.4.2. Tipologies de tintes

Tintes base aigua

La utilització d'aquestes tintes ve motivada per les limitacions cada vegada més restrictives imposades per la reglamentació vigent en tant que emissions de dissolvents a l'atmosfera. Aquestes tintes són més respectuoses amb el medi ambient ja que el solvent en comptes de tractar-se d'alcohols és essencialment aigua; a més a més la seva utilització implica menys perills ja que els vapors que es produeixen del dissolvent quan s'asseca no són inflamables, a diferència del que succeeix amb les tintes en base solvent.

En les tintes en base aigua el seu dissolvent principal és l'aigua, tot i que en les tintes que s'utilitzen per a la impressió sobre substrat de tipus plàstic incorporen alcohols en una proporció de fins a un 15% aproximadament. La motivació d'introduir alcohols en aquestes tintes és per augmentar la velocitat d'assecatge i disminuir la tensió superficial de la tinta.

Un dels paràmetres clau d'aquestes tintes és el seu pH, per valors inferiors a 8 comporta una variació important en la viscositat de la tinta que pot obstruir algunes parts del clixé; valors del pH superiors a 9 comporten una disminució de la velocitat d'assecatge.

En tant que els aspectes negatius, el més important que caldria destacar és que són molt més exigents en el sistema d'assecatge ja que l'energia requerida per a la evaporació de l'aigua és molt més alta que la requerida per evaporar solvent. Un altre factor limitant és la dificultat de que la làmina de tinta quedi ben aplicada o ancorada sobre el substrat de tipus plàstic degut a la major tensió superficial de l'aigua en relació als solvents convencionals basats en alcohols. A més a més, cal tenir en compte el fet que aquestes tintes tendeixen a formar espumes, tot dificultant-ne la impressió.

Tintes base solvent

En les tintes en base solvent, els dissolvents predominants són els alcohols i els èsters com per exemple l'Etanol i l'Acetat d'Etil respectivament.

En contraposició a les tintes en base aigua, les tintes en base solvent generen emissions de solvents que es barregen amb l'aire utilitzat en el procés d'assecatge i això implica que aquest aire quedi contaminat i no es pugui abocar directament a l'atmosfera; depenent de les normatives ambientals de cada país serà necessari tractar

amb menor o major mesura les emissions d'aquests elements contaminants. També cal tenir en compte la perillositat associada a la inflamabilitat d'aquests gasos continguts en l'aire a temperatures elevades, que poden implicar risc d'explosió. Pel que fa als requeriments energètics, aquestes tintes requereixen molta menys energia per a ésser assecades que les tintes en base aigua, i per tant permeten treballar a velocitats de màquina molt més elevades.

2.5. Elements clau d'una màquina flexogràfica

Si es desgrana una impressora flexogràfica en els seus elements clau, aquesta està composta per els elements que es llisten a continuació: desbobinador, cos impressor, assecatge en els tinters del cos impressor, assecatge en el túnel i rebobinador.

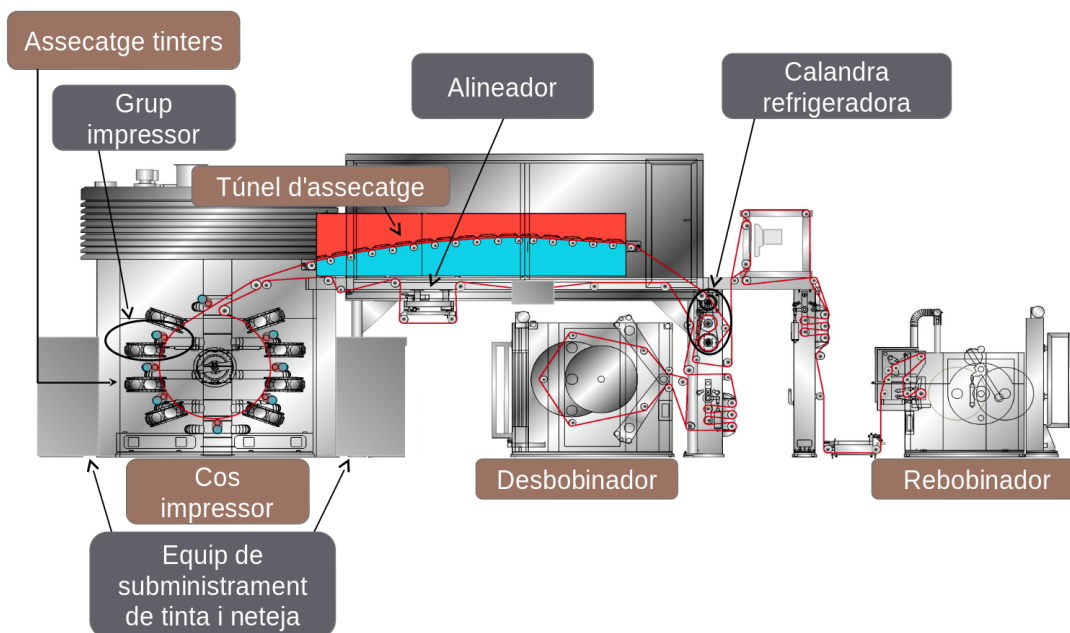


Figura 2.4.: Elements o seccions bàsiques d'una impressora flexogràfica [64]

A més a més d'aquest grup d'elements principals, hi ha altres elements que també cal destacar com per exemple l'alineador de material que és l'encarregat de guiar el material i ajustar-ne correctament la posició en el cos impressor; els equips de subministrament de tinta i neteja que són els encarregats de subministrar la tinta a cadascun dels grups impressors durant el procés d'impressió, i els encarregats de netejar el circuit de tinta una vegada finalitzada la impressió; el grup impressor que és el conjunt d'elements que imprimeix la imatge desitjada sobre el substrat; les

calandres refrigeradores que s'encarreguen de refredar el material imprès després de passar per el túnel d'assecatge de manera que quan aquest es rebobini no es puguin produir tensions o arrugues al material al contraure's al refredar-se; i finalment el conjunt de corrons que guien el material a través de la màquina.

2.5.1. Desbobinador

L'element desbobinador consta d'un eix el qual subjecta una bobina que és en definitiva el material que es desitja imprimir, i que es va aportant de manera continuada durant el procés d'impressió. És important mantenir sota control la tensió del material que aporta el desbobinador, ja que si aquesta tensió és massa elevada pot arribar a provocar que el material pugui lliscar per sobre de la superfície del tambor central, i per tant es podria perdre el registre durant la impressió. En cas que la tensió de desbobinat sigui massa baixa pot provocar que el material quedi atrapat en el cilindre porta clixé.

La tensió del desbobinador es controla en el tram comprès entre el desbobinat del material i fins arribar a l'entrada del tambor central on hi ha l'element pisor.

S'aconseja que la tensió de desbobinat sigui igual o lleugerament menor que la tensió de rebobinat.

2.5.2. Cos impressor

Tambor central

Un dels elements més importants del cos impressor és el tambor central o també anomenat cilindre de contrapressió. Aquest és un element de la màquina que és extremadament delicat i s'ha de tractar amb molta cura, doncs qualsevol irregularitat que pugui tenir el tambor quedarà reflectida en la impressió que es porta a terme tot abaixant la qualitat del treball que s'està imprimint.

El fet de que la màquina disposi d'un únic tambor central enlloc d'un per a cada tinter o grup impressor, facilita en gran mesura el control de registre entre colors. Les màquines que fabrica Comexi actualment disposen de 8 o de 10 colors, i a cada color li correspon un grup impressor.

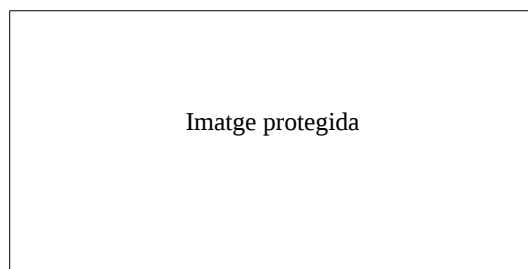


Figura 2.5.: Esquema del control de temperatura del tambor central [64]

La superfície exterior del tambor consisteix en una paret rectificada amb una aplicació o recobriment de plasma de Crom i Níquel que s'anomena *Hastalloy*; aquest plasma endureix la superfície i alhora la protegeix de la corrosió. L'aplicació d'aquest plasma es fa a través d'una pistola que aplica aquestes partícules de metall fos a una temperatura d'uns 1500°C.

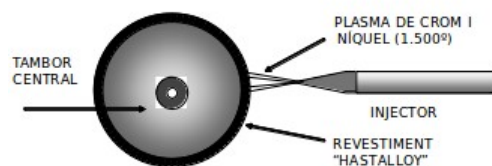


Figura 2.6.: Revestiment Hastalloy del tambor central [64]

A la part interna del tambor central, aquest disposa d'un circuit de refrigeració que garanteix que la temperatura del tambor es mantingui en un valor estable prefixat

en uns “ $T_{tambor} \text{ } ^\circ\text{C}$ ”.

Cal tenir en compte que una variació de temperatura en aquest element d'aquestes dimensions i d'aquesta massa pot provocar una dilatació tèrmica suficientment gran com per a què distorsioni la imatge que es desitja imprimir. Així doncs, és necessari disposar d'aquest circuit de control de temperatura ja que caldrà extreure del sistema la calor que aporten les pantalles d'assecatge en el cos impressor durant el propi funcionament de la màquina.

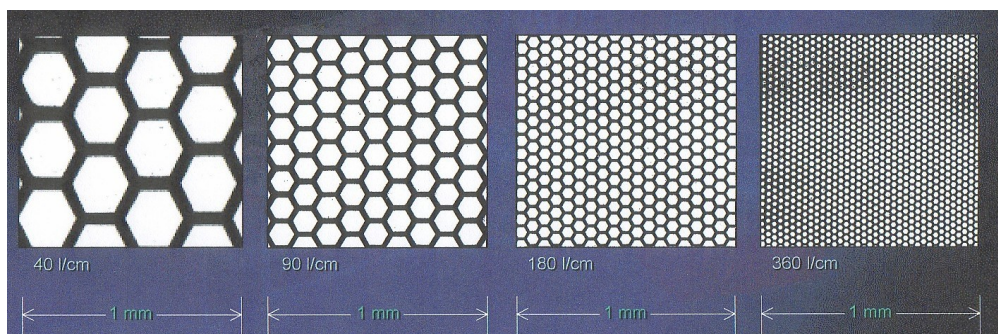
En tant que manteniment d'aquesta part de la màquina, s'ha de tenir molta cura i evitar que es colpegi, es ratlli o s'hi acumuli tinta o s'embruti, ja que qualsevol d'aquestes coses es detectarà durant el procés d'impressió.

Grup impressor

Un grup impressor flexogràfic està format per els elements que es mostren a la fig. 2.8, i són: el cilindre porta clixé, l'anilox i la rasqueta.

El cilindre porta clixé és l'element que serveix com a base per a la fixació del clixé. El clixé té en relleu el negatiu de la imatge que es vol imprimir, i a l'entrar en contacte amb l'anilox queda mullat amb tinta que posteriorment es transferirà al substrat. La longitud de repetició de la imatge depèn del diàmetre del cilindre porta-clixé que s'utilitzi.

L'anilox està gravat per milions de petites cel·les o alvèols, la funció dels quals és recollir i transferir la tinta provinent de la rasqueta i tot seguit transferir-la al clixé. És possible variar la quantitat de tinta que es transfereix, en funció de la densitat d'alvèols per centímetre lineal i de la profunditat d'aquests. L'aportació de tinta es mesura en cm^3/m^2 .



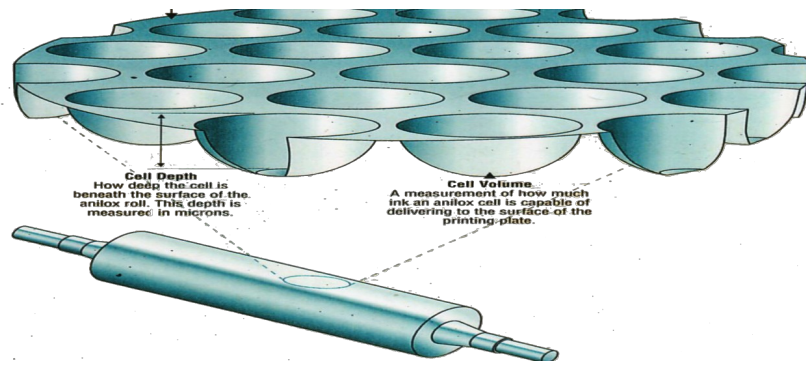


Figura 2.7.: Diferents densitats d'alvèols per centímetre lineal en un anilox, i volum dels alvèols per centímetre quadrat [63]

La rasqueta consisteix en una cambra tancada que subministra la tinta a l'anilox. La cambra de rasqueta està proveïda de dues ganivetes d'acer, una d'elles situada en sentit negatiu que és l'encarregada de dosificar la tinta (treballa en el sentit invers de rotació de l'anilox), i l'altra en sentit positiu que s'encarrega de mantenir la tinta dintre de la cambra de la rasqueta (treballa en el mateix sentit que l'anilox). La tinta s'injecta per la part inferior de la rasqueta i el retorn de l'excendent de tinta es fa a partir dels extrems superiors de la rasqueta tot dirigint-la de nou cap a la cubeta de tinta.

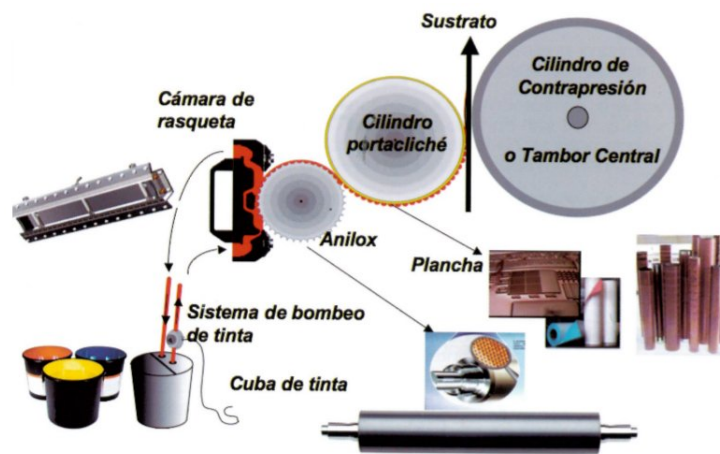


Figura 2.8.: Elements d'un grup impressor flexogràfic [62]

Sistema d'entintatge

El sistema d'entintatge està compost d'una cubeta o dipòsit de tinta en el qual s'emmagatzema la tinta que s'utilitza durant el procés d'impressió (a mesura que es va imprimint és necessari anar reomplint aquest dipòsit). Aquesta cubeta disposa d'un sistema agitador que proporciona una homogeneïtat a la mescla, i també té instal·lat un filtre amb la finalitat de retenir possibles partícules de brutícia que s'hagin pogut introduir en el sistema.

La tinta dipositada a la cubeta es bombeja fins arribar a la rasqueta, de manera que s'asseguri que la rasqueta estigui totalment plena de tinta, i amb un valor de pressió que sigui regulable.

El sistema *Excitink* és l'encarregat de mantenir la tinta sota unes condicions controlades de viscositat i temperatura de manera que es mantinguin constants durant tot el procés d'impressió del treball, i que d'aquesta manera no es vegi afectada la qualitat d'impressió del mateix. A més a més, aquest sistema permet enviar tinta cap al tinter (posició impressió), buidar la tinta del tinter cap al dipòsit de tinta, i enviar solvent cap al tinter (posició neteja), entre d'altres funcions.

El control de la viscositat d'una tinta és molt important, ja que un canvi en el valor en la viscositat d'aquesta provocat per una evaporació dels dissolvents presents en la seva composició, pot originar un canvi en la tonalitat de la imatge que s'està imprimint. Se sap que a mesura que s'evapora el dissolvent de la tinta aquesta esdevé més viscosa, i això comporta que el color que s'imprimeix tingui tendència a ser més fosc (al evaporar-se dissolvent de la cubeta de tinta, la concentració de pigment per centímetre cúbic augmenta). El sistema *Excitink* és capaç de mesurar de manera continuada la viscositat de la tinta, i afegir la quantitat de dissolvent necessari per mantenir la viscositat en el valor prefixat.

2.5.3. Assecatge tinters

L'assecatge entre tinters és un dels elements clau de la màquina, i consta de tantes pantalles d'assecatge com el nombre de tinters de la màquina menys un; és a dir, una màquina de 8 colors o grups impressors té 7 pantalles d'assecatge en el cos impressor, així com una màquina de 10 colors té un total de 9 pantalles d'assecatge. L'últim grup impressor no té pantalla d'assecatge ja que tot seguit de la última pantalla hi ha situat el túnel d'assecatge que s'encarrega d'evaporar tota aquella quantitat de solvent que no s'ha assecat en el cos impressor.

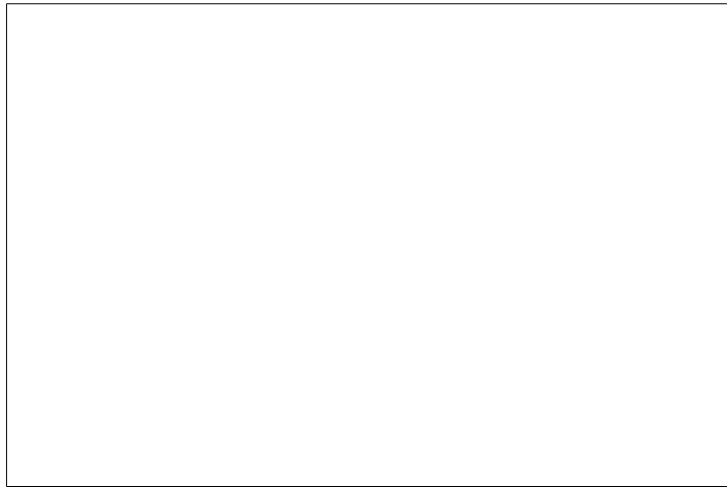


Figura 2.9.: Elements del circuit d'assecatge entre tinters (màquina de 8 colors)
[64]

La finalitat de les pantalles d'assecatge entre tinters és assecar suficientment la imatge que s'ha imprès en el grup impressor precedent a aquella pantalla, com perquè la qualitat de la imatge que es vol imprimir en el grup impressor següent no es vegi afectada pel que s'ha imprès en el grup precedent. Un assecatge entre tinters ineficient podria comportar per exemple que si la imatge que s'ha imprès en

el primer grup impressor no és prou seca quan s'aplica la tinta corresponent del grup impressor següent, aleshores el clixé de l'últim color s'embruti de tinta o s'emporti parcialment la tinta que s'ha imprès sobre el substrat en el primer color, per tant provocant un defecte en la impressió.

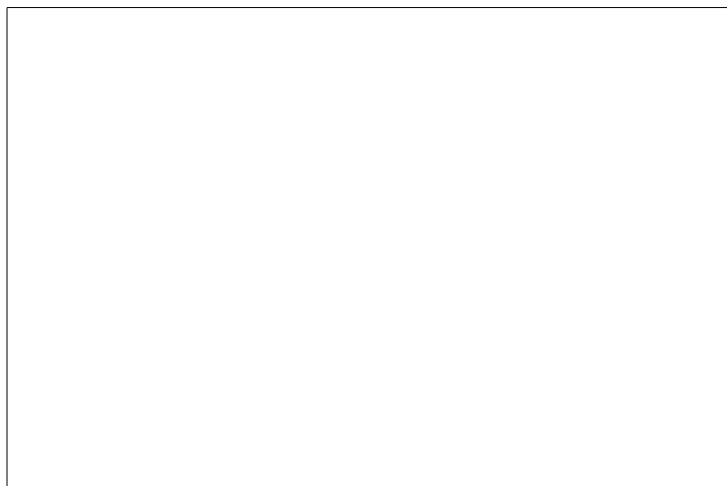


Figura 2.10.: Esquema del recorregut de l'aire en l'assecatge entre tinters [64]

Cal tenir en compte que en l'assecatge en el cos impressor no es busca assecar totalment el que s'ha imprès en els diversos grups impressors, sinó que el que es busca és assecar suficientment com per poder imprimir entre dos colors consecutius sense que es produeixi un defecte en la imatge impresa final.

A la fig. 2.10 es representa el recorregut de l'aire a través del circuit d'assecatge. De color blau es representa l'aire fresc utilitzat durant la impressió, aquest aire passa a través d'un filtre per eliminar les impureses que pugui contenir, passa a través de l'element calefactor o font de calor i tot seguit el ventilador d'impulsió dirigeix aquest aire a través del col·lector d'impulsió cap a les diverses pantalles d'assecatge. De color vermell es representa l'aire corresponent al circuit d'aspiració que és aspirat

per el ventilador d'aspiració que és independent del ventilador d'impulsió. Aquest aire que s'aspira, a través d'un sistema de vàlvules es pot decidir si es dirigeix cap a la sortida de la màquina, o bé es recircula en part cap al circuit d'impulsió (branca de color verd).



Figura 2.11.: Pantalla d'assecatge entre tinters [64]

A la fig. 2.11 es mostra de manera esquemàtica el funcionament d'una pantalla entre tinters, de color vermell la part corresponent a la impulsió, i de color blau la part corresponent a l'aspiració. L'aire que entra per el conducte d'impulsió de la pantalla surt a través del llavi de la pantalla, consistent en una ranura al llarg de tota la llargada de la pantalla; aquest aire que s'ha utilitzat per assecatge i que es fa incidir contra el material que s'imprimeix és recollit seguint el recorregut de les fletxes de color blau, i posteriorment és dirigit cap a la boca d'aspiració o d'extracció de la pantalla.

2.5.4. Túnel d'assecatge

El túnel d'assecatge és l'element de la màquina encarregat d'assecatge la tinta, evaporant totalment o el màxim possible la quantitat de dissolvent que porta associada la pròpia tinta, abans de rebobinar el material. L'objectiu fonamental és obtenir una mostra totalment seca, amb la mínima retenció de solvent possible al substrat.

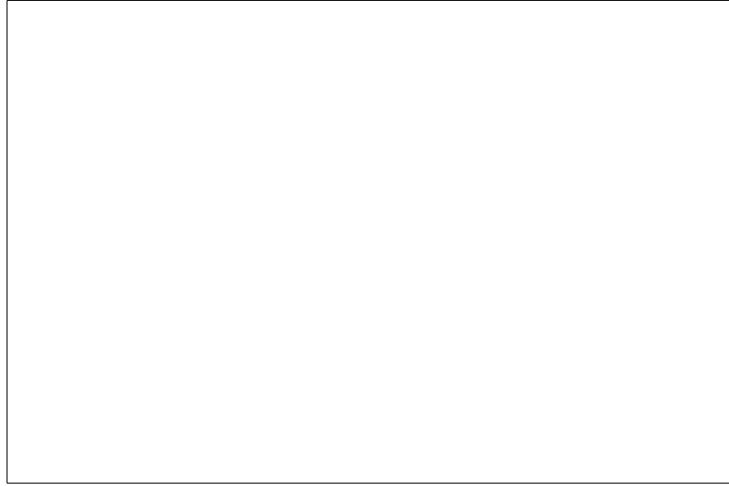


Figura 2.12.: Elements del circuit d'assecatge del túnel [64]

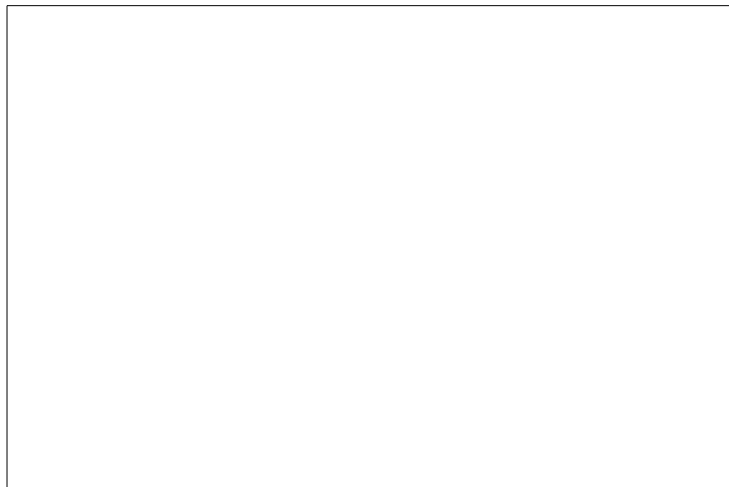


Figura 2.13.: Esquema del recorregut de l'aire en l'assecatge en el túnel [64]

2.5 Elements clau d'una màquina flexogràfica

El circuit que recorre l'aire és igual al que s'ha descrit en el cos impressor; la única diferència està en la disposició espacial que ocupen els diversos elements del sistema d'assecatge, i en la disposició de les pantalles.

En el cas del túnel, aquest consisteix en una cambra tancada amb diverses pantalles col·locades en paral·lel (a excepció dels laterals on hi ha unes ranures per les quals entra i surt el material del túnel).

A la fig. 2.13 es mostra el recorregut de l'aire al llarg del túnel. En blau es representa el recorregut de l'aire al circuit d'impulsió, i en vermell el recorregut del circuit d'aspiració. Malgrat no s'aprecia a la figura, perquè el circuit d'impulsió i aspiració estan a tocar un de l'altre (ha desaparegut la branca de recirculació que apareixia en el circuit de tinters, i ha estat substituïda per una vàlvula) sí que es possible recircular aire del circuit d'aspiració cap al circuit d'impulsió tal i com es feia en el circuit de tinters.

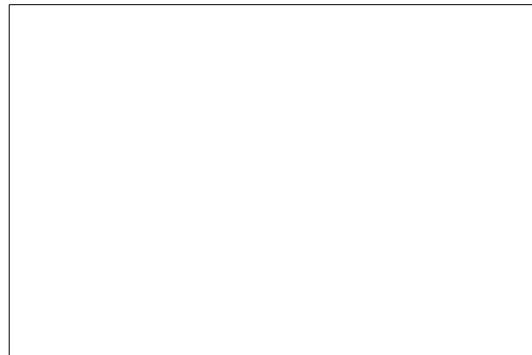


Figura 2.14.: Vista interna de les pantalles del túnel, i els corrons que guien el material [64]

2.5.5. Corrons guia

Els corrons guia són els elements que guien el material en el recorregut que aquest fa a través de tota la màquina. És important mantenir aquests elements amb un estat òptim de manteniment, de manera que oposin la mínima resistència al pas del material, estiguin ben alineats i no tingui restes de tinta o brutícia.

És molt important que els corrons estiguin ben contrapesats ja que les velocitats d'impressió del material poden arribar fins als $400m/min$ o $500m/min$ en algunes màquines.

A la major part dels corrons se'ls ha practicat un ranurat a la seva superfície en forma d'hèlix amb la finalitat de que el material no tendeixi a formar arrugues quan passa a través dels corrons.

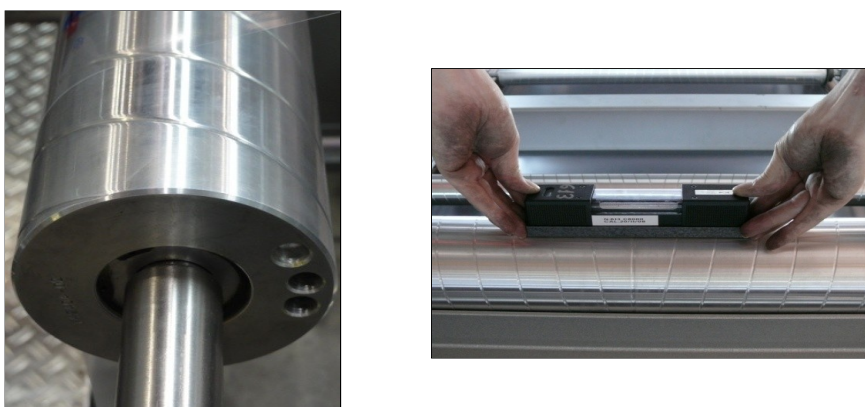


Figura 2.15.: Corrons guia (ranurat en forma d'hèlix i anivellament) [64]

2.5.6. Calandra refrescadora

Aquest element realitza una doble funció, per una banda refrigera el material abans de ser rebobinat, i a més a més controla i corregeix la tensió del material en el túnel d'assecatge (tram entre els dos punts vermells de la fig. 2.16). La calandra està formada per un grup d'elements com el corró amb cel·les de càrrega que llegeix la tensió del material, el corró pisor de goma, la pròpia calandra formada per dos corrons concèntrics formant una cambra entremig d'ells on hi circula aigua per a refrigerar (s'introdueix aigua i es treu de la calandra a través d'una junta rotativa de manera semblant al tambor central), i també es pot disposar d'un refrigerador de temperatura de l'aigua del circuit.

2.5.7. Rebobinador

El rebobinador és l'element de la màquina encarregat de recollir la làmina impresa i tornar-la a bobinar per a ésser utilitzada posteriorment. Com s'ha dit abans, la tensió de rebobinat és lleugerament superior a la de desbobinat, però no ha de ésser excessiva ja que podria arribar a provocar nervis a la superfície de la bobina i també provocar problemes de repintat, i en cas d'una tensió de rebobinat massa baixa es podria donar una falta d'alineació del material així com la formació d'arrugues.

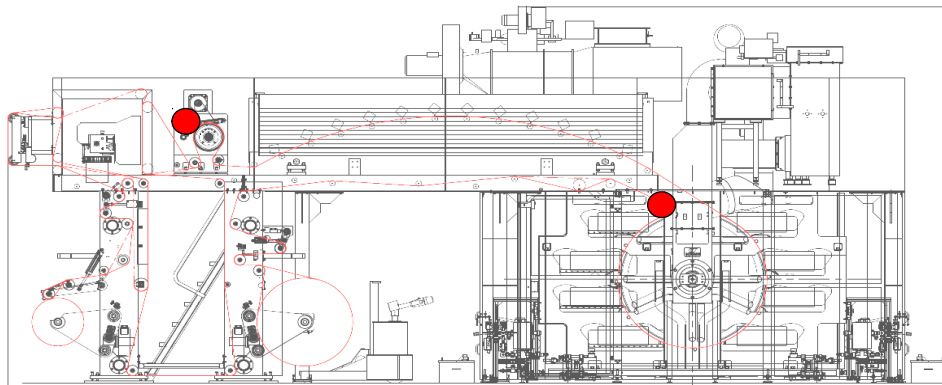


Figura 2.16.: Punts de control de tensió (pisor i calandra refrescadora) [64]

3. Emissions de solvents

3.1. Conceptes previs

Substàncies inflamables

Es tracta de compostos orgànics volàtils, o també anomenats *COV's* formats per gasos, vapors, líquids o mescles d'aquests elements que quan s'encenen poden produir una reacció exotèrmica.

El Reial Decret RD 117/2003 [19] defineix com a compost orgànic aquell compost que contingui carboni i un o més dels elements següents: hidrogen, halògens, oxigen, sofre, fòsfor, silici o nitrogen, llevat els òxids de carboni i els carbonats i bicarbonats inorgànics.

Per altra banda, també defineix els *COV's* com a qualsevol compost orgànic que tingui a $293.15K$ una pressió de vapor de $0.01kPa$ o més.

Límits d'inflamabilitat

Defineixen les concentracions mínimes i màximes d'un vapor o d'un gas que es troba mesclat amb l'aire, en què aquests vapors o gasos són inflamables. La manera més habitual d'expressar aquests límits és en funció del percentatge en volum del vapor de combustible contingut en una mescla de vapor de combustible i aire. En alguns casos aquests límits inferiors o superiors d'inflamabilitat s'anomenen també límit inferior o superior d'explosibilitat, respectivament; el fet que s'opti per una terminologia o l'altra depèn de la velocitat de la combustió, on en el cas que aquesta velocitat sigui molt ràpida es produeix una explosió. Es pot dir doncs, en definitiva, que ambdós termes són intercanviables entre ells.

Qualsevol mescla de combustible-comburent que estigui en forma de gas, vapor, pols o boira té un rang de concentració amb l'aire en el que la mescla de la substància inflamable i aire té propietats explosives. Si la concentració està fora (ja sigui per sota o per sobre d'aquest rang d'explosibilitat), aleshores no es produiria explosió. Aquests límits s'anomenen límit inferior d'explosibilitat *LIE* (*LEL* amb les sigles en anglès), i límit superior d'explosibilitat *LSE* (*UEL*).

Límit inferior d'inflamabilitat o d'explosibilitat (Lower Explosive Limit "LEL")

És la concentració mínima de vapor o gas mesclat amb l'aire, on per sota d'aquest valor no es produirà propagació de flama al posar-se en contacte amb una font d'ignició. Tal i com es mostra a la fig. 3.1, per sota del límit inferior d'explosibilitat la mescla aire-combustible no pot combustionar per falta de combustible.

Límit superior d'inflamabilitat o d'explosibilitat (Upper Explosive Limit "UEL")

És la concentració màxima de vapor o gas mesclat amb l'aire, on per sobre d'aquest valor no es produirà propagació de flama al posar-se en contacte amb una font d'ignició. Tal i com es mostra a la fig. 3.1, per sobre del límit superior d'explosibilitat la mescla aire-combustible no pot combustionar per falta d'oxigen.



Figura 3.1.: Rang d'explosibilitat d'una substància inflamable [20]

Els solvents continguts de manera més usual a les tintes utilitzades en el procés d'impressió flexogràfica o bé en els adhesius de laminació són: Etanol, Acetat d'etil, 1-Metoxi-2-propanol, 1-Etoxi-2propanol, n-propanol i Acetat de n-propil. Els nivells inferior d'explosibilitat per aquest solvents es llisten a la taula. 3.1

3.1 Conceptes previs

	Formulació simplificada	$LEL_{(\%v/v)}$	$M_{(g/mol)}$	$LEL_{(g/m^3)}$
Etanol	C_2H_6O	3.1	46.1	59.5
Acetat d'etil	$C_4H_8O_2$	2.0	88.1	73.4
1-Metoxi-2-propanol	$C_4H_{10}O_2$	1.8	90.1	67.6
1-Etoxi-2-propanol	$C_5H_{12}O_2$	1.3	104.2	56.4
n-Propanol	C_3H_8O	2.1	60.1	52.6
Acetat de n-Propil	$C_5H_{10}O_2$	1.7	102.1	72.3

Taula 3.1.: Límits inferiors d'explosibilitat per gasos inflamables i vapors ($LEL_{(20^\circ C)}$) [21][22][23]

Tot i que tal i com s'ha dit unes línies més amunt la manera més usual d'expressar la concentració de vapors o gasos que es troben mesclats amb l'aire es faci mitjançant el percentatge en volum de solvent respecte del de la mescla, també pot ser d'interès treballar amb unes altres unitats com per exemple els grams de vapor o gas per metre cúbic de mescla.

Els valor de la taula. 3.1 estan referits a una temperatura de $20^\circ C$. Per tant el volum que ocupa un mol de gas a pressió atmosfèrica i a la temperatura a la què s'ha referit el nivell de LEL és:

$$V_{(mol)} = \frac{8.31 \cdot 293}{101325} \simeq 24 \left(\frac{l}{mol} \right)_{20^\circ C}$$

llavors utilitzant aquest valor es pot fer el canvi d'unitats

$$LEL_{(g/m^3)_{20^\circ C}} = \frac{LEL_{(\%v/v)_{20^\circ C}}}{100} \cdot \frac{M}{\frac{24}{1000}} \quad (3.1)$$

per exemple, per l'Etanol

$$LEL_{(g/m^3)_{20^\circ C}} = \frac{3.1}{100} \frac{m_{C_2H_6O}^3}{m_{mescla}^3} \cdot \frac{46.1 \left(\frac{g}{mol} \right)_{C_2H_6O}}{\frac{24}{1000} \left(\frac{m^3}{mol} \right)_{C_2H_6O(20^\circ C)}} = 59.54$$

Al llarg de la tesi es farà referència al límit inferior d'explosibilitat LEL i es deixarà de banda el límit superior d'explosibilitat UEL . Això es deu al fet que al sistema d'assecatge de la màquina, i mitjançant els sistemes de control que dicta la norma [18], no se li permet en cap cas arribar al límit inferior d'explosibilitat; de fet, quan la

màquina arriba a un determinat percentatge de LEL aquesta dona senyal d'alarma i a partir d'un determinat valor de LEL es programa una aturada d'emergència. Així doncs, s'assegura que la màquina no treballi dintre de la zona susceptible d'explosió sota cap circumstància (entre LEL i UEL) i per tant, mai s'arribaria al UEL perquè abans ja s'hauria produït una parada d'emergència al haver sobrepassat el LEL .

3.2. Càlcul de propietats en condicions diferents a les tabulades

3.2.1. Influència de la temperatura en el valor del LEL

Com ja s'ha dit més amunt, hi ha dues maneres d'expressar el LEL ja sigui a través de unitats com $(\%v/v)$ o bé (g/m^3) . Per valorar com varia aquest valor de LEL en funció de la temperatura es poden seguir dues metodologies, segons les unitats de treball escollides:

Contingut de substàncies inflamables expressat en $(\%v/v)$

Segons s'ha consultat a la bibliografia [24], la variació enfront de la temperatura es pot calcular a partir de

$$LEL_{(\%v/v)_T} = LEL_{(\%v/v)_{20^\circ C}} - (0.8 \cdot LEL_{(\%v/v)_{20^\circ C}} \cdot 10^{-3}) \cdot (T - 20) \quad (3.2)$$

$LEL_{(\%v/v)_T}$ és el nivell de LEL expressat en percentatge en volum, a la temperatura T desitjada (en graus centígrads)

$LEL_{(\%v/v)_{20^\circ C}}$ és el nivell de LEL expressat en percentatge en volum, a la temperatura T a la qual es disposa de dades tabulades, en aquest cas $20^\circ C$

	$LEL_{(\%v/v)_{20^\circ C}}$	$LEL_{(\%v/v)_{80^\circ C}}$
Etanol	3.1	2.95
Acetat d'etil	2.0	1.90
1-Metoxi-2-propanol	1.8	1.71
1-Etoxi-2-propanol	1.3	1.24
n-Propanol	2.1	2.00
Acetat de n-Propil	1.7	1.62

Taula 3.2.: Variació de $LEL_{(\%v/v)}$ amb la temperatura

A mesura que augmenta la temperatura a la qual es troba la mescla d'aire més substàncies inflamables, comporta una disminució de la quantitat acceptable de gasos inflamables que poden estar barrejats amb l'aire. És a dir, per exemple per a l'Etanol, una proporció de 3.1% en volum a 20°C li pertoca un nivell de $LEL = 100\%$. De la mateixa manera que, també per a l'Etanol, a 80°C una proporció de 2.95% en volum li pertoca també un nivell de $LEL = 100\%$.

Contrast de l'ajustament entre valors reals i valors teòrics segons la eq. 3.2:

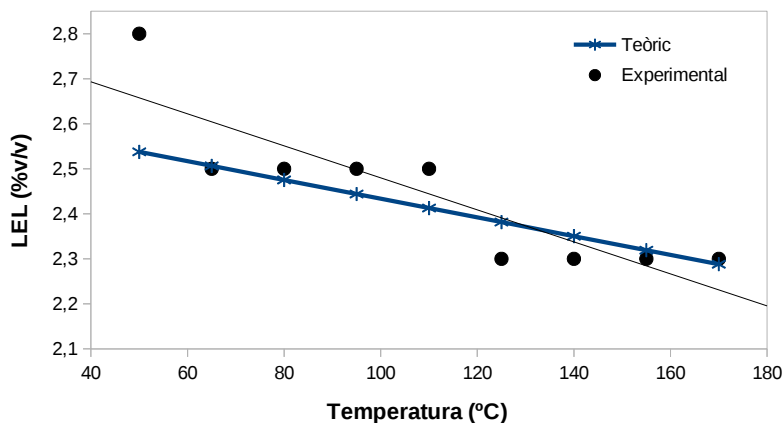


Figura 3.2.: Gràfic de l'efecte de la temperatura en el límit inferior d'explosibilitat per a l'Acetona. Dades experimentals obtingudes a partir de [25]. Com a valor teòric a 20°C, en aquesta mateixa referència bibliogràfica, s'ha pres el valor de 2.6% .

Com es pot apreciar, hi ha una diferència entre els resultats teòrics i els experimentals, cosa que indica que els valors dels càlculs finals s'han de prendre com a valors aproximats, i serviran com a orientació a l'hora d'analitzar els resultats finals.

Contingut de substàncies inflamables expressat en (g/m^3)

La referència [18] proposa una dependència lineal amb la temperatura segons l'equació

$$LEL_{(g/m^3)_T} = LEL [1 - \Delta_{LEL} (T - 20)] \quad (3.3)$$

$LEL_{(g/m^3)_T}$ és el nivell de LEL expressat en grams per metre cúbic, a la temperatura T desitjada (en graus centígrads)

LEL és el nivell de LEL expressat en grams per metre cúbic, a una temperatura de 20°C

Δ_{LEL} és la dependència de la temperatura (si es desconeix el seu valor, [18] proposa adoptar $\Delta_{LEL} = \frac{20\%}{100\text{K}} = \frac{0.002}{\text{K}}$)

	$LEL_{(g/m^3)_{20^{\circ}\text{C}}}$	$LEL_{(g/m^3)_{80^{\circ}\text{C}}}$
Etanol	59.5	52.36
Acetat d'etil	73.4	64.59
1-Metoxi-2-propanol	67.6	59.49
1-Etoxi-2-propanol	56.4	49.63
n-Propanol	52.6	46.29
Acetat de n-Propil	72.3	63.62

Taula 3.3.: Variació de $LEL_{(g/m^3)}$ amb la temperatura

Igual que en la conversió anterior, s'aprecia que a mesura que augmenta la temperatura, la concentració de substàncies inflamables disminueix per a un mateix nivell de LEL .

3.2.2. Valor de LEL per a una mescla de gasos o vapors inflamables

És molt poc probable que en les màquines que estan dintre l'àmbit d'estudi d'aquest document es treballi amb un únic dissolvent; per tant és necessari poder fer una estimació de quin és el valor de LEL per a una mescla de diversos dissolvents. Per tals situacions, s'adopta la fórmula que segueix, i que proposa [20]

$$LEL_{(\%v/v)_{mescla}} = \frac{100 \frac{\%v}{v}}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{LEL_i}} \quad (3.4)$$

c_i és la concentració de cada component de combustible, sobre el volum total de combustibles

LEL_i límit inferior d'explosibilitat de cadascun dels elements que formen la mescla (en percentatge en volum)

Per exemple si es disposa d'una mescla de substàncies inflamables de la següent composició:

	%v/v	LIE(%v/v)
Etanol	0.8	3.1
Acetat d'etil	2.0	2.0
1-Metoxi-2-propanol	0.5	1.8
Total substàncies inflamables	3.3	
Aire	96.7	

Taula 3.4.: Exemple pràctic del càlcul de *LEL* per a una mescla de substàncies inflamables

$$c_{(C_2H_6O)} = \frac{0.8}{3.3}100 = 24.2\% \quad c_{(C_4H_8O_2)} = \frac{2.0}{3.3}100 = 60.6\% \quad c_{(C_4H_{10}O_2)} = \frac{0.5}{3.3}100 = 15.2\%$$

$$LIE_{(\%v/v)_{mescla}} = \frac{100}{\frac{24.2}{3.1} + \frac{60.6}{2.0} + \frac{15.2}{1.8}} = 2.15\%$$

3.3. Mesura de la quantitat de solvents a màquina

3.3.1. Justificació de la necessitat d'instalar els sensors de LEL

El procés d'assecat de tintes, adhesius o vernissos a través de ventilació forçada provoca el desprendiment de substàncies inflamables degut a la evaporació dels solvents que contenen aquestes substàncies. Aquests solvents, una vegada evaporats, es mesclen amb l'aire que s'ha utilitzat en el procés d'assecat.

Com s'ha dit més amunt, aquests vapors o gasos de substàncies inflamables, quan arriben a unes determinades concentracions o proporcions de mescla amb l'aire que els conté poden ser perilloses ja que pot haver-hi risc d'explosió. Naturalment es fa necessari establir uns protocols per assegurar que les màquines funcionin dintre d'un rang segur, evitant així el risc d'explosió.

La norma UNE-EN 1539[18] tracta totes aquelles situacions de perill que es poden produir en forns i assecadors en els quals es desprenguin substàncies inflamables degut a la evaporació dels materials de recobriments. Tot i que aquesta norma tracta de diversos riscos com per exemple mecànics, elèctrics, o tèrmics entre d'altres, s'ha centrat l'atenció en els requisits relacionats amb la protecció i prevenció enfront l'explosió.

Per tant les màquines impressores i laminadores de Comexi han d'assegurar el compliment d'aquesta normativa per evitar situacions de perill.

En aquesta norma es classifiquen els sistemes d'assecatge en dos tipus d'assecadors, els de tipus *A* i els de tipus *B*.

Assecadors tipus A

En aquesta tipologia d'assecadors la protecció i prevenció en front a la explosió de mesclures explosives es fa a través de la observació dels límits de concentració d'aquestes substàncies inflamables, mitjançant ventilació forçada.

Aquest sistema de ventilació forçada ha d'assegurar que no se sobrepassi la concentració màxima admissible de substàncies inflamables; també s'ha de garantir que no apareixen zones mortes o sense circulació dintre de l'espai de l'asecador.

Aquesta tipologia d'assecadors és el que s'utilitza en les impressores i laminadores, ja que el fluid utilitzat per assecar els dissolvents continguts en tintes, adhesius i vernissos aplicats sobre substrat és aire a alta velocitat i a alta temperatura. Per tant, cal tenir en compte les indicacions de la norma per a un funcionament segur de la màquina.

Assecadors tipus B

A diferència de la tipologia anterior, en els assecadors de tipus B es limita el contingut d'oxigen durant el funcionament del sistema d'assecatge, de manera que s'eviti una ignició de substàncies inflamables que s'hagin pogut desprendre en el procés d'assecat.

Aquests assecadors han de preveure que el gas inert que s'utilitza en el procés d'assecatge es mantingui dintre de l'asecador i que no es pugui escapar a l'exterior.

3.3.1.1. Classificació dels intervals de funcionament de la màquina

En funció de la temperatura de treball, i de la concentració màxima admissible de substàncies inflamables que es desprenen en l'asecador, la norma EN 1539:2015 estableix diversos intervals de funcionament.

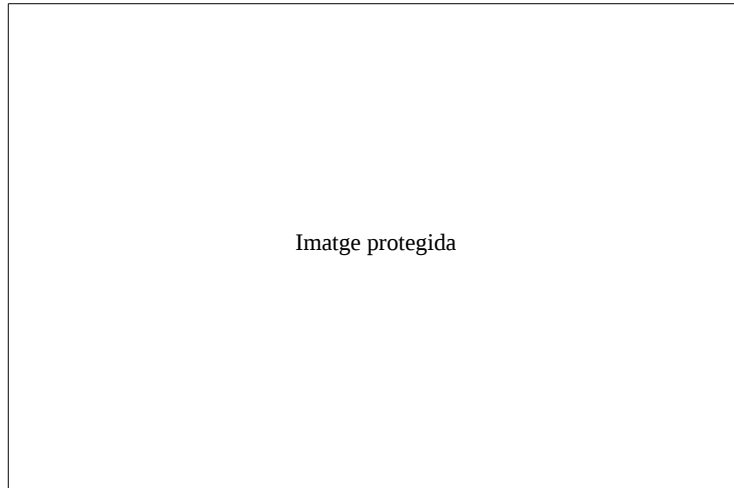



Figura 3.3.: Concentració màxima admissible de substàncies inflamables, i intervals de funcionament admissible per a assecadors de concentració limitada (assecadors de tipus A)

Tal i com s'ha comentat abans, seguint la recomanació de la norma, al desconèixer la dependència del LEL amb la temperatura, s'adopta per els càlculs el valor de $\Delta_{LEL} = -20\%/100K$.

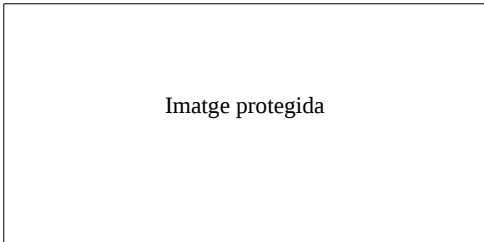
“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Imatge protegida

Taula 3.5.: Nivells d'alarma segons el *LEL* (a " $T_{disseny}^{\circ C}$ "), referenciats a 20°C

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Imatge protegida

Taula 3.6.: Requisits de control que cal acomplir, segons els intervals de funcionament

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

3.3.2. Tipus de mesuradors (catalítics/infraroig)

A partir del que s'ha dit en l'apartat anterior, s'instalen a màquina diversos sensors de *LEL* per evitar que es pugui treballar amb un contingut de solvent mesclat amb l'aire massa elevat i evitar així els riscos d'explosió.

Detector de gasos explosius, mitjançant oxidació catalítica

Aquests sensors estan formats per dos filaments de platí (un d'ells és el detector i l'altre el compensador) disposats en espiral i recoberts d'alúmina. Ambdós filaments estan situats dintre d'un embolcall antideflagrant. El recobriment d'alúmina de l'element compensador està tractat de manera que s'eviti l'oxidació catalítica (inert), i en canvi l'element detector ha estat recobert per un material catalitzador que el que fa és afavorir el procés d'oxidació.

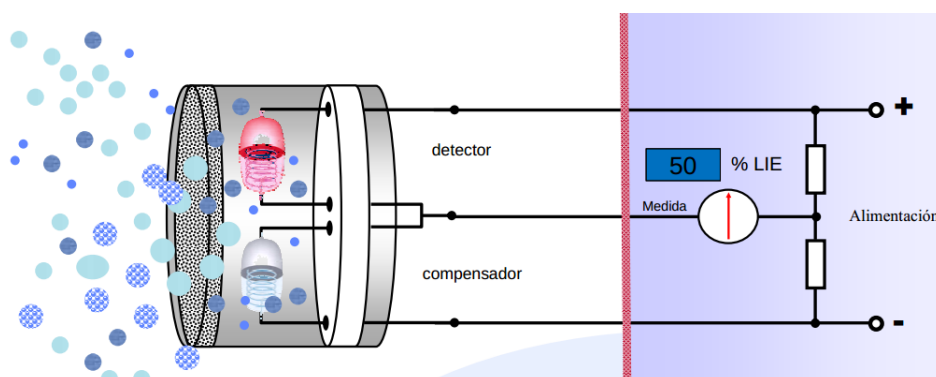


Figura 3.4.: Sensor de *LEL* catalític [26]

El gas que es vol analitzar es fa passar a través del sensor; l'element detector oxida el gas i això provoca un augment de temperatura al filament, que es tradueix en una variació en la resistència del filament (com més alta sigui la variació en la resistència del filament voldrà dir que més concentració de gas inflamable hi ha en la mostra que s'està analitzant). L'altre element, el compensador no variarà la seva resistència ja que no oxida el gas que s'està analitzant i per tant la temperatura del filament no varia.

Aquests dos elements es disposen en un muntatge formant un pont de Wheatstone. Quan la diferència de potencial que retorna el dispositiu és diferent de zero, significa que hi ha substàncies inflamables en l'aire que s'està analitzant.

Detector de gasos explosius, per infraroig

Aquests sensors funcionen amb emissors i receptors de llum infraroig. L'emissor emet llum infraroja que il·lumina un determinat volum de gas que ha entrat en la

cambrà de mesura, aquest gas absorbeix unes determinades longituds d'ona d'aquesta llum mentre que d'altres longituds d'ona passen a través del gas sense quedar atenuades; la quantitat d'energia absorbida està relacionada amb la concentració del gas explosiu continguda dintre de la mostra analitzada. El detector d'anàlisi troba una variació en la intensitat de la llum absorbida i compara aquesta intensitat amb la corresponent a les longituds d'ona que no s'han absorbit de la llum. El microprocessador controla la relació entre aquests dos senyals i converteix la lectura amb una concentració en percentatge de LEL del gas combustible.

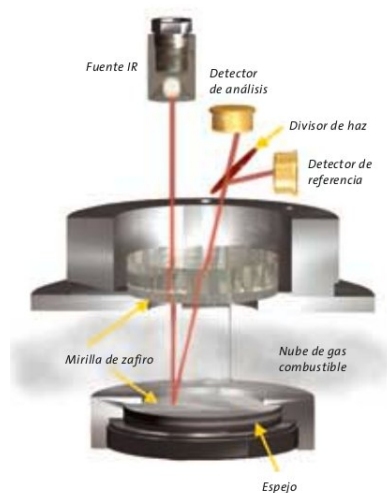
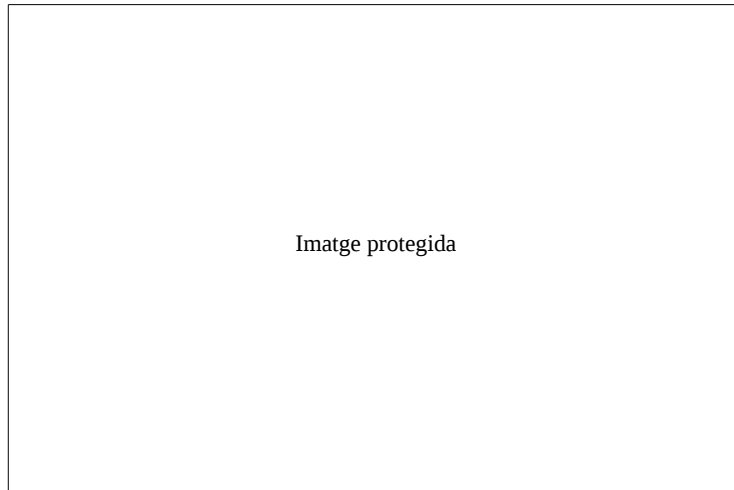


Figura 3.5.: Sensor de *LEL* per infraroig [54]

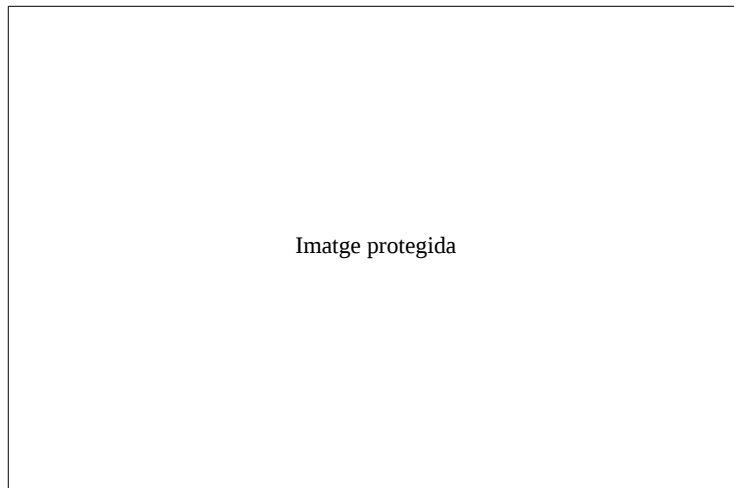
3.3.3. Ubicació dels sensors *LEL*, en la línia de producte Flexo

Tal i com s'ha exposat anteriorment, són diversos els possibles esquemes d'assecatge que s'instal·len a les màquines que comercialitza Comexi, bàsicament muntatges amb 4 ventiladors (amb o sense recirculació a tinters i a túnel) i muntatges amb 3 ventiladors (amb o sense recirculació entre tinters).

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



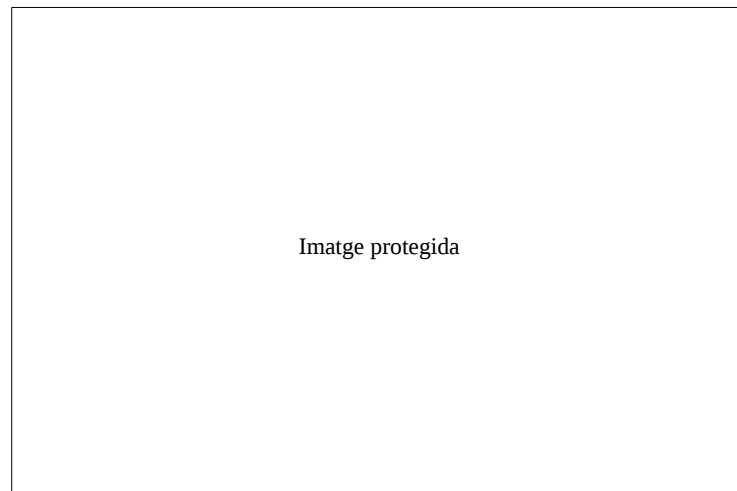
a) Sense recirculació



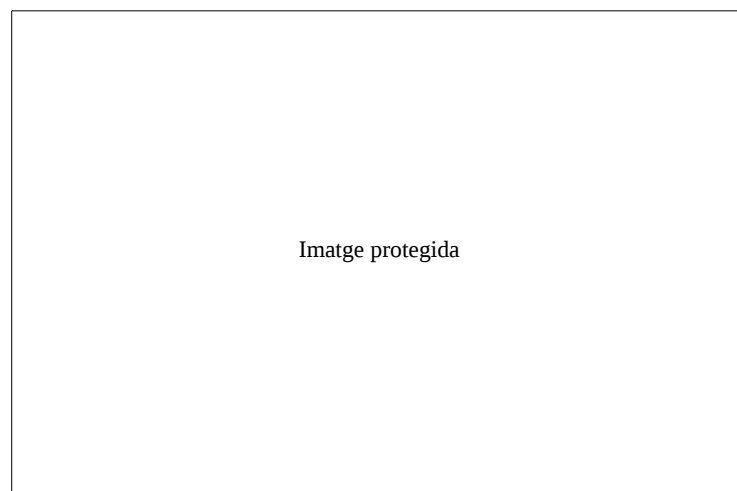
b) Amb recirculació

Figura 3.6.: Ubicació dels sensor de *LEL* per una màquina amb 4 ventiladors

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



a) Sense recirculació



b) Amb recirculació

Figura 3.7.: Ubicació dels sensor de *LEL* per una màquina amb 3 ventiladors

3.4. Estimació teòrica de les emissions de solvent d'una impressora flexogràfica

Amb la voluntat d'estudiar quines són les emissions que està emetent una màquina a l'hora d'imprimir un treball en concret i treballant sota diverses velocitats d'impressió, s'ha fet una modelització del circuit d'aire de la impressora flexogràfica al que se li afegeix el contingut de dissolvent que s'està evaporant de la banda impresa, i tot aquest conjunt s'ha implementat en forma d'una fulla de càlcul per estudiar com afecten els diversos paràmetres del sistema d'assecatge (volum d'aire que s'impulsa, temperatura, recirculació) en la concentració de solvents ens els diversos punts del sistema d'assecatge.

El resultat final és un resultat aproximat, ja que és impossible saber quins són els components reals en tant que dissolvents continguts en una tinta (els fabricants de tintes han aportat una proporció estimativa orientativa). No obstant, sí que serà possible estudiar la interrelació entre els paràmetres de control de l'assecatge.


3.4.1. Composició de les tintes

A partir de les consultes fetes als fabricants de tinta amb què treballa Comexi, aquests aporten aquesta composició aproximada per a cada tipus de tinta (es fa la mitjana entre les dades dels diversos fabricants):



Taula 3.7.: Contingut de solvent en percentatge per a cada tipologia de tinta

A més a més de les quantitats de solvent de la taula anterior, cal tenir en compte que també s'afegeix una certa quantitat a la tinta inicial amb l'objectiu de millorar les propietats finals d'una tinta. Els tècnics del departament d'aplicacions de l'empresa, aporten les següents quantitats:



Imatge protegida

Taula 3.8.: Additius que s'afegeixen a la tinta inicial per a millorar-ne les propietats

Aquests dissolvents són els que cal assecat durant el procés d'impressió i que per tant computaran a l'hora de fer les estimacions de les emissions que genera la màquina.

3.4.2. Percentatge d'assecatge teòric a tinters i a túnel

El procés d'assecat es pot dividir en dues etapes, tal i com es llista a continuació:

1. Assecatge entre tinters: és tot el procés d'assecat que té lloc en el cos impressor. Entre dos colors consecutius sempre hi ha instal·lada una pantalla d'assecatge la funció de la qual és assecat suficientment la quantitat de tinta que s'ha aplicat en l'etapa d'impressió anterior, de manera que quan s'imprimeixi el color que segueix immediatament no s'afecti la impressió que s'ha fet en el color anterior. En l'assecatge del cos impressor, per tant, no es produeix un assecatge complet sinó que es fa un assecat parcial que permeti la impressió dels diversos colors de manera consecutiva. L'etapa d'assecatge que es porta a terme en el cos impressor no és suficient com per aconseguir una retenció de solvent en la mostra impresa dintre d'uns límits acceptables; per aconseguir valors de retenció de solvent més baixos, es procedeix a situar un túnel d'assecat després del cos impressor.
2. Assecatge al túnel: la missió d'aquesta etapa és reduir la retenció de solvent de la mostra impresa al mínim possible, i a més a més ens ha d'assegurar que el material un cop es rebobina està suficientment sec com perquè no quedin adherides les diverses capes de material que es van acumulant una al damunt de l'altra.

Per tal de determinar de manera precisa les emissions de solvent que es produeixen en el cos impressor i en el túnel d'assecatge en funció del treball que s'està imprimint, seria necessari tenir implementat també en aquesta fulla de càlcul quina és la capacitat d'assecatge de les pantalles entre tinters i les del túnel en funció dels paràmetres geomètrics que defineixen la geometria de la pantalla així com també dels paràmetres de velocitat i temperatura de l'aire que s'està utilitzant per a l'assecatge (estudi realitzat en el cap. 6).

L'objectiu del model que s'ha implementat en aquesta fulla de càlcul és determinar com s'interrelacionen entre elles les diverses variables que intervenen en el circuit d'assecatge (paràmetres que defineixen el circuit d'aire des d'un punt de vista global com per exemple el cabal d'aire impulsat, la temperatura i les recirculacions) i com aquestes variables repercuteixen en les emissions finals que produeix la màquina, i no tant en centrar-se a determinar la capacitat d'assecatge d'una pantalla en funció dels paràmetres que la defineixen (com per exemple el coeficient de transferència de calor per convecció en funció de la velocitat de l'aire a la sortida del llavi de la pantalla) aquesta anàlisi es porta a terme en els cap. 6, cap. 7 i cap. 9.

Per tal de simplificar el problema a estudiar en aquest capítol, es procedeix a imputar a cadascun dels tinters de la màquina quina quantitat de dissolvent contingut en la tinta que s'aplica a cada grup impressor s'evapora al cos impressor i quina quantitat de solvent s'evapora al túnel (el total evaporat a tinters i túnel suma 100%), en funció del nombre de colors de la màquina, i si el treball és en anvers o revers i segons si es tracta d'un treball amb un fons o no. Les dades que s'han imposat al model per tal de simplificar el càlcul es resumeixen a la taula. 3.9 per a una impressora de 8 colors i a la taula. 3.10 per a una impressora de 10 colors.



Taula 3.9.: Percentatge teòric d'assecatge a tinters i a túnel, per a una impressora de 8 colors



Taula 3.10.: Percentatge teòric d'assecatge a tinters i a túnel, per a una impressora de 10 colors

Com a simplificacions del procés, es considera que el sistema d'assecatge és capaç d'assecar el 100% de solvents que s'han utilitzat conjuntament amb la tinta (per tant, assumint aquesta simplificació, la retenció de solvent teòrica al final de la mostra seria del 0%). Aquesta simplificació realment no passa ja que sempre hi ha una petita quantitat de solvent que queda pendent d'assecar.

A les taules anteriors es pot apreciar que després de l'últim color, el percentatge que s'asseca en el cos impressor s'ha considerat igual a zero, això es deu (tant per el cas de 8 com 10 colors) a que l'últim tinter no porta una pantalla d'assecatge associada ja que immediatament després d'aquesta estació d'impressió ja hi ha el túnel i és aquí on es farà l'assecat.

3.4.3. Densitat dels solvents en estat líquid

Per fer el càlcul de la quantitat de solvent que s'aplica i que cal assecar, és necessari saber la densitat del fluid a temperatura ambient [17].

$$\rho_l = AB^{-(1-\frac{T}{C})^n} \quad (3.5)$$

ρ_l densitat del solvent en estat líquid (g/ml)

A , B , C i n constants que depenen per a cada compost orgànic

T temperatura a la que es desitja saber el valor de la densitat (K)

	Etanol	Acetat d'etil	1-Metoxi-2-propanol	1-Etoxi-2-propanol	n-Propanol	Acetat de n-Propil
A	0.27600	0.30810	0.30310	0.29752	0.27500	0.29600
B	0.27668	0.26008	0.24163	0.25769	0.26976	0.25696
C	516.25	523.30	569.00	582.00	536.71	549.40
n	0.23670	0.27800	0.28571	0.28571	0.24940	0.27830

Taula 3.11.: Paràmetres per al càlcul de les densitats dels solvents en estat líquid

3.4.4. Densitat dels solvents en estat gasós

Quan el solvent s'ha evaporat, es considera que segueix la llei dels gasos ideals:

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} \quad (3.6)$$

ρ_g densitat del solvent en estat gas (g/dm^3)

P pressió a la que es troba el gas (atm)

M massa molecular (g/mol)

R constant dels gasos ideals ($0.082 atm \cdot dm^3/mol \cdot K$)

T temperatura a la que es fa el càlcul

3.4.5. Paràmetres que defineixen el treball que es vol imprimir

Tot seguit es defineixen els paràmetres que caracteritzen el treball que es vol imprimir:

1. Nombre de tinters: l'usuari pot escollir si la màquina és de 8 colors (8 tinters i 7 pantalles d'assecatge entre tinters) o bé de 10 colors (10 tinters i 9 pantalles d'assecatge entre tinters).
2. Amplada d'impressió: amplada màxima que el clixé que munta la màquina podria arribar a imprimir.
3. Velocitat d'impressió: velocitat a la que la màquina imprimeix el substrat.
4. Tipus de treball: cal escollir si el treball s'imprimeix en anvers o bé en revers. Si s'imprimeix en anvers, el primer color que s'imprimeix queda per sota de la resta de colors (habitualment el primer color és un fons de color blanc, i a sobre d'aquest color s'imprimeixen la resta de colors. Un possible avantatge que té, és que si el substrat imprès està destinat a protegir un aliment, la impressió no estarà mai en contacte amb l'aliment, ja que la imatge impresa quedaria situada a la cara que dona a l'exterior. La impressió en revers és el procés contrari, l'últim color que s'imprimeix és el fons i quedaria situat per sobre de la resta de colors; en aquest cas, la part impresa del substrat quedaria situada a la cara interior.
5. Treball amb fons blanc: es pot escollir tant per la impressió en anvers com revers si s'aplicarà un fons blanc en el treball.
6. A cada tinter s'han d'escollir les següents opcions: a) Quina tinta s'utilitzarà (color pla, fons blanc, fons no blanc, quadricromia, Pantone). b) El volum de la cel·la de l'anilox que recull la tinta de la rasqueta i la traspasa al clixé (s'expressa en cm^3/m^2). c) La cobertura, que és el percentatge respecte de la superfície total que s'aplica, de cada color. d) L'aportació de tinta entre l'anilox i el clixé; és a dir, quin percentatge de la tinta que ha recollit l'anilox és traspasada cap al clixé. Aquest valor s'ha estimat que està al voltant del 60%, i també s'ha considerat que tota la tinta que ha estat traspasada de l'anilox al clixé és la quantitat que s'aplica sobre el substrat.

A la fig. 3.8 es mostra una captura de pantalla de la fulla de càlcul, amb tots els paràmetres que s'acaben d'enumerar situats sobre un esquema que representa el cos impressor de la màquina. En definitiva, sobre aquesta figura que representa la configuració del treball a imprimir en els diversos tinters d'una impressora flexogràfica

de 10 colors, s'hi representen tots aquells paràmetres que defineixen la quantitat i tipologia de tinta aplicada sobre el substrat en cadascun dels grups impressors de la màquina, així com l'ordre de cadascun dels colors que s'està aplicant. El sentit de passada de material és des del tinter número 1 (primer grup impressor) cap al tinter número 10 (últim grup impressor). Entre dos grups impressors consecutius hi ha situada una pantalla d'assecatge entre colors.

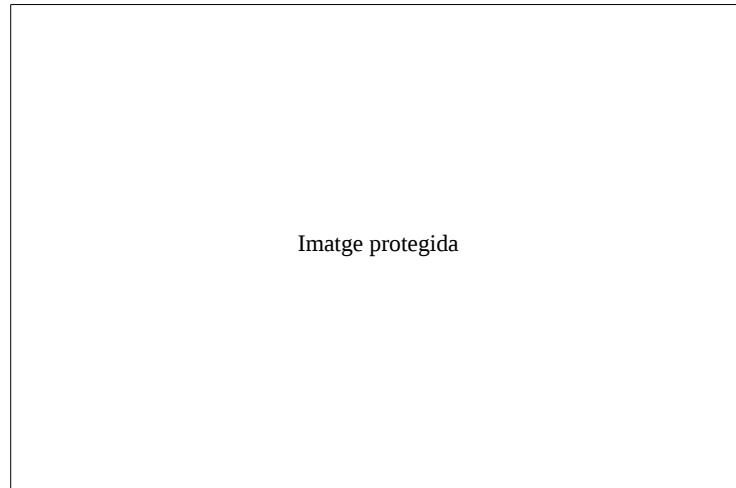


Figura 3.8.: Configuració dels diversos apartats que configuren un treball (es mostra la imatge per 10 tinters, però es pot escollir entre 8 i 10)

3.4.6. Paràmetres que defineixen el sistema d'assecatge

Ja només queda per definir els paràmetres que defineixen el sistema d'assecatge en sí, que són:

1. Temperatura de l'aire fresc, que és la temperatura a la que la màquina pren l'aire de l'exterior. Dependrà del client decidir si vol agafar aire fresc de l'interior de la nau on està situada la impressora o bé si l'agafa de l'ambient exterior de la nau.
2. Cabal volumètric d'aire que mou la màquina (cabal d'impulsió).
3. Temperatura d'assecatge, que és la temperatura a la qual s'impulsa l'aire que s'utilitza com a element per a assecar a través de convecció forçada.
4. Balanç, que és la quantitat d'aire de dintre la nau que la màquina ha d'aspirar de més a més, per evitar que s'escapi aire contaminat a l'exterior de la màquina.

5. Temperatura ambient de dintre la nau. L'aire de més que ha d'aspirar la màquina per evitar el rebuf de les pantalles entrarà en el circuit d'assecatge a aquesta temperatura.
6. Recirculació, essent el percentatge d'aire d'extracció que es torna a dirigir dintre de la màquina. Aquest aire té l'avantatge que ja es troba a una temperatura relativament elevada, però per contra té un cert contingut de solvent que pot fer disminuir la capacitat d'assecatge de la màquina.

A continuació es presenten unes captures de pantalla amb el conjunt de paràmetres que defineixen la configuració del circuit d'aire del sistema d'assecatge. Es presenten un total de quatre esquemes que es corresponen a diverses tipologies del circuit d'assecat, i que s'expliquen a continuació:

- Màquines amb quatre ventiladors:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

- Màquines amb un circuit d'assecatge de 3 ventiladors:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

A les diverses figures, de color blau s'han representat els paràmetres que defineixen el circuit d'assecatge i que l'usuari ha d'introduir manualment, com són les temperatures (temperatura d'assecatge, temperatura d'aire fresc i temperatura ambiental de la nau), el cabal d'aire impulsat a tinters (que es correspon amb la suma de cabal de totes les pantalles del cos impressor), el cabal d'aire impulsat al túnel (que es correspon amb la suma de cabal de totes les pantalles d'assecatge del túnel), el balanç del circuit d'assecat, i finalment el percentatge de recirculació.

De color groc s'han marcat tots els punts on la fulla de càlcul proporciona les dades corresponents a la concentració de solvent, i els hi assigna el seu corresponent percentatge de *LEL*; en aquests punts de control també es visualitza el valor de temperatura que assoleix l'aire. Les fletxes dels esquemes indiquen la direcció que pren l'aire en el circuit.

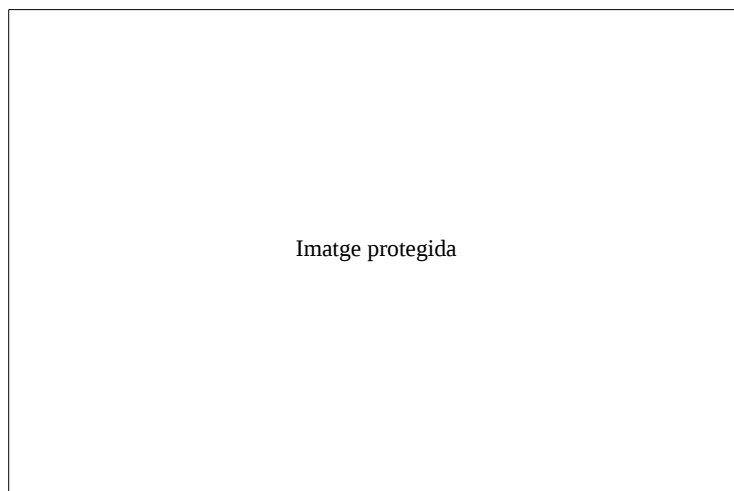


Figura 3.9.: Exemple de paràmetres de l'assecatge entre tinters, màquina 4 ventiladors

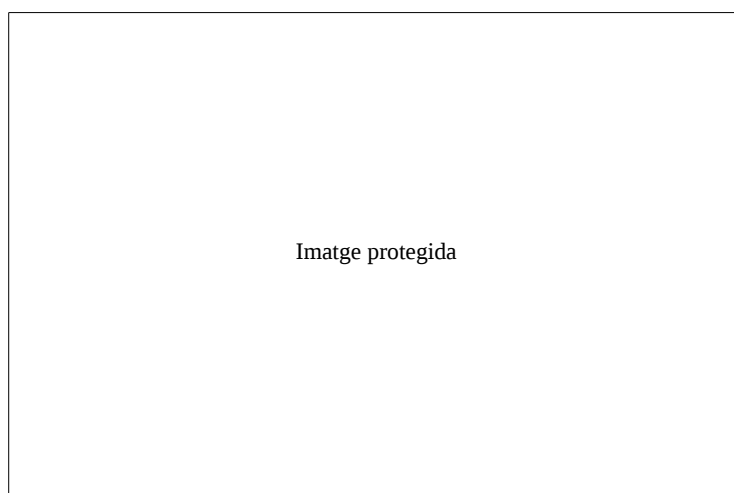


Figura 3.10.: Exemple de paràmetres de l'assecatge al túnel, màquina 4 ventiladors

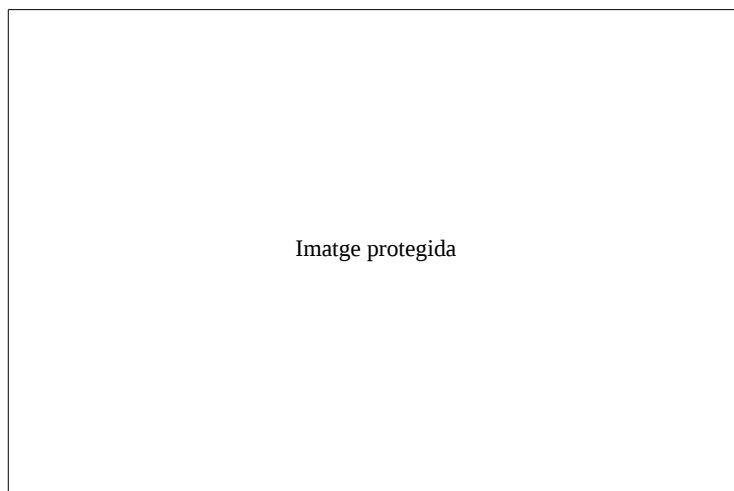


Figura 3.11.: Exemple de paràmetres de l'assecatge a tinters i al túnel, màquina 3 ventiladors, amb recirculació a tinters

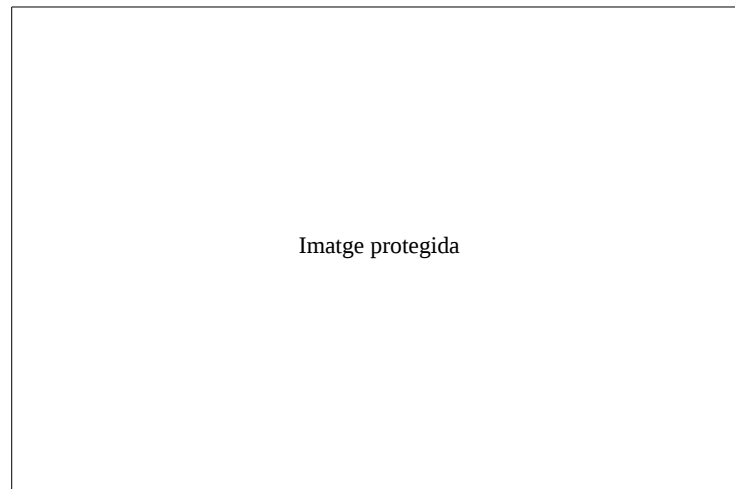


Figura 3.12.: Exemple de paràmetres de l'assecatge a tinters i al túnel, màquina 3 ventiladors, sense recirculació a tinters

3.5. Validació/contrastació de resultats experimentals i teòrics

En aquest apartat es valida l'ajust de resultats entre el model teòric i entre les dades mesurades experimentalment en una màquina en procés de producció real per a diversos treballs. En concret es tracta d'una màquina impressora flexogràfica "M1".

Es té la possibilitat d'analitzar un total de quatre treballs, amb els següents noms; treball 1, treball 2, treball 3 i treball 4.

3.5.1. Treball núm. 1

El material sobre el que s'imprimeix aquest treball té una amplada de 1260mm, i en l'anvers del material. El cabal d'impulsió és de " $Q_{impulsió}$ " i el cabal d'aspiració és de

" $Q_{aspiració}$ ". La temperatura d'assecatge, així com la de l'aire fresc i la temperatura ambiental de la nau es consideren constants per a tots els càlculs. El balanç del circuit d'assecatge també es considera constant per a qualsevol de les configuracions estudiades. Els paràmetres que defineixen el treball es mostren a la taula. 3.12 i els resultats de model matemàtic implementat amb la fulla de càlcul es resumeixen a la taula. 3.13 (el *LEL* que figura a la taula per a cadascun dels casos estudiats és el corresponent al punt *E* dels esquemes de la fig. 3.13, fig. 3.14, fig. 3.15, fig. 3.16, fig. 3.17, fig. 3.18 i fig. 3.19). El treball imprès es presenta a la fig. 3.20.

	Tinta	Anilox (cm^3/m^2)	Cobertura (%)	Aportació (tant per u)
Tinter 1	Fons blanc	16	40	0.6
Tinter 2	Fons blanc	16	40	0.6
Tinter 3	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -
Tinter 4	Pantone	5	5	0.6
Tinter 5	Quadricromia	3	40	0.6
Tinter 6	Pantone	9	5	0.6
Tinter 7	Pantone	8	15	0.6
Tinter 8	Quadricromia	5	40	0.6
Tinter 9	Pantone	8	5	0.6
Tinter 10	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -

Taula 3.12.: Fitxa d'impressió del treball núm. 1

	Tª tinters (°C)	Velocitat impressió (m/min)	Recirculació (%)	LEL experimental (%) 20°C	LEL teòric (%) Tª	LEL teòric (%) 20°C	Diferència (%) 20°C
1	70	188	40	8	10.8	10.6	33
2	70	222	0	8	7.7	7.5	6
3	70	222	31	9	11.1	10.9	21
4	70	222	40	11	12.8	12.5	14
5	70	222	50	12	15.4	15.0	25
6	70	266	40	12	15.3	15.0	25
7	70	288	40	13	16.6	16.2	25

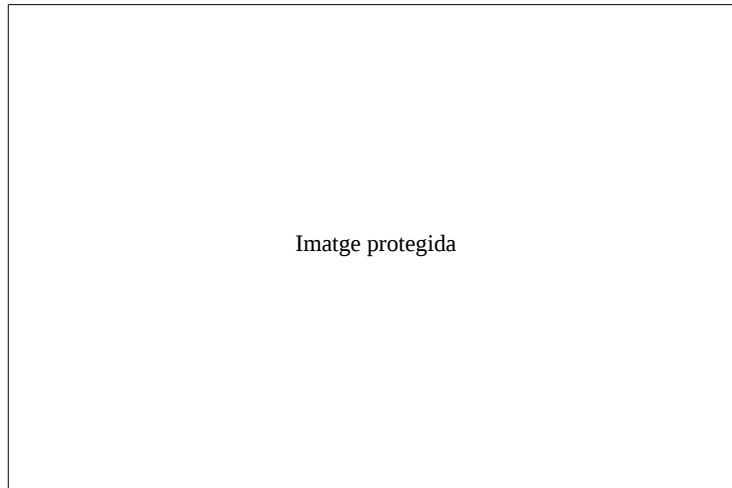
Taula 3.13.: Comparativa de nivell de *LEL* real / teòric per el treball núm. 1

A partir dels resultats de la taula. 3.13, es poden extreure les següents relacions:

- Per una mateixa velocitat d'impressió, a mesura que augmenta el percentatge de recirculació, augmenta també el percentatge de *LEL* obtingut a l'extracció

de la màquina (punt E). A mesura que augmenta la proporció d'aire “contaminat” de solvent que es reintrodueix en el circuit d'assecatge cap al ventilador d'impulsió, i que per tant s'utilitzarà per a l'assecatge de la mostra impresa, implica que l'aire a la sortida tindrà un contingut de solvent equivalent a la suma del que s'està evaporant en el cos impressor més el contingut inicial de solvent que ja contenia l'aire provinent de la recirculació (fig. 3.14, fig. 3.15, fig. 3.16 i fig. 3.17).

- Si la recirculació es manté en un valor fix, a mesura que augmenta la velocitat d'impressió augmenta també el percentatge de solvent contingut en el punt E , i per tant el seu nivell de LEL . Això es deu al fet que a mesura que s'augmenta la velocitat d'impressió, és major la quantitat de dissolvent que s'introdueix en el sistema d'assecatge per unitat de temps. Cal tenir en compte que com a simplificació per el càlcul, i tal i com s'ha mencionat anteriorment, la modelització del circuit d'aire s'ha fet considerant que el sistema d'assecatge és capaç d'assecar totalment el treball que s'està imprimint independentment de la velocitat d'impressió així com de la quantitat de tinta aplicada en cada grup impressor, per tant a major quantitat de tinta aportada per unitat de temps major és la quantitat de solvent que s'evapora per unitat de temps (fig. 3.13, fig. 3.16, fig. 3.18 i fig. 3.19). La quantitat de tinta que s'evapora en el cos impressor, és el valor que es fixa en el requadre de color groc de les diverses figures, i si es comparen entre elles, es pot apreciar com el valor de dissolvent evaporat va augmentant proporcionalment a la velocitat a la qual s'imprimeix el treball.
- En el cas en el que hi ha una recirculació igual a zero (es tanca el cabal d'aire d'extracció que es dirigeix novament cap a la impulsió del sistema d'assecatge), es correspon al cas on la concentració de solvent a l'extracció prendrà el valor mínim. Sota aquestes condicions, tot l'aire que s'utilitza durant el procés d'assecat és aire fresc net (és a dir, amb contingut de solvent igual a zero), i per tant l'aire que s'obté a la sortida del sistema d'assecatge es troba molt diluït en tant que contingut de dissolvent (fig. 3.14).

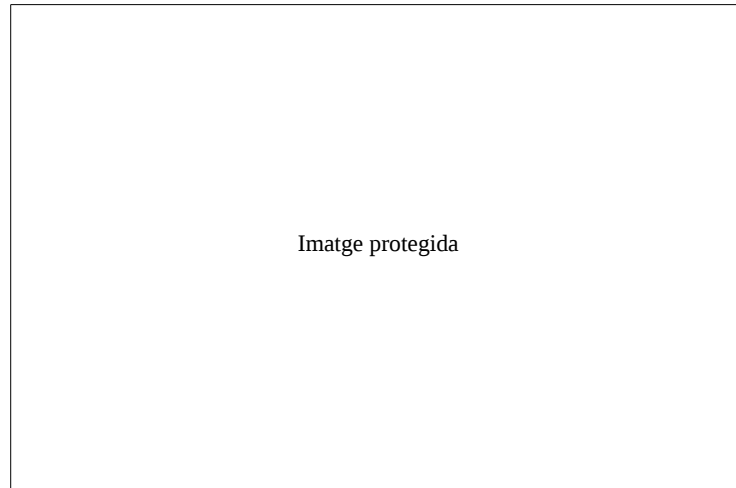


(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	4,417E-03	4,42	70 °C	9
"C", "D", "E"	6,009E-03	6,01	48 °C	10,84

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	5,55	0 °C	2952	21,3
"C"	7,07	0 °C	3758	53,2
"D"	7,07	0 °C	3758	21,3
"E"	7,07	0 °C	3758	31,9

Figura 3.13.: Nivell de *LEL* teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 188m/min i una recirculació del 40%

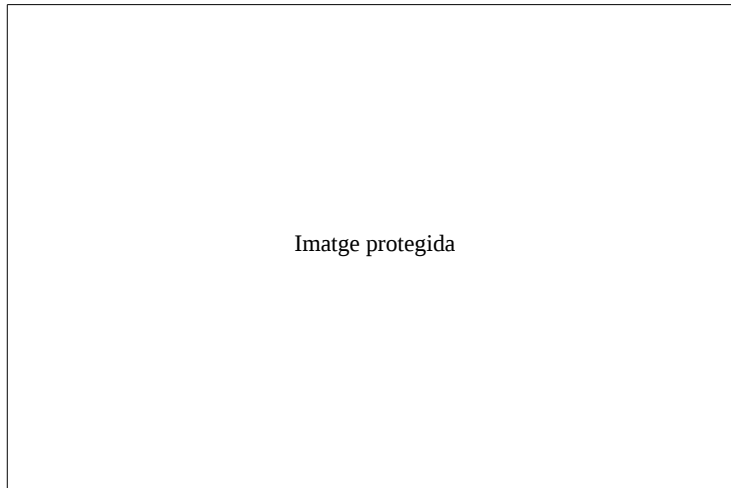


(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	0,000E+00	0,00	70 °C	0
"C", "D", "E"	4,258E-03	4,26	48 °C	7,68

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	0,00	0 °C	0	0,0
"C"	5,01	0 °C	2663	37,7
"D"	#iDIV/0!	0 °C	2663	0,0
"E"	5,01	0 °C	2663	37,7

Figura 3.14.: Nivell de *LEL* teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 222m/min i una recirculació del 0%

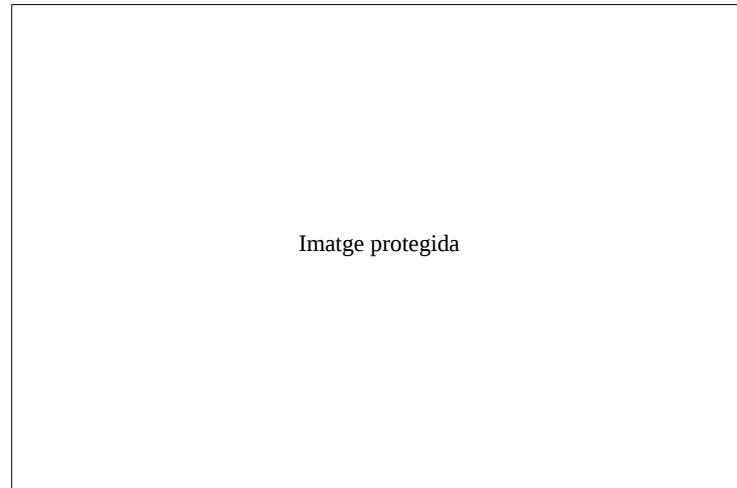


(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	3,515E-03	3,51	70 °C	7
"C", "D", "E"	6,171E-03	6,17	48 °C	11,13

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	4,42	0 °C	2349	16,9
"C"	7,26	0 °C	3859	54,6
"D"	7,26	0 °C	3859	16,9
"E"	7,26	0 °C	3859	37,7

Figura 3.15.: Nivell de *LEL* teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 222m/min i una recirculació del 31%

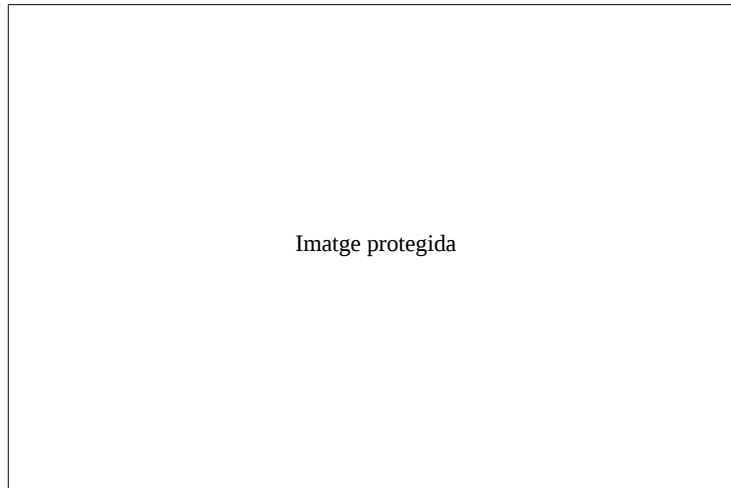


(%) LEL
LEL < 40
40 <= LEL <= 45
LEL > 45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	5,216E-03	5,22	70 °C	10
"C", "D", "E"	7,096E-03	7,10	48 °C	12,80

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	6,55	0 °C	3485	25,1
"C"	8,34	0 °C	4438	62,8
"D"	8,34	0 °C	4438	25,1
"E"	8,34	0 °C	4438	37,7

Figura 3.16.: Nivell de *LEL* teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 222m/min i una recirculació del 40%

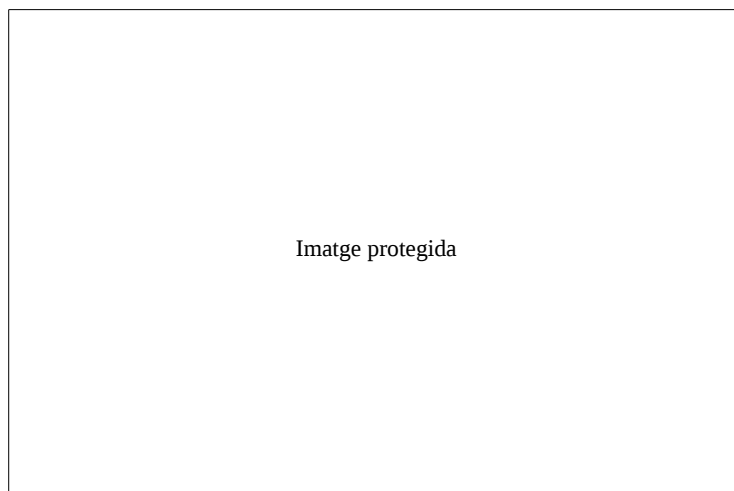


(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	7,823E-03	7,82	70 °C	15
"C", "D", "E"	8,515E-03	8,52	48 °C	15,36

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	9,83	0 °C	5228	37,7
"C"	10,01	0 °C	5325	75,4
"D"	10,01	0 °C	5325	37,7
"E"	10,01	0 °C	5325	37,7

Figura 3.17.: Nivell de *LEL* teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 222m/min i una recirculació del 50%

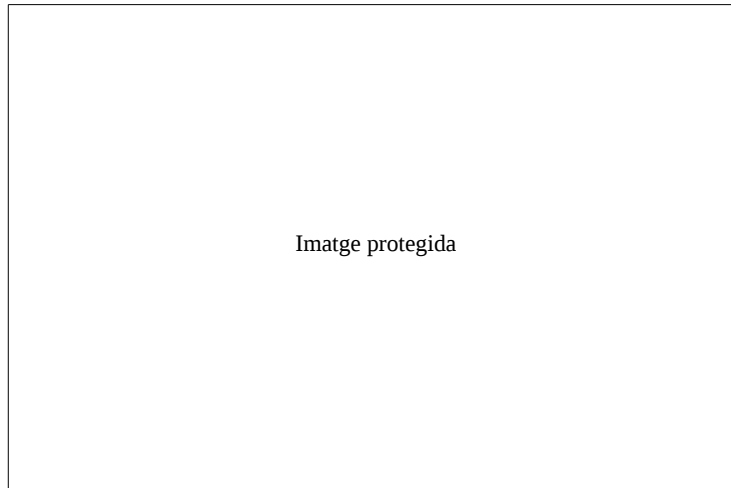


(%) LEL
LEL < 40
40 <= LEL <= 45
LEL > 45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	6,249E-03	6,25	70 °C	12
"C", "D", "E"	8,503E-03	8,50	48 °C	15,34

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	7,85	0 °C	4176	30,1
"C"	10,00	0 °C	5317	75,3
"D"	10,00	0 °C	5317	30,1
"E"	10,00	0 °C	5317	45,2

Figura 3.18.: Nivell de *LEL* teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 266m/min i una recirculació del 40%



(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	6,766E-03	6,77	70 °C	13
"C", "D", "E"	9,206E-03	9,21	48 °C	16,61

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	8,50	0 °C	4521	32,6
"C"	10,82	0 °C	5757	81,5
"D"	10,82	0 °C	5757	32,6
"E"	10,82	0 °C	5757	48,9

Figura 3.19.: Nivell de *LEL* teòric, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 288m/min i una recirculació del 40%

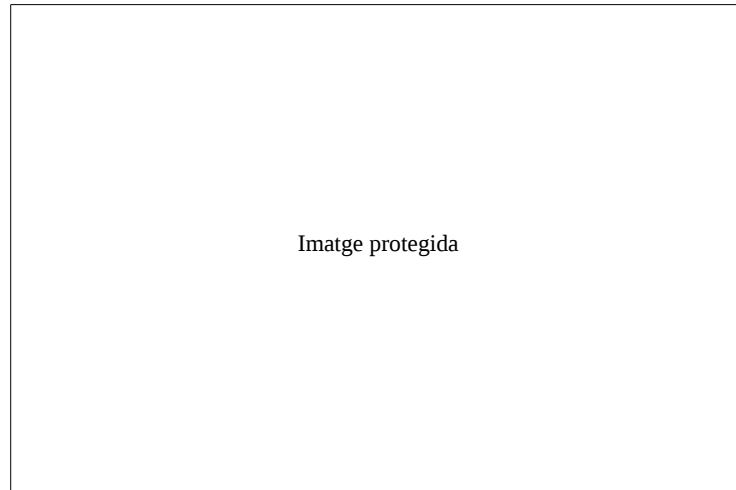


Figura 3.20.: Mostra impresa del treball núm. 1

3.5.2. Treball núm. 2

El material sobre el que s'imprimeix aquest treball té una amplada de 1150mm, i en el revers del material. El cabal d'impulsió és de " $Q_{impulsió}$ " i el cabal d'aspiració és de " $Q_{aspiració}$ ". La temperatura d'assecatge és diferent en els dos casos estudiats, però es mantenen constants la temperatura de l'aire fresc i la temperatura ambiental de la nau. El balanç del circuit d'assecatge també es considera constant per a qualsevol de les configuracions estudiades. Els paràmetres que defineixen el treball es mostren a la taula 3.14 i els resultats del model matemàtic implementat amb la fulla de càlcul es resumeixen a la taula 3.15 (el *LEL* que figura a la taula per a cadascun dels casos estudiats és el corresponent al punt *E* dels esquemes de la fig. 3.21 i fig. 3.22). El treball imprès es presenta a la fig. 3.23 i a la fig. 3.24.

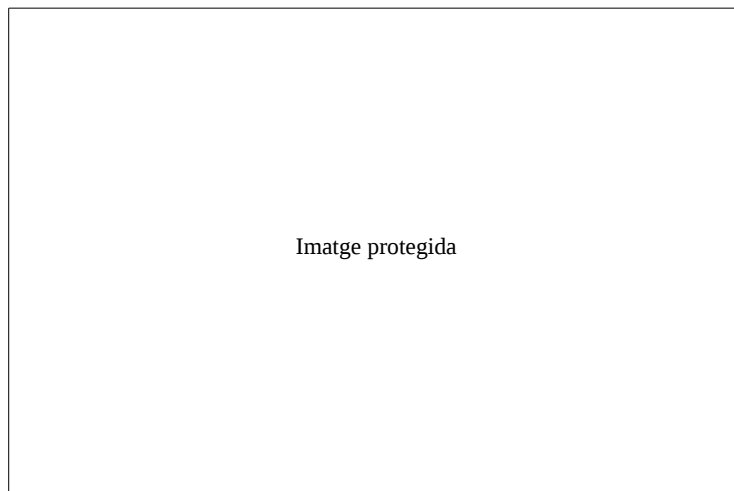
Amb les dades d'aquest treball no és possible extreure conclusions de tendències, ja que només es disposa de dues dades experimentals obtingudes sota condicions de temperatura i velocitat diferent en els dos casos. No obstant això, els resultats sí que s'utilitzen per veure la concordança entre els resultats del model que s'ha fet i els resultats experimentals; de la mateixa manera que en el cas anterior anomenat *treball 1* les diferències entre els resultats són properes a un 30%.

	Tinta	Anilox (cm^3/m^2)	Cobertura (%)	Aportació (tant per u)
Tinter 1	Pantone	9	5	0.6
Tinter 2	----	----	----	----
Tinter 3	Pantone	9	5	0.6
Tinter 4	Quadricromia	5	20	0.6
Tinter 5	Quadricromia	5	5	0.6
Tinter 6	Pantone	9	45	0.6
Tinter 7	Quadricromia	5	5	0.6
Tinter 8	Quadricromia	3	10	0.6
Tinter 9	----	----	----	----
Tinter 10	Fons blanc	16	50	0.6

Taula 3.14.: Fitxa d'impressió del treball núm. 2

	Tª tinters (°C)	Velocitat impressió (m/min)	Recirculació (%)	LEL experimental (%) 20°C	LEL teòric (%) Tª	LEL teòric (%) 20°C	Diferència (%) 20°C
1	38	250	40	8	5.4	5.3	33
2	70	333	40	10	7.6	7.5	25

Taula 3.15.: Comparativa de nivell de *LEL* real / teòric per el treball núm. 2

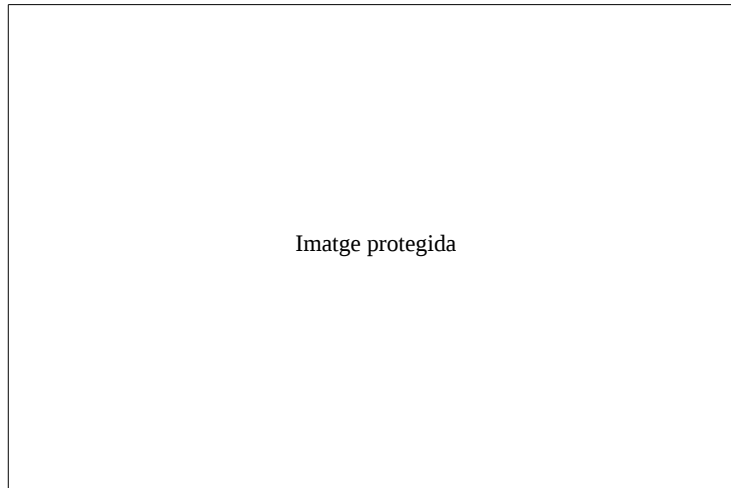


(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	2,328E-03	2,33	38 °C	4
"C", "D", "E"	3,168E-03	3,17	32 °C	5,38

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	2,65	0 °C	1420	11,3
"C"	3,54	0 °C	1895	28,2
"D"	3,54	0 °C	1895	11,3
"E"	3,54	0 °C	1895	16,9

Figura 3.21.: Nivell de *LEL* teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 38°C, per una velocitat de 250m/min i una recirculació del 40%



(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	3,101E-03	3,10	70 °C	6
"C", "D", "E"	4,219E-03	4,22	48 °C	7,64

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	3,90	0 °C	2087	15,0
"C"	4,96	0 °C	2657	37,6
"D"	4,96	0 °C	2657	15,0
"E"	4,96	0 °C	2657	22,6

Figura 3.22.: Nivell de *LEL* teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 333m/min i una recirculació del 40%

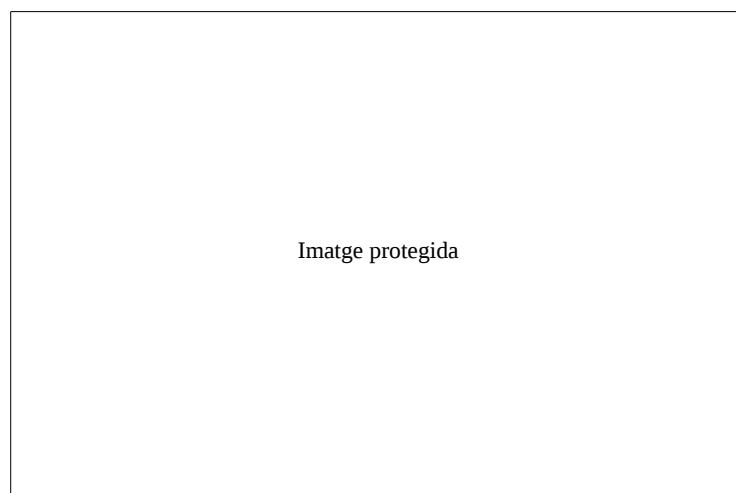


Figura 3.23.: Mostra impresa del treball núm. 2

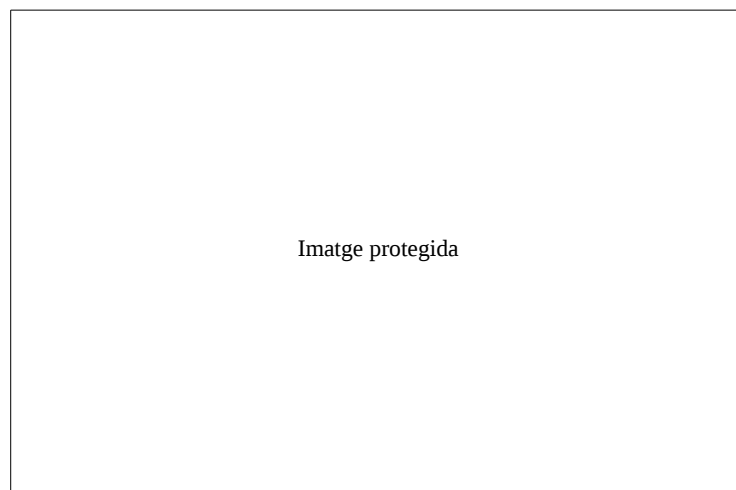


Figura 3.24.: Mostra impresa del treball núm. 2

3.5.3. Treball núm. 3

El material sobre el que s'imprimeix aquest treball té una amplada de 1160mm, i en l'anvers del material. El cabal d'impulsió és de " $Q_{impulsió}$ " i el cabal d'aspiració és de " $Q_{aspiració}$ ". La temperatura d'assecatge és la mateixa en els dos casos estudiats, i es mantenen constants la temperatura de l'aire fresc i la temperatura ambiental de la nau. El balanç del circuit d'assecatge també es considera constant per a qualsevol de les configuracions estudiades. Els paràmetres que defineixen el treball es mostren a la taula. 3.16 i els resultats del model matemàtic implementat amb la fulla de càlcul es resumeixen a la taula. 3.17 (el *LEL* que figura a la taula per a cadascun dels casos estudiats és el corresponent al punt *E* dels esquemes de la fig. 3.25 i fig. 3.26). El treball imprès es presenta a la fig. 3.27.

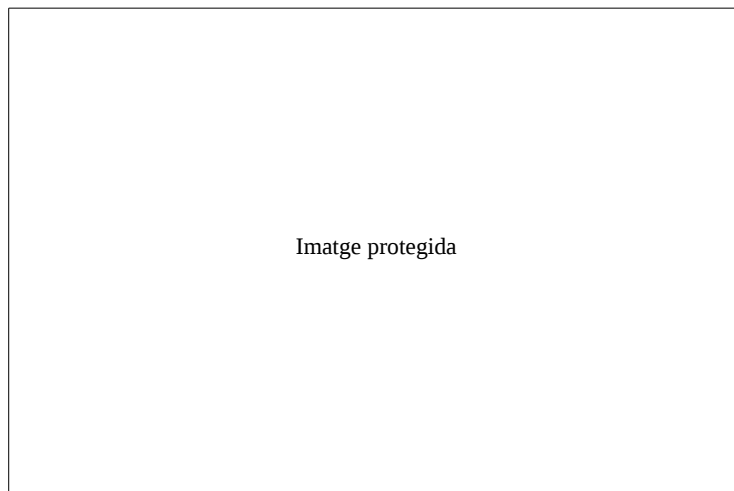
En aquest cas, ambdós resultats sí que són comparables entre ells, i segueixen la mateixa tendència que el cas *treball 1*, on sota les mateixes condicions de temperatura i velocitat d'impressió, un augment en la recirculació provoca un augment del nivell de *LEL* a l'extracció de la màquina.

	Tinta	Anilox (cm^3/m^2)	Cobertura (%)	Aportació (tant per u)
Tinter 1	Fons blanc	16	75	0.6
Tinter 2	-----	-----	-----	-----
Tinter 3	Pantone	8	5	0.6
Tinter 4	Quadricromia	5	5	0.6
Tinter 5	Quadricromia	5	60	0.6
Tinter 6	Pantone	9	5	0.6
Tinter 7	Quadricromia	5	5	0.6
Tinter 8	Quadricromia	5	5	0.6
Tinter 9	Pantone	9	5	0.6
Tinter 10	-----	-----	-----	-----

Taula 3.16.: Fitxa d'impressió del treball núm. 3

	Tª tinters (°C)	Velocitat impressió (m/min)	Recirculació (%)	LEL experimental (%) 20°C	LEL teòric (%) Tª	LEL teòric (%) 20°C	Diferència (%) 20°C
1	70	122	33	7	5.5	5.3	24
2	70	122	41	8	6.2	6.1	24

Taula 3.17.: Comparativa de nivell de *LEL* real / teòric per el treball núm. 3

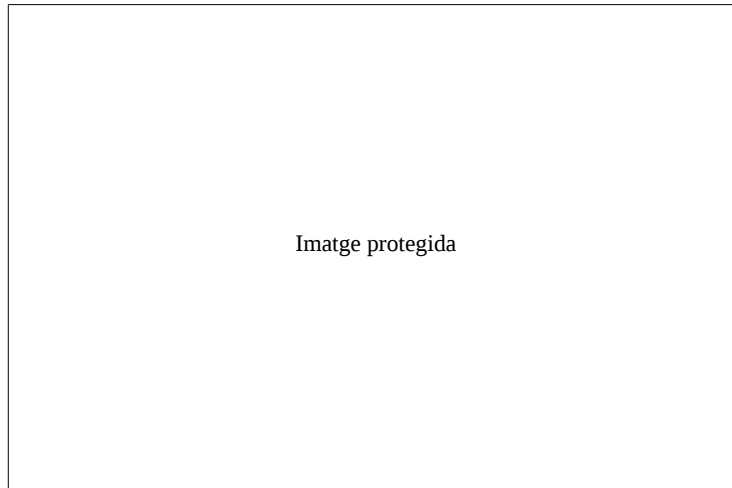


(%) LEL
LEL < 40
40 ≤ LEL ≤ 45
LEL > 45

Punt	[solvent] (kg/m ³)	[solvent] (g/m ³)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	1,828E-03	1,83	70 °C	3,59
"C", "D", "E"	3,015E-03	3,02	48 °C	5,45

Punt	[solvent] (g/Nm ³)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm ³)	Carboni (kgC/h)
"A"	2,30	0 °C	1225	8,8
"C"	3,55	0 °C	1890	26,8
"D"	3,55	0 °C	1890	8,8
"E"	3,55	0 °C	1890	17,9

Figura 3.25.: Nivell de *LEL* teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 122m/min i una recirculació del 33%



(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	2,580E-03	2,58	70 °C	5,07
"C", "D", "E"	3,424E-03	3,42	48 °C	6,18

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	3,24	0 °C	1728	12,5
"C"	4,03	0 °C	2147	30,4
"D"	4,03	0 °C	2147	12,5
"E"	4,03	0 °C	2147	17,9

Figura 3.26.: Nivell de *LEL* teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 122m/min i una recirculació del 41%

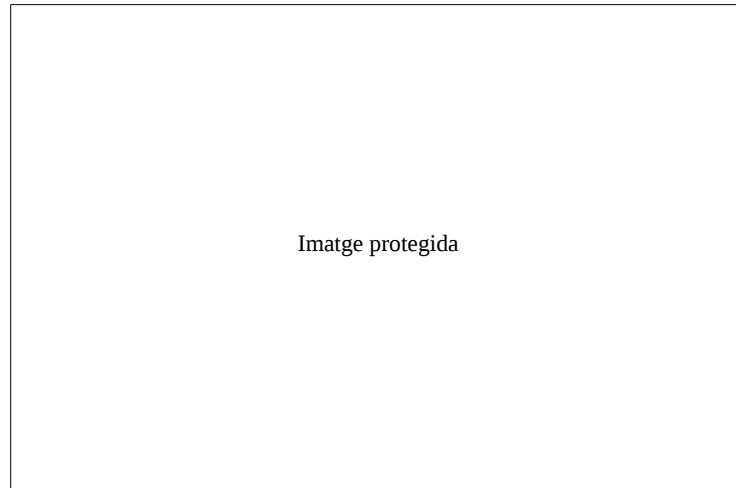


Figura 3.27.: Mostra impresa del treball núm. 3

3.5.4. Treball núm. 4

El material sobre el que s'imprimeix aquest treball té una amplada de 1000mm, i en l'anvers del material. El cabal d'impulsió és de " $Q_{impulsió}$ " i el cabal d'aspiració és de " $Q_{aspiració}$ ". La temperatura d'assecatge és la mateixa en els dos casos estudiats, i es mantenen constants la temperatura de l'aire fresc i la temperatura ambiental de la nau. El balanç del circuit d'assecatge també es considera constant per a qualsevol de les configuracions estudiades. Els paràmetres que defineixen el treball es mostren a la taula. 3.18 i els resultats del model matemàtic implementat amb la fulla de càlcul es resumeixen a la taula. 3.19 (el *LEL* que figura a la taula per a cadascun dels casos estudiats és el corresponent al punt *E* dels esquemes de la fig. 3.28 i fig. 3.29). El treball imprès es presenta a la fig. 3.30.

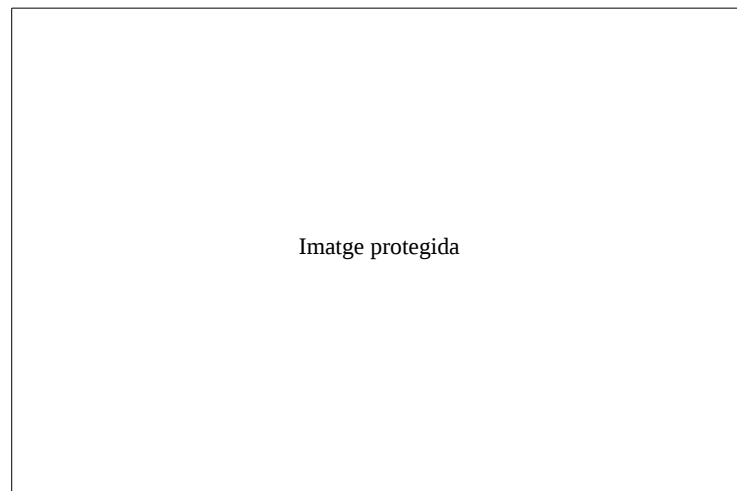
En aquest cas, ambdós resultats sí que són comparables entre ells, i segueixen la mateixa tendència que el cas *treball* 1, on sota les mateixes condicions de temperatura i recirculació, un augment en la velocitat d'impressió provoca un augment del nivell de *LEL* a l'extracció de la màquina.

	Tinta	Anilox (cm^3/m^2)	Cobertura (%)	Aportació (tant per u)
Tinter 1	Fons blanc	16	70	0.6
Tinter 2	----	----	----	----
Tinter 3	----	----	----	----
Tinter 4	----	----	----	----
Tinter 5	----	----	----	----
Tinter 6	Pantone	9	35	0.6
Tinter 7	----	----	----	----
Tinter 8	----	----	----	----
Tinter 9	----	----	----	----
Tinter 10	----	----	----	----

Taula 3.18.: Fitxa d'impressió del treball núm. 4

	Tª tinters (°C)	Velocitat impressió (m/min)	Recirculació (%)	LEL experimental (%) 20°C	LEL teòric (%) Tª	LEL teòric (%) 20°C	Diferència (%) 20°C
1	70	88	40	3	3.1	3.0	0
2	70	200	40	4	7.0	6.8	70

Taula 3.19.: Comparativa de nivell de *LEL* real / teòric per el treball núm. 4

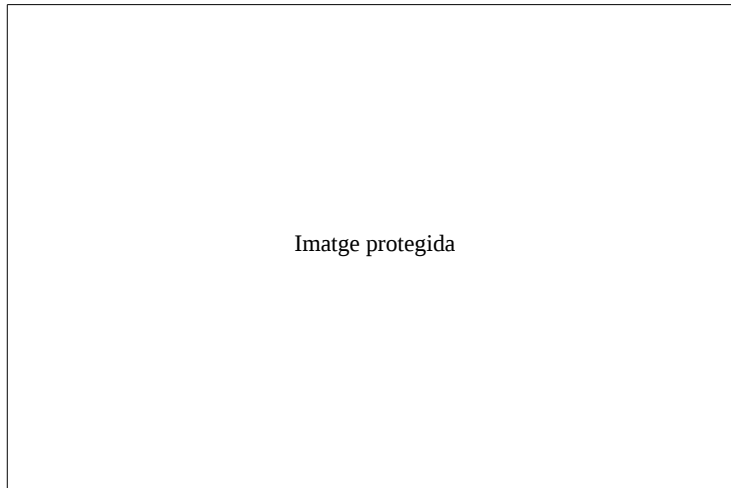


(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m3)	[solvent] (g/m3)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	1,252E-03	1,25	70 °C	2,45
"C", "D", "E"	1,703E-03	1,70	48 °C	3,06

Punt	[solvent] (g/Nm3)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm3)	Carboni (kgC/h)
"A"	1,57	0 °C	830	6,0
"C"	2,00	0 °C	1057	15,0
"D"	2,00	0 °C	1057	6,0
"E"	2,00	0 °C	1057	9,0

Figura 3.28.: Nivell de *LEL* teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 88m/min i una recirculació del 40%



(%) LEL
LEL<40
40<=LEL<=45
LEL>45

Punt	[solvent] (kg/m ³)	[solvent] (g/m ³)	Temperatura (°C)	Nivell de LEL (%)
"A"	2,845E-03	2,84	70 °C	5,56
"C", "D", "E"	3,871E-03	3,87	48 °C	6,96

Punt	[solvent] (g/Nm ³)	Temperatura (°C)	Carboni (mgC/Nm ³)	Carboni (kgC/h)
"A"	3,57	0 °C	1887	13,6
"C"	4,55	0 °C	2402	34,0
"D"	4,55	0 °C	2402	13,6
"E"	4,55	0 °C	2402	20,4

Figura 3.29.: Nivell de *LEL* teòric segons la fulla de càlcul, per temperatura d'assecatge 70°C, per una velocitat de 200m/min i una recirculació del 40%

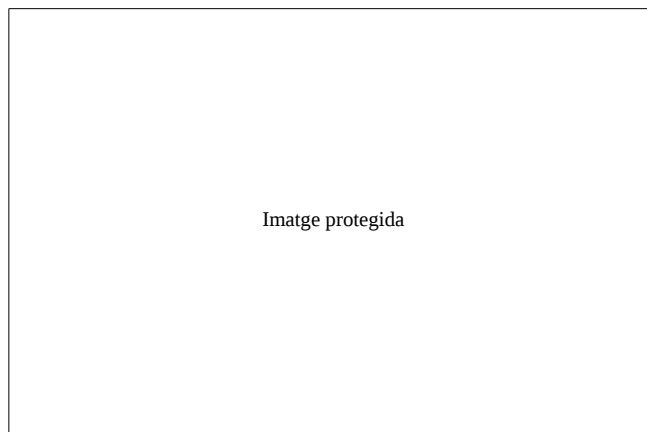


Figura 3.30.: Mostra impresa del treball núm. 4

3.5.5. Anàlisi de resultats pels diversos treballs estudiats

A la secció anterior s'ha contrastat la diferència que hi ha entre els valors experimentals i els valors teòrics predits per la fulla de càlcul que s'ha generat, i l'error que s'ha obtingut ronda aproximadament el 30% com a màxim en la majoria dels casos.

No obstant, hi ha un cas on aquest error augmenta fins al 70%, en el cas número 2 del *treball 4*, que consisteix en un treball d'únicament dos colors. A partir d'això es pot deduir que l'aproximació és més bona en tots aquells treballs on hi hagi més tinters involucrats imprimint alhora.

L'error del 30% obtingut és un valor relativament alt i porta a considerar que la fulla de càlcul pot ésser utilitzada com a una eina purament estimativa, degut a la gran quantitat de suposicions que s'han hagut de fer a l'hora de realitzar els càlculs. Cal recordar que totes aquestes divergències vénen causades per la impossibilitat de mesurar o conèixer de manera fiable/exacta determinats punts clau per a l'estimació d'emissions de les màquines i que es llisten tot seguit:

1. Impossibilitat de conèixer exactament els solvents continguts en la tinta: tot i que es va demanar als fabricants de tintes quins components contenen els dissolvents de les tintes, només varen poder aportar una aproximació de la seva composició real ja que no podien desvetllar la composició per secret industrial. Per altra banda, es desconeix la composició aproximada de les tintes utilitzades el dia de la impressió, però si que es coneix quina tipologia de tinta es tractava (Pantone, quadricromia, fons blanc, fons no blanc i color pla).
2. Additius de dissolvents a les tintes per millorar-ne les propietats: en la fulla de càlcul es parteix d'uns estàndards que s'utilitzen habitualment a Comexi, però que poden variar en funció del treball que s'està portant a terme.

3. Percentatge que s'evapora a tinters i a túnel: la quantitat de tinta que s'assecarà al cos impressor o bé al túnel d'assecatge es va definir a partir de criteris dels companys d'aplicacions, però no es disposa d'aquests valors mesurats experimentalment; són valors aproximats i basats en la seva experiència com a impressors.
4. Cabals d'impulsió, extracció i recirculació: la concentració de solvents depèn del cabal d'aire que estigui circulant pel circuit d'assecatge de la màquina. Va ser possible mesurar el cabal d'impulsió i el d'extracció, però no el de recirculació. Tot i que la posició de les vàlvules sigui la que s'ha aportat en els diversos diagrames per a cada treball, és possible que tot i que la vàlvula de recirculació estigui en la situació del 40% no té que significar necessàriament que s'estigui recirculant un 40% del cabal de recirculació tal i com s'ha suposat en els càlculs.
5. Capacitat d'assecatge de la màquina: s'ha partit de la idealització de què la màquina és capaç d'assecar el treball al 100% independentment de la velocitat i la temperatura a la qual la màquina estigui imprimint, així com del nivell de *LEL* que tingui l'aire que es recircula. Temperatures més altes afavoriran que sigui possible assecar més quantitat de solvent que no pas a temperatures més baixes. El cas contrari és la velocitat, on a més velocitat d'impressió provocarà un punt a partir del qual la màquina no sigui capaç d'assecar tota la quantitat de tinta que s'està aplicant al substrat (augmentarà la retenció de solvents en la mostra impresa); per tant a mesura que augmenta la velocitat tendirà a abaixar la capacitat d'assecatge de la màquina.
6. Pèrdues de temperatura per convecció i radiació en els conductes de la màquina: en aquest punt també s'ha idealitzat la màquina considerant un comportament adiabàtic.
7. Calibració del *LEL*: els sensors de *LEL* estan calibrats en base a un sol dissolvent, i en el cas que ocupa aquest anàlisi apareixen multitud de solvents barrejats.

Per tant, per finalitzar, la fulla de càlcul es pot assumir més aviat com una eina qualitativa que no pas com a una eina quantitativa, tot i que per altra banda els resultats teòrics i els experimentals són del mateix ordre de magnitud i tenen un error d'aproximadament el 30%.

3.6. Evolució del nivell de *LEL* sota diverses condicions de treball

En aquest apartat s'analitza de quina manera afecta al nivell de *LEL* en funció de les possibles configuracions de la màquina, s'estudia un treball típic, com pot ser per exemple el treball núm. 1 que s'ha estudiat anteriorment.

3.6.1. En funció de la recirculació

Si tot mantenint tots els paràmetres que defineixen el treball i el sistema d'assecatge constants i només es varia la recirculació (quantitat d'aire de l'extracció contaminat amb solvent que es torna a introduir dintre del sistema d'assecatge) s'extreuen les següents conclusions:

Els paràmetres fixes que s'han utilitzat per els càlculs són:

Temperatura ambiental de 24°C, temperatura d'assecatge 70°C, cabal d'impulsió a la temperatura d'assecatge " $Q_{impulsió}$ ", balanç del " $balanç\%$ ".

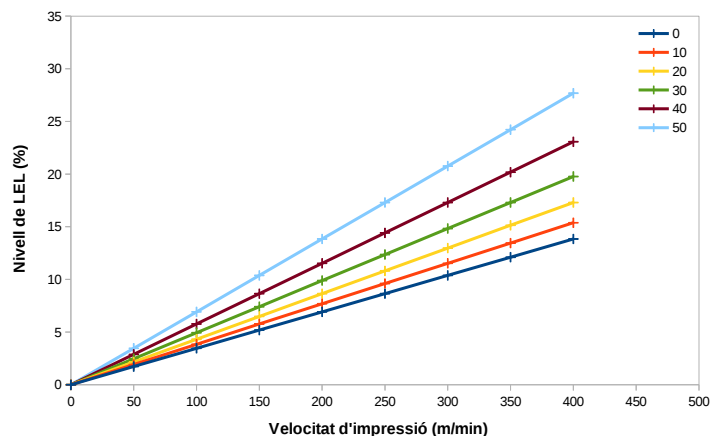


Figura 3.31.: Estimació del nivell de *LEL* a l'aspiració del sistema d'assecatge en funció de la recirculació, per diverses velocitats d'impressió (recirculació variable del 0% al 50%)

1. A mesura que la velocitat d'impressió augmenta, augmenta també la quantitat de dissolvent que cal assecat en la mateixa proporció. El fet de considerar que la màquina té un comportament ideal, comporta que s'assequi tot el solvent que s'està aplicant, per tant la manera en què va variant el *LEL* en funció de la velocitat d'impressió s'ajusta a un comportament lineal. Això seria el cas ideal, però cal notar que a mesura que hi ha més solvent contingut en l'aire d'assecat, la màquina perd certa capacitat d'assecatge, i arribaria un punt límit que al incrementar la velocitat d'avanç del substrat augmentaria la retenció de solvent a la mostra impresa. A més a més de l'efecte que té l'aire contaminat en la capacitat d'assecatge, que en aquest capítol no s'ha tingut en compte, també cal tenir present que a mesura que augmenta la velocitat d'impressió disminueix progressivament la quantitat de solvent que s'està evaporant en el sistema d'assecatge, ja que el material resta menys temps sota els efectes de les pantalles d'assecatge (en el cap. 9 s'estudia detalladament aquest efecte). Així doncs, la fig. 3.31 mostra el *LEL* límit que es s'assoliria amb un assecatge ideal.

2. Per una mateixa velocitat d'impressió, a mesura que augmenta la recirculació, augmenta el nivell de *LEL*.
3. Tal i com es pot veure a fig. 3.33, la variació que experimenta el nivell de *LEL* és molt més sensible a la recirculació a mesura que augmenta la velocitat del substrat.
4. La dependència que hi ha entre el nivell de *LEL* d'un treball i la recirculació, segons es pot veure a la fig. 3.33 i fig. 3.34 no té un comportament lineal, sinó que a mesura que augmenta la recirculació, la variació del nivell de *LEL* tendeix a pujar de cada vegada de manera més acusada.
5. A mesura que augmenta la recirculació del sistema, si es desitja no sobrepassar un determinat nivell de *LEL*, implicarà disminuir la velocitat d'avanç del substrat. Per exemple, segons es veu a la fig. 3.32, si no es vol sobrepassar un nivell prefixat de *LEL* de per exemple el 13% a mesura que s'augmenta la recirculació implica que la màquina ha de treballar a menor velocitat:

Recirculació (%)	<i>LEL</i> (%)	Velocitat (m/min)
0	13	375
10	13	338
20	13	300
30	13	263
40	13	225
50	13	188

Taula 3.20.: Afectació de la recirculació a la velocitat d'impressió, per no sobrepassar un determinat nivell de *LEL*

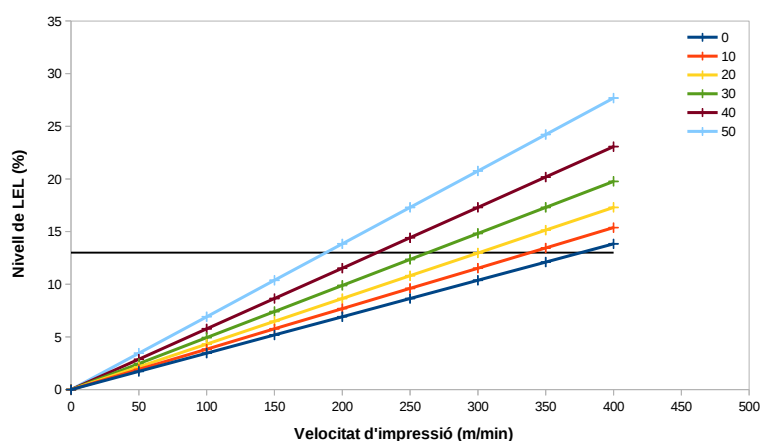


Figura 3.32.: Limitació de la velocitat d'impressió per a diverses recirculacions i un nivell màxim de *LEL* igual al 13%

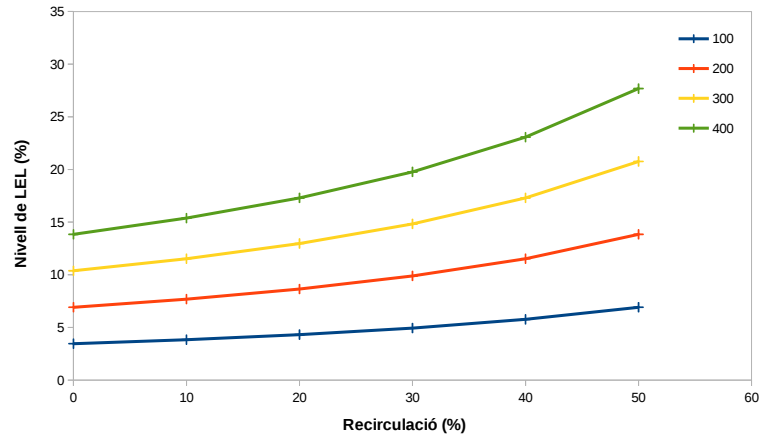


Figura 3.33.: Variació del nivell de *LEL* per a diverses recirculacions, en funció de la velocitat d'impressió

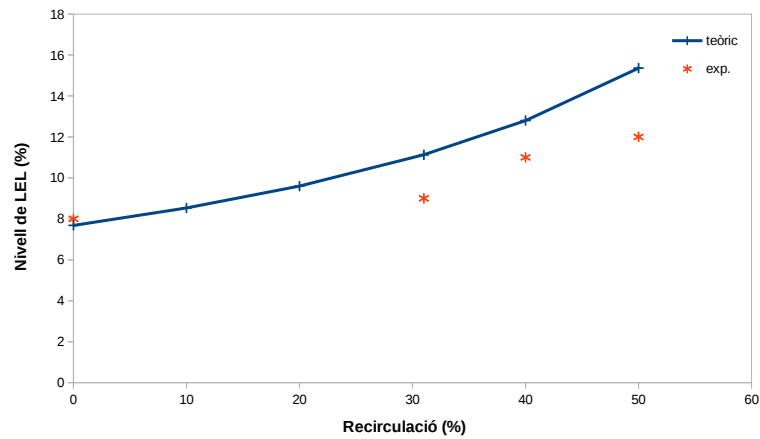


Figura 3.34.: Variació del nivell de *LEL* per a diverses recirculacions, a una velocitat de $222m/min$.

3.6.2. En funció del balanç de les pantalles

A la fig. 3.35 es mostra com varia el nivell de *LEL* a l'extracció del circuit d'assecatge, per diversos balanços de la pantalla i per diverses recirculacions del circuit d'assecatge (s'entén per balanç d'una pantalla, aquella quantitat d'aire suplementària que cal aspirar respecte de la que s'està impulsant per a portar a terme l'assecatge del

3.6 Evolució del nivell de *LEL* sota diverses condicions de treball

treball que s'està imprimint, de manera que s'eviti que flueixi cap a l'exterior de la pantalla part de l'aire contaminat amb el solvent que s'ha evaporat).

1. Per una mateixa recirculació, a mesura que augmenta el balanç disminueix el nivell de *LEL*.
2. Al igual que passava en el cas anterior, per un mateix balanç, a l'augmentar la recirculació també ho fa el nivell de *LEL*.

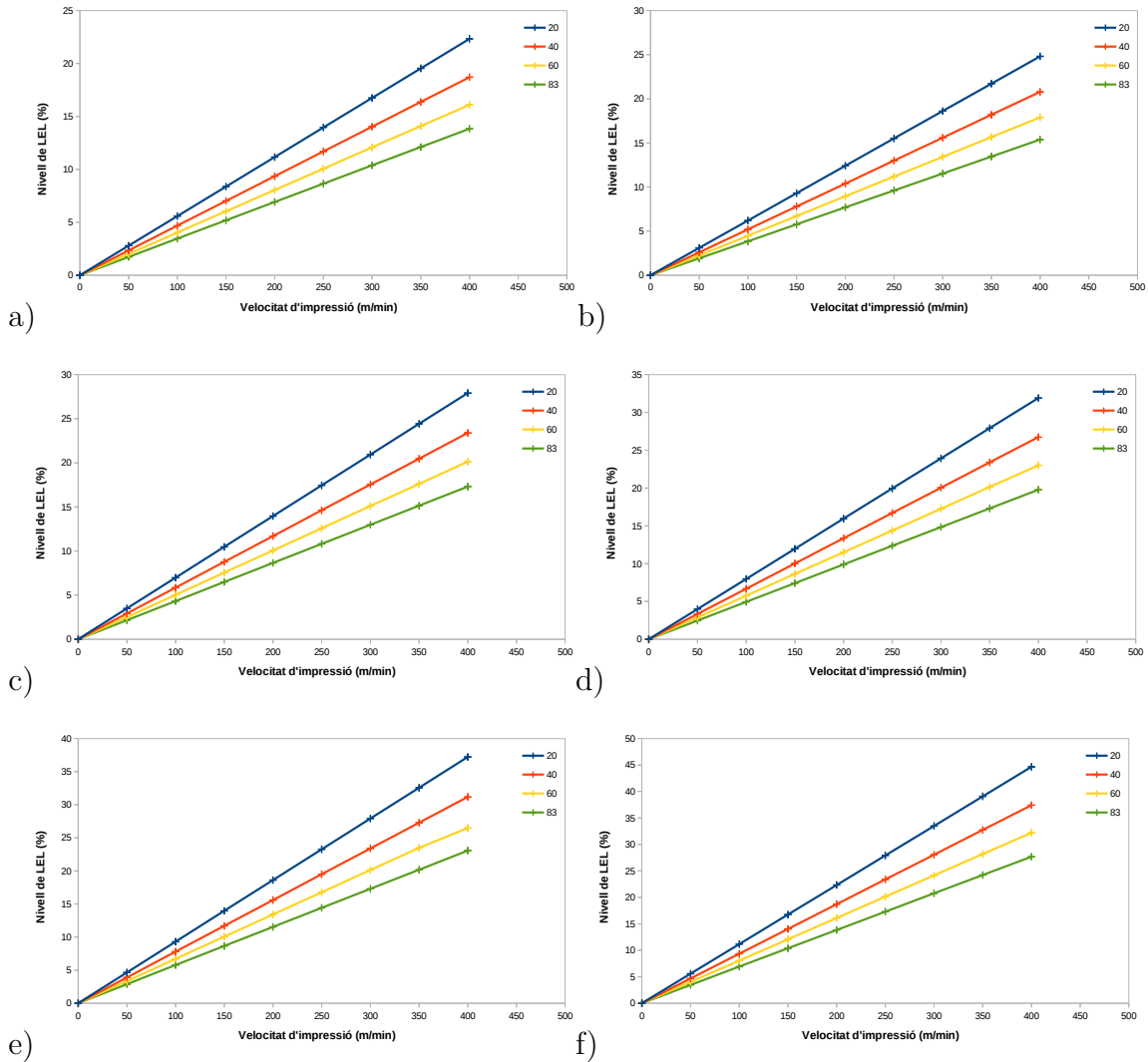


Figura 3.35.: Variació del nivell de *LEL* per diversos balanços de la pantalla (del 20% al 83%) i per diverses recirculacions (a=0%, b=10%, c=20%, d=30%, e=40%, f=50%)

3.6.3. En funció de la temperatura d'assecatge

Tal i com es pot veure a la fig. 3.36, si tots els paràmetres d'impressió es mantenen constants a excepció de la temperatura d'assecatge, es pot veure com un augment en la temperatura fa augmentar també el nivell de *LEL*. A major temperatura de l'aire utilitzat per a l'assecat, és menor la quantitat de solvent que aquest pot admetre com perquè la màquina treballi dintre d'una zona segura, tal i com s'ha descrit a la fig. 3.3.

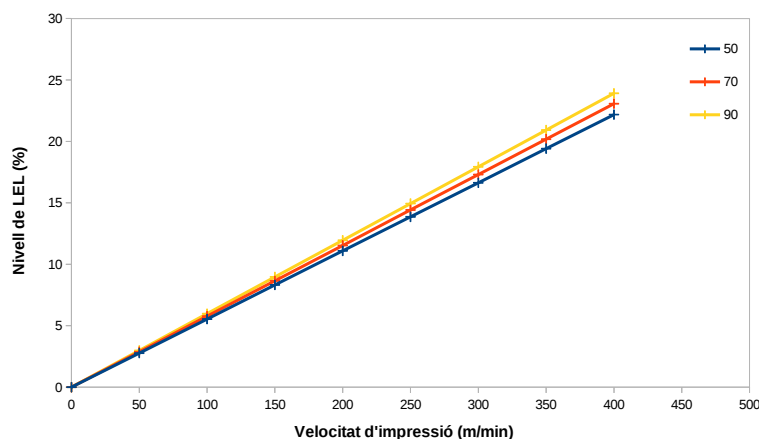


Figura 3.36.: Variació del nivell de *LEL* per a un balanç del 83% i una recirculació del 40%, tot variant la temperatura d'assecatge a 50°C, 70°C i 90°C

3.7. Incineració dels gasos continguts en l'aire

Els gasos contaminats provinents del solvent evaporat durant el procés d'assecat, no es poden evacuar directament a l'atmosfera ja que per a poder-ho fer cal assegurar que el contingut de solvents en l'aire no sobrepassi el valor límit d'emissió imposat per la normativa del país on s'instal·la la màquina.

Per tal de reduir aquestes emissions s'utilitzen els oxidadors tèrmics regeneratius "RTO", com el que es mostra a la fig. 3.37:

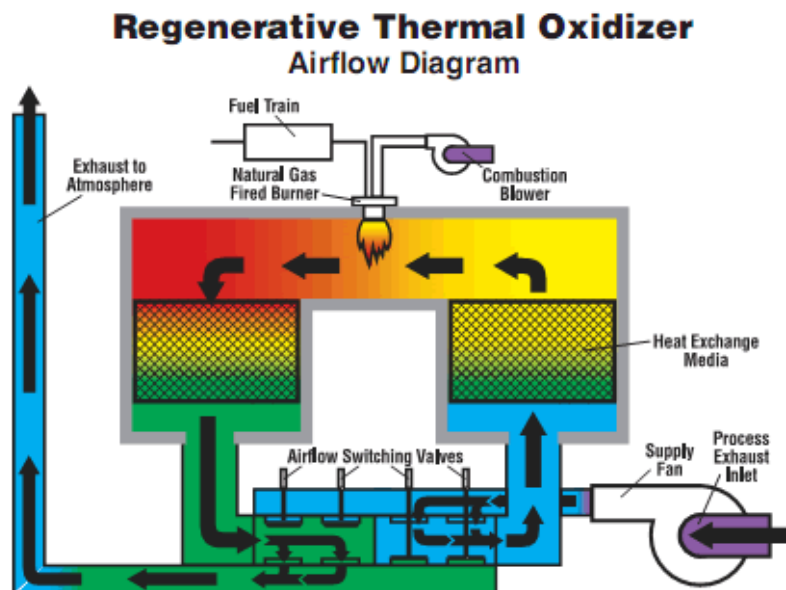


Figura 3.37.: Esquema de funcionament d'un *RTO* [29]

Els oxidadors tèrmics regeneratius consisteixen en unes torres verticals recobertes internament per material ceràmic que es troba a alta temperatura, típicament al voltant d'uns 800°C aproximadament. L'aire amb alta concentració de solvent provinent del procés d'impressió entra a l'*RTO* a baixa temperatura (a la temperatura dels gasos d'extracció de la màquina, per exemple a 60°C) a la primera torre que es troba amb la ceràmica més freda que no pas l'altra torre. A mesura que aquests gasos entren en contacte amb la ceràmica es van escalfant fins arribar a la temperatura de treball de l'*RTO* (800°C) i els gasos resten sota aquestes condicions un cert temps. L'equipament està dissenyat de manera que després de que els compostos orgànics volàtils hagin estat a alta temperatura durant un cert temps i sota a unes condicions de turbulència (els tres paràmetres temps, temperatura i turbulència són els que controlen la quantitat de solvents que s'oxiden) s'hagin oxidat aquests compostos tot formant CO_2 , H_2O i escalfor. L'escalfor que desprenen els gasos en la reacció d'oxidació provoquen l'escalfament de la ceràmica de la segona torre abans de sortir a través del tren de vàlvules i la xemeneia que evacua els gasos cap a l'exterior.

Quan la ceràmica de la segona torre ha arribat a una certa temperatura, aleshores el tren de vàlvules de l'equipament canvia de posició tot fent entrar l'aire més fresc per la segona torre; d'aquesta manera aquesta torre es refreda i ara la torre 1 serà la que s'anirà escalfant. Aquest intercanvi en la direcció dels gasos es va fent constantment depenent de les temperatures que assoleix el sistema.

Com es pot veure en l'esquema, hi ha una font de calor que és l'encarregada d'escalfar la ceràmica fins a la temperatura de treball adient com per oxidar els solvents

continguts en l'aire; això provoca que per cremar les emissions que es produeixen en el procés d'impressió és necessari cremar una certa quantitat de gas (per exemple gas natural). Per altra banda, si la concentració de solvent contingut en els gasos que cal tractar supera un determinat llindar, $1.5g/Nm^3$ [55] aleshores l'equipament entra en la funció "autotherm" que significa que l'escalfor despresat en el procés d'oxidació és suficient com per mantenir la ceràmica a la temperatura adequada, i que per tant no fa falta aportar combustible addicional per cremar aquests gasos. Per tant, quan més concentrat de solvent estigui l'aire que cal tractar, més propera estarà la instal·lació de treballar sense necessitat d'aportar combustible com per mantenir la temperatura de dintre de la cambra de combustió de l'*RTO*.

3.8. Conclusions

L'objectiu d'aquest capítol ha estat el de generar un model matemàtic que s'ha implementat a través d'una fulla de càlcul que permet fer una estimació de les emissions de solvents que produeix una impressora flexogràfica en funció de la configuració del treball que s'està portant a terme (tipus de tinta, cobertura o volum de tinta aportat sobre el substrat entre d'altres), així com dels paràmetres que defineixen el sistema d'assecatge de la màquina (com per exemple el cabal d'aire que s'està vehiculant, la temperatura d'assecatge, recirculació o velocitat d'impressió).

Malgrat el gran nombre de variables que entren en joc i l'elevat nombre de suposicions que s'han hagut de prendre a l'hora d'implementar els càlculs, ha estat possible arribar a uns resultats teòrics similars als resultats recollits experimentalment, amb un error d'aproximadament d'un 30% del nivell de *LEL* predit per la fulla de càlcul en relació al mesurat experimentalment. Degut a aquest fet s'aconsella utilitzar aquesta fulla de càlcul des d'un punt de vista orientatiu, com a una primera aproximació del punt de funcionament que s'obtidria en una màquina real imprimint un treball.

El que sí s'ha pogut apreciar dels resultats dels càlculs, és com el fet de recircular part de l'aire d'extracció novament cap al circuit d'impulsió del sistema d'assecatge aporta una major concentració de solvent contingut en l'aire i per tant un augment del nivell de *LEL* en el circuit. També cal notar que a mesura que augmenta la velocitat d'impressió, el fet d'augmentar el percentatge de recirculació té una repercussió cada vegada més marcada en l'augment del nivell de *LEL* que mesura la màquina.

Pel que fa al balanç de la pantalla, el fet de poder-lo abaixar facilitarà que els gasos d'extracció de la màquina estiguin més carregats de solvent (una major concentració de solvent), i que per tant l'incinerador o *RTO* al tenir una concentració més rica en compostos orgànics volàtils assoleixi un llindar de concentració suficient com perquè arribi a funcionar en "autotherm".

Com a punt final d'aquest capítol, cal notar que els resultats experimentals que s'han contrastat pertanyen només a l'assecatge del cos impressor, i per tant caldria

contrastar la fulla de càlcul amb l'assecatge que es porta a terme en el túnel, pel qual no va ésser possible recollir dades ja que el sensor de mesura de *LEL* no estava operatiu.

4. Introducció a *OpenFOAM*®

Tal i com s'exposa en els diversos capítols que segueixen, l'objectiu d'aquesta tesi doctoral es centra en la millora de la capacitat d'assecatge de les màquines que fabrica Comexi, centrant especialment l'atenció en les impressores flexogràfiques.

La optimització dels sistemes d'assecatge s'implementa en dues fases; la primera etapa que consisteix en caracteritzar el comportament real de les pantalles disponibles a fàbrica a partir de les mesures experimentals realitzades en el banc de proves de què es disposa, i la segona etapa que es centra en la realització de nous dissenys o bé de proposta de millores o modificacions a portar a terme en els dissenys ja existents. La primera etapa es pot portar fàcilment a terme i a un cost reduït, degut al fet que es disposa de diverses pantalles d'assecatge que es poden assajar sota diverses condicions de treball, ja que el banc de proves disponible permet cobrir un elevat rang de condicions de treball (diversos cabals i diverses temperatures). Són sobretot les etapes de desenvolupament de nous dissenys i d'aportació de millores als dissenys ja existents, que comporten un cost molt més elevat ja sigui pel cost temporal de desenvolupament del nou producte, com pel cost econòmic derivat de la realització de prototips (realització de plànols, temps de fabricació).

Amb l'objectiu de reduir costos i temps en el desenvolupament de nous dissenys, és necessari disposar d'una eina que permeti portar a terme aquestes tasques de manera ràpida, econòmica i amb resultats fiables. És en aquest punt on la realització de simulacions de tipus *CFD* (dinàmica de fluids computacional) aporta un gran avantatge ja que compleix amb les tres premisses anteriors.

Pel que fa als programaris que hi ha disponibles en el mercat per a la resolució d'aquesta tipologia de problemes es pot distingir entre codis comercials o bé codi lliure:

1. Programari de codi comercial: aquest programari va acompanyat de llicències comercials i amb un cost elevat d'adquisició o de manteniment de la llicència. Seria el cas de programes de reconegut prestigi i utilitzats en la indústria i en la recerca com per exemple la plataforma *Ansys*® (que inclou *Ansys CFX*, i *Fluent*), així com l'empresa CD-adapco que comercialitza el programari *Star-CCM+*®, o també per exemple el software Comsol. Aquests tipus de codis tenen l'avantatge que al ser utilitzats per un nombre més elevat d'usuaris, disposa d'una major quantitat de bibliografia per a consulta, i el seu ús és més intuïtiu al tenir un interfície gràfica d'usuari dissenyada especialment per a cada software.

2. Programari de codi lliure: són totalment gratuïts, com per exemple *OpenFOAM*® (*Open-CFD Ltd Esi-Group*). Aquest tipus de programari té l'avantatge que el codi intern que utilitza és accessible a l'usuari permetent-li modificar-lo i adaptar-lo a les seves necessitats, o bé crear els seus propis codis. Aquest és un programari de reconegut prestigi que ha estat adoptat per diverses empreses (per exemple la matriu formada per el grup Seat, Audi, Volkswagen, Skoda i per un ampli nombre de grups de recerca d'universitats). El nom que pren el programa prové de les seves sigles en anglès que signifiquen Open Source Field Operation and Manipulation, que consisteix principalment en un conjunt de llibreries generades amb llenguatge de programació C++, que conformen un conjunt de resolutoris que solucionen una tipologia específica de problema i utilitats que el que fan és manipulació de dades del cas que s'està analitzant amb l'objectiu de resoldre unes certes tasques.

Durant l'etapa prèvia a l'inicial del doctorat, *Comexi* no tenia implementada la tecnologia de simulació de dinàmica de fluids computacional. Per tant, va ser necessari escollir d'entre les opcions disponibles en el mercat, la que s'adeqüés millor a les necessitats de l'empresa. La implementació final que s'ha escollit és la de portar a terme les simulacions mitjançant codi lliure ja que la codificació interna és totalment oberta a l'usuari i és gratuït. Per contra té com a dificultat principal la corba d'aprenentatge associada al seu propi ús, ja que al no disposar d'un entorn gràfic propi fa que sigui més difícil acostumar-se al seu funcionament ràpidament.

4.1. Instal·lació i aprenentatge d'*OpenFOAM*®

El sistema operatiu que s'ha utilitzat per a les eines de simulació d'aquesta tesi doctoral és el sistema operatiu *xubuntu* que ja portava pre-instal·lada la distribució *Caelinux* que s'ha utilitzat i que consisteix en una distribució *Linux* amb tot un conjunt d'eines de tipologia CAD, CAM, CAE/FEA/CFD (totes elles de codi lliure); així en aquesta distribució ja venien pre-instal·lats tots els programaris que s'han utilitzat com per exemple Salome (software per a la generació de geometries o models tridimensionals que posteriorment s'estudien amb *OpenFOAM*®), GNU Octave (software per a la realització de càlculs numèrics, equivalent al software de nom comercial Matlab), *OpenFOAM*® (software per a la resolució de casos de tipologia CFD) i ParaView (software de post-procés per estudiar els resultats obtinguts mitjançant el software de simulació CFD).

Una vegada ja instal·lat *OpenFOAM*®, es disposa d'un seguit d'exemples que porta incorporats el propi software dintre de la carpeta anomenada *tutorials*. Estan classificats en funció de la tipologia de cas que es desitgi estudiar (fluid compressible o incompressible i transferència de calor són les tipologies que s'adapten al conjunt de casos estudiats en aquesta tesi doctoral). També es disposa de certa documentació com una guia d'usuari i una guia per al programador per a assentar les bases com per poder utilitzar el programa. Tot i que la informació disponible era relativament

extensa, es va considerar que era necessari realitzar un curs de formació inicial per aprendre més ràpidament tot el necessari per a poder modelar convenientment els casos que s'adaptaven a les necessitats de Comexi; es va optar per assistir a un curs de formació per adquirir les destreses bàsiques en OpenFOAM® organitzat per un grup de recerca anomenat Wolf Dynamics de la Universitat de Gènova [30]. A partir de la informació facilitada en aquest curs, que disposava també d'un gran nombre de casos pràctics resolts amb una explicació dels passos a seguir per la resolució del cas, i de les informacions recollides a la xarxa internet així com en llibres especialitzats, han estat les bases a partir de les quals s'han basat les preparacions dels casos.

4.2. Passes a seguir per a la resolució d'un cas amb OpenFOAM

Una simulació realitzada mitjançant CFD consisteix en la modelització matemàtica del comportament d'un flux de fluid que es troba sota els efectes d'unes condicions de contorn com poden ser per exemple: velocitat, pressió, temperatura o transferència de calor, de manera que aquest model matemàtic reproduïxi de manera fidedigna el comportament real del cas que es desitja estudiar; així doncs, els resultats obtinguts de les simulacions acostumen a anar acompanyats o recolzats de dades experimentals que corroborin la bona correspondència entre els resultats reals i els resultats obtinguts via simulació.

A l'hora de modelitzar un cas és necessari qüestionar-se, prèviament a la resolució del mateix, quines són les característiques més importants que defineixen el problema que es desitja resoldre. Per exemple, és important tenir clar si es tracta d'un flux laminar o turbulent (en cas de tractar-se d'un flux turbulent cal activar la turbulència en la modelització, i escollir el model de turbulència que més s'adapti al cas que es vol resoldre), si es tracta d'un cas en estat estacionari o transitori, si cal tenir en compte la transferència de calor, si es tracta el fluid com a compressible o bé com a incompressible, o per exemple definir les zones on cal refinar el mallat en aquells punts on es produeixin gradients més importants, entre molts altres aspectes. És important recopilar dades experimentals per tal de validar que els resultats obtinguts mitjançant el modelat matemàtic que s'ha fet mitjançant simulació s'aproximin suficientment als resultats obtinguts de manera experimental.

Una vegada es coneix la naturalesa del problema que cal estudiar, i s'ha plantejat quina és la modelització matemàtica que li escau de manera més adient, es procedeix a muntar el cas i a la seva posterior resolució mitjançant simulació CFD.

Les etapes que cal seguir per a la resolució del cas, ja sigui amb software de codi comercial o bé amb codi lliure, sempre són les mateixes: pre-procés, resolució i post-procés. En els apartats que segueixen s'explica de manera molt simplificada en què consisteix cadascuna d'aquestes etapes.

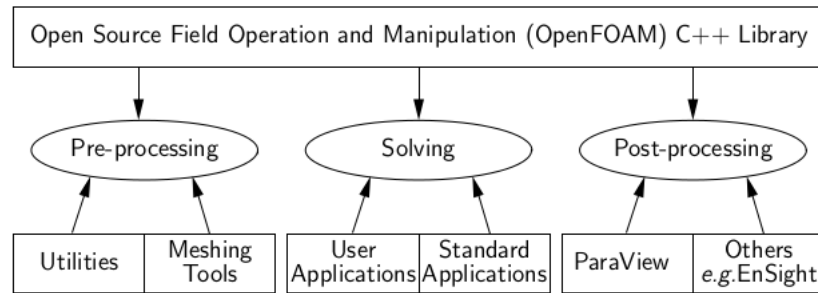


Figura 4.1.: Etapes per a la resolució d'un cas mitjançant CFD [37]

Pre-procés

La primera etapa per a la preparació d'una simulació passa per a la generació de la geometria del cas que es desitja estudiar. Aquesta geometria, en funció de la seva complexitat, es pot generar dintre del mateix software *OpenFOAM*[®] mitjançant un diccionari anomenat *blockMeshDict* que s'executa amb l'ordre anomenada *blockMesh* (molt recomanable per geometries simples per a la facilitat de parametritzar la geometria), o bé es pot utilitzar un programari extern a partir del qual es genera la geometria i després s'exporta en format *.stl* a *OpenFOAM*.

En funció de la simplicitat de les geometries analitzades en aquesta tesi, s'ha optat per les dues opcions. En el cas de l'estudi de les pantalles d'assecatge, tant pel que fa a la impulsió com per l'aspiració, i al tractar-se de geometries tridimensionals complicades, s'ha utilitzat el software anomenat *Salome* que estava disponible dintre de la distribució *CaLinux* que s'ha utilitzat per el desenvolupament d'aquesta tesi. Per altra banda, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció d'un bufador de ranura, s'ha optat per realitzar la geometria directament utilitzant el diccionari *blockMeshDict*.

Una vegada es disposa de la geometria del cas, cal realitzar el mallat d'aquesta geometria, que consisteix en una discretització del domini de tipus fluid en el qual s'aproximarà la solució numèrica. Totes aquestes cel·les en què es divideix la geometria inicial conformen el que s'anomena mallat, i és en aquestes cel·les on es realitzaran pròpiament els càlculs per a la resolució del cas.

Un mallat correcte del cas és molt important, ja que una malla de mala qualitat (per exemple que contingui elements molt irregulars) pot conduir a simulacions que no arribin a convergir a un resultat final. Per aconseguir resultats acurats, i que la simulació arribi a convergir, per una banda és necessari fer un refinament de malla en aquelles zones on es preveuen gradients importants en les variables del fluid, i per l'altra és convenient que els elements del mallat siguin el màxim de regulars possibles. De fet, el propi software disposa de la instrucció *checkMesh* que proporciona un resum dels paràmetres més característics del mallat que s'ha fet, com per

exemple el nombre d'elements, la irregularitat dels elements i el nombre de regions o dominis entre d'altres paràmetres.

Resolució

Aquesta és la part del procés, conjuntament amb el mallat de la geometria que es vol analitzar, que consumeix més temps a l'hora de realitzar una simulació CFD.

Els sistemes d'equacions algebraïques es resolen mitjançant uns algorismes que solucionen el problema a través d'un procés de càlcul iteratiu. Com és natural, a mesura que es complica el cas que es pretén resoldre, augmenta el nombre d'equacions que cal resoldre, i el temps de càlcul esdevé més gran.

El software disposa d'un gran nombre de solvers que permeten modelar multitud de casos; per exemple règim laminar o turbulent, transferència de calor, estat transitori o estacionari, fluid compressible o incompressible entre molts d'altres. Per a cada cas a analitzar cal escollir el model que més s'ajusti a les necessitats del cas a resoldre. Una de les particularitats d'aquest software, és que al tractar-se de codi lliure, és possible accedir i per tant llegir i modificar a criteri de l'usuari els models dels solvers actuals o bé els paràmetres d'aquest i adaptar-los a les seves necessitats particulars de la simulació que s'està portant a terme.

Post-procés

Una vegada s'ha portat a terme la simulació, es disposa d'un gran nombre de dades que cal analitzar i/o tractar per extreure'n conclusions. Una de les eines de què es disposa per a l'anàlisi d'aquests resultats és el software també de codi lliure anomenat ParaView, que permet veure els detalls del flux i representar per exemple la distribució de velocitats, de pressió i de temperatura entre altres.

Un aspecte molt important a tenir en compte és que cal contrastar sempre que sigui possible els resultats que s'han extret mitjançant simulació amb resultats experimentals. De fet, una simulació sempre aportarà un resultat final al problema que s'ha definit; però cal tenir present que, degut al gran nombre de paràmetres que defineixen una simulació és probable que variant alguns d'aquests paràmetres els resultats finals variïn de manera considerable. Així doncs, preferiblement, cal disposar de dades experimentals d'un problema similar al que cal resoldre amb l'objectiu de validar la modelització que s'ha fet del problema, i posteriorment adaptar aquesta modelització al nou cas que es desitja estudiar.

4.3. Estructura general dels casos

Per a la resolució dels casos, és indispensable conèixer i respectar l'estructura d'arxius que té predeterminada el software OpenFOAM. Aquest esquema es mostra a la fig. 4.2, on es mostra l'estructura d'un cas amb el mínim nombre d'arxius que cal definir per a la resolució del mateix

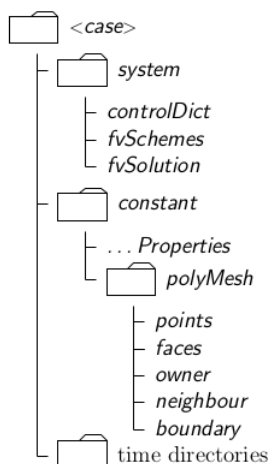


Figura 4.2.: Estructura bàsica per a la resolució d'un cas [37]

La carpeta arrel *< case >* és la carpeta que conté tots els arxius que defineixen el cas i se li pot associar el nom que es desitgi, sempre tenint cura de no deixar espais en blanc en el nom de l'arxiu. Dintre d'aquesta carpeta, sempre hi haurà les subcarpetes *system*, *constant* i finalment un nombre de carpetes indeterminat que es correspondrà amb el nombre de instant temporal o de iteracions en què s'han desat els resultats intermedis de la solució; una de les carpetes corresponent a aquests *time directories* es correspondrà amb les condicions inicials dels diversos camps que defineixen el cas i les condicions de contorn que corresponguin (habitualment aquesta carpeta s'anomena amb el nom "0").

El directori anomenat *system* conté tots aquells paràmetres relacionats amb el procés de resolució del cas. Aquest directori contindrà com a mínim els arxius *controlDict* on s'especifica el nom del solver al que s'apunta per a la resolució del cas, la iteració en que es comença a resoldre el cas, el nombre de iteracions o l'espai temporal que es deixa entre dos resultats que es desin de manera consecutiva, quan cal aturar la simulació, quin pas temporal es deixa entre dues iteracions consecutives; l'arxiu *fvSchemes* on s'especificuen els esquemes de discretització utilitzats per a la solució del cas; i finalment l'arxiu *fvSolution* on es determinen els solvers a utilitzar per a cadascuna de les equacions de discretització (el solver a què fa referència aquest arxiu és el mètode aplicat per a la resolució de la matriu d'equacions, que és diferent del solver del cas que descriu les equacions a utilitzar per a la resolució d'un cas).

El directori *constant* conté la informació de la malla (tota aquest informació queda inclosa en un altre subdirectori anomenat *polyMesh*), i també conté la família d'arxius *Properties* on s'especifica per exemple si es tracta d'un règim laminar o turbulent mitjançant la selecció d'un determinat model de turbulència (arxiu *RASProperties*), les propietats del fluid com per exemple la viscositat cinemàtica o el coeficient d'expansió tèrmica (arxiu *transportProperties*), l'arxiu on s'especifica

si es realitzarà una modelització de la turbulència per exemple tipus RANS (arxiu *turbulenceProperties*).

Finalment els directoris temporals on es guarden els valors dels diversos camps que s'estan estudiant. Aquests valors com ja s'ha dit abans poden ser els valors inicials i les condicions de contorn que defineixen el problema, o bé resultats intermedis que ha desat el propi software en funció de l'especificació que s'ha fet a l'arxiu *controlDict*.

5. Optimització pantalles assecatge del cos impressor

5.1. Descripció i plantejament de la problemàtica a resoldre

5.1.1. Introducció

El cos impressor d'una impressora flexogràfica és la part més important de la màquina, ja que és on s'imprimeix la imatge que es desitja transferir al substrat que posteriorment serà utilitzat com a embalatge flexible amb la finalitat de protegir el producte que s'envasa, facilitar-ne la conservació per evitar que es malmeti, o per exemple fer destacar el producte respecte del de la competència mitjançant un envàs més atractiu visualment.

L'aparença final de l'envàs flexible juga un paper fonamental ja que es pot considerar, des d'un punt de vista comercial, com la carta de presentació de l'empresa envers el client que adquireix el producte final envasat. Des d'aquest punt de vista és molt important que la imatge impresa sobre el substrat sigui el més nítida possible, i tingui la tonalitat de color i l'aparença desitjada per el client que fabrica el producte que es vol envasar; doncs una imatge borrosa o poc curosa pot fer desistir la compra del producte.

Per aconseguir que la imatge impresa sigui el més similar possible a la imatge desitjada és necessari que les pantalles d'assecatge, ja siguin les del cos impressor o bé les que estan situades en el túnel d'assecatge, proporcionin un assecat el més uniforme possible al llarg de tota l'amplada del material, o el que és equivalent, al llarg de tot el llavi de la pantalla.

5.1.2. Components d'una pantalla d'assecatge entre tinters i limitacions dels dissenys actuals

Una pantalla situada en el cos impressor d'una impressora flexogràfica consta de dues parts elementals, la part corresponent a la cambra impulsíó, i la part corresponent a l'aspiració.

La part de la impulsió consisteix bàsicament en una cambra amb un orifici circular d'entrada situat al lateral de la pantalla a través del qual s'aporta aire dintre de la cambra d'impulsió de manera continuada; una vegada la cambra s'ha omplert, aquest aire surt a través del llavi de la pantalla, que consisteix en un passamà d'alumini al qual s'ha mecanitzat una ranura d'amplada constant al llarg de tota la pantalla. Aquest aire que surt a gran velocitat (entre " $V_1 m/s$ " i " $V_2 m/s$ ") i a una temperatura màxima de " $T_{màx.} °C$ " a través de la ranura o llavi de la pantalla, es fa incidir perpendicularment contra la tinta que s'havia aplicat sobre el substrat en el grup impressor situat prèviament a la pantalla d'assecatge. D'aquesta manera, s'asseca suficientment la tinta com per a poder-hi imprimir a sobre el color corresponent al grup impressor següent.

Una vegada aquest aire s'ha utilitzat per assecar part del solvent contingut en la tinta, cal evitar que s'escapi cap a l'exterior de la pantalla. És en aquest moment on entra en joc la part corresponent a l'aspiració, ja que és l'encarregada de recollir aquest aire i conduir-lo cap a l'exterior de la màquina. L'aire s'extreu a través d'un altre orifici circular situat al lateral de la pantalla a través del qual es provoca una depressió suficient dintre de la cambra d'aspiració com per a poder aspirar tot l'aire que s'ha impulsat durant el procés d'assecat, tot evitant que aquest aire s'escoli fora de la pantalla.

El disseny de les pantalles actuals presenta l'inconvenient que la distribució de velocitat que pren l'aire a la sortida del llavi no és constant al llarg de tota l'amplada de la pantalla, segons es representa de manera esquemàtica a la fig. 5.1. De color vermell s'ha representat la distribució de velocitats a la sortida del llavi, on s'aprecia que a l'extrem de la pantalla situat més allunyat respecte de la boca d'impulsió, la velocitat que assoleix l'aire pren el seu valor màxim.

Si per contra es centra l'atenció en la part corresponent a l'aspiració de la pantalla, la distribució de la velocitat de l'aire al llarg de tota l'amplada és totalment oposada a la que s'ha mostrat a la part corresponent a la impulsió, tal com es representa a la fig. 5.1 de color taronja. En aquest cas, la pantalla tendeix a aspirar més en la zona més propera a la boca d'aspiració que no pas en la part més allunyada respecte d'aquesta (essent la zona més allunyada de la boca d'aspiració on la velocitat d'impulsió a la sortida del llavi arriba al seu valor màxim). Aquest desequilibri entre el comportament de les dues zones de la pantalla (entre la part corresponent a la impulsió i a l'aspiració) provoca que l'aire que ha d'aspirar la pantalla com per a ser capaç de recollir tot l'aire que s'ha impulsat i evitar que aquest s'escapi fora de la pantalla, sigui molt superior al que seria desitjable; aquest fet, provoca alhora, que el volum d'aire que ha de moure la màquina per garantir un correcte funcionament de la pantalla sigui més gran de l'ideal (el cas ideal seria aquell en què l'aire extret o aspirat fos igual a l'aire que s'impulsa), tot incrementant innecessàriament la potència d'accionament dels ventiladors de la màquina, així com contribuint alhora en l'obtenció d'un volum d'aire poc concentrat en dissolvent provinent de la tinta que s'ha assecat en el cos impressor (dificultant que l'incinerador que ha de tractar els gasos d'extracció de la màquina pugui treballar en condicions de "autotherm").

El desequilibri, en tant que distribució de velocitat, que experimenta la pantalla s'ha representat a la fig. 5.2, on de color vermell s'ha representat l'aire corresponent a la impulsió (aire que s'utilitza per assecat la mostra impresa), de color taronja s'ha representat l'aire corresponent a l'aspiració (aire que ha d'aspirar la pantalla per evitar que l'aire impulsat s'escapi cap a l'exterior de la pantalla), i de color blau es representa l'aire fals (aire exterior que entra a través de l'obturador longitudinal de la pantalla, i que es correspon amb la diferència que hi ha entre l'aire impulsat i l'aire aspirat).

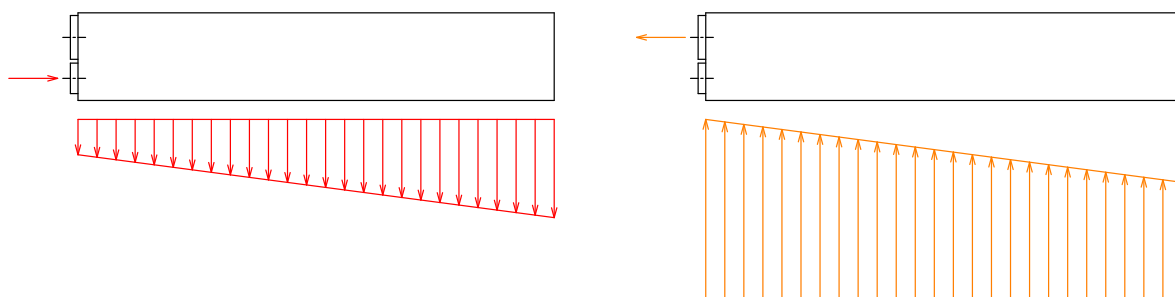


Figura 5.1.: Representació esquemàtica de la distribució de velocitats en les zones d'impulsió (esquerre) i aspiració de les pantalles (dreta)

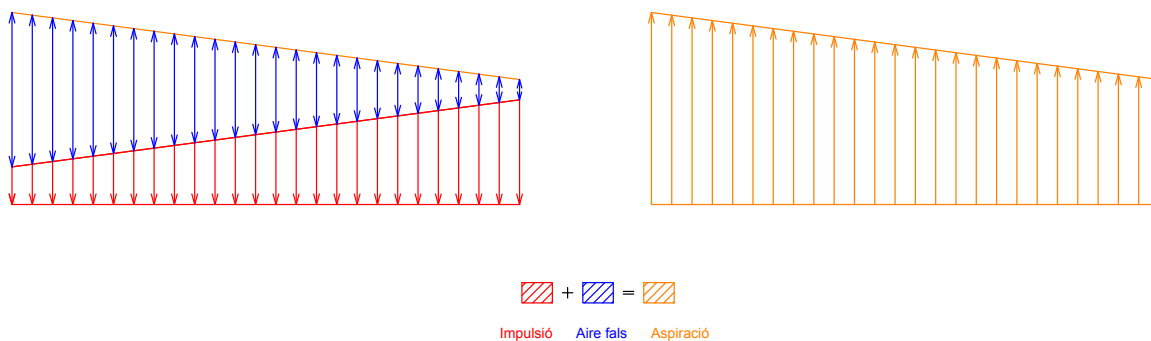


Figura 5.2.: Representació esquemàtica del desequilibri entre les velocitats d'impulsió i aspiració de les pantalles

Els volums d'aire representats a la fig. 5.2, es mostren de manera esquemàtica a les geometries de les pantalles actuals segons es pot veure a la fig. 5.107, a partir d'un tall transversal efectuat a la pantalla.

5.1.3. Posicionament de les pantalles d'assecatge en una impressora flexogràfica

A la fig. 5.3 es mostra la distribució de les pantalles d'assecatge entre tinters al voltant del tambor central d'una impressora flexogràfica. En aquest cas es tracta d'una impressora de 8 colors, i en concret del model de màquina "M4".

Tot i que la màquina és de 8 colors, només porta incorporades 7 pantalles d'assecatge, ja que l'últim grup impressor no disposa de pantalla al trobar-se aquest situat immediatament abans del túnel.

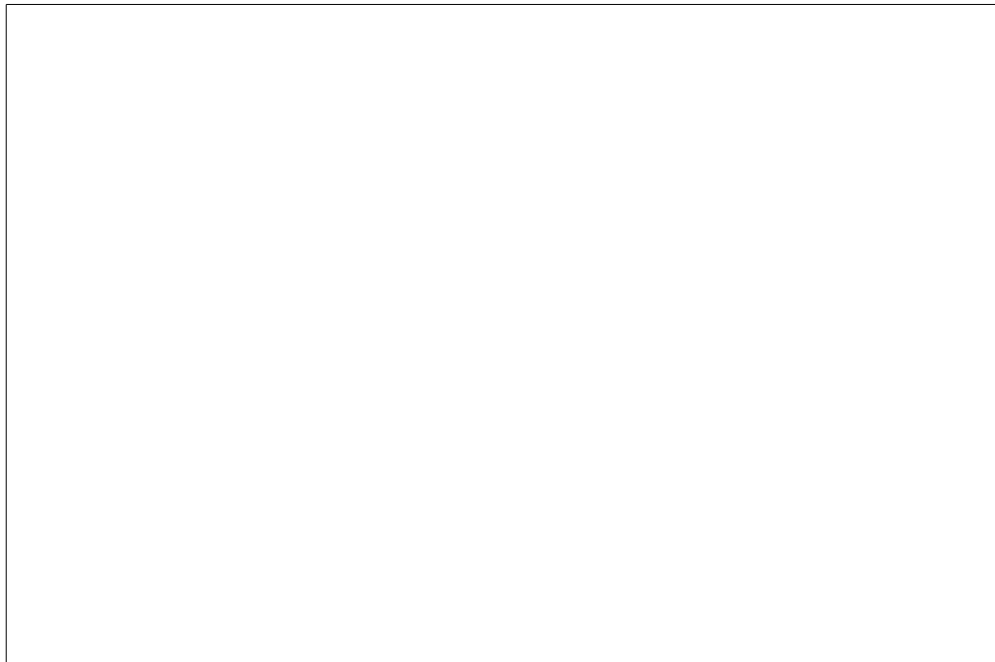


Figura 5.3.: Ubicació de les pantalles d'assecatge al voltant del tambor central d'una impressora flexogràfica de 8 colors

A la fig. 5.3 també és important visualitzar els orificis d'impulsió i d'aspiració d'aire de la pantalla, situats ambdós en un mateix lateral d'aquesta; a més a més, cal esmentar que l'espai que pot ocupar una pantalla d'assecatge és limitat per tal de no crear interferències amb altres elements de la màquina, com per exemple els grups impressors corresponents a cada tinter (entre dues pantalles consecutives hi ha situat un grup impressor).

5.1.4. Definició d'objectius a aconseguir i limitacions a tenir en compte

L'objectiu final d'aquest capítol consisteix en desenvolupar un nou concepte global de pantalla d'assecatge entre tinters (conjunt format per impulsió més aspiració) de manera que compleixi amb els requeriments que es llisten a continuació:

- Estabilitzar la velocitat de l'aire a la sortida del llavi, de manera que la distribució de velocitats sigui el més uniforme possible al llarg de tota l'amplada de la pantalla.
- Millorar el balanç de la pantalla, assolint un valor objectiu el més pròxim possible al 30% (aire de més que cal aspirar respecte del que s'impulsa a través del llavi per a assecar).
- L'envolupant exterior de la nova pantalla, en cap cas pot sobrepassar les dimensions exteriors de les pantalles actuals, i a més a més, els conductes que connecten amb la boca d'impulsió i aspiració de la pantalla no poden interferir amb les obertures de pas a través de la bancada de la màquina (cal respectar els orificis actuals de pas dels conductes a través de la bancada).
- La geometria, així com el posicionament del llavi respecte del tambor central resten invariables, és a dir, la ranura que fa les funcions del llavi ha de mantenir l'obertura de pas d'aire actual de " $a\text{ mm}$ " i no es pot apropar més al tambor central de la impressora (separació actual entre tambor - pantalla " $b\text{ mm}$ ").

Cal tenir present que el nou disseny de pantalla que es desenvolupa en aquest capítol manté la mateixa configuració de llavi que la pantalla actual, és a dir, té la mateixa secció de sortida, i per tant, té aproximadament la mateixa velocitat de sortida de l'aire en el llavi (el cabal d'impulsió que s'introdueix a la pantalla es manté, però es busca poder assolir una distribució més uniforme de la velocitat). El fet de no variar el cabal d'impulsió de la pantalla, i mantenir invariable la posició i secció de sortida del llavi, implica que la capacitat d'assecatge de la pantalla no serà massa distant respecte del disseny actual; no obstant això, el nou disseny que es planteja sí que aportarà una millor uniformitat en l'assecat de la mostra impresa, i contribuirà a disminuir el consum energètic de la màquina al disminuir el cabal d'aspiració necessari per el correcte funcionament de la pantalla.

També cal tenir en compte que per el nou model de pantalla, si es manté el cabal d'aspiració igual a l'actual, al tenir la pantalla un millor balanç, permetria impulsar una major quantitat d'aire i per tant incrementar la velocitat d'impressió i la productivitat de la màquina, al disposar d'un major volum d'aire a la impulsió (major velocitat de l'aire a la sortida del llavi).

5.1.5. Antecedents

Les pantalles actuals d'assecatge entre tinters es poden separar en dos grups, segons la disposició constructiva de la part corresponent a l'aspiració de la pantalla.

Un primer grup està format per aquella tipologia de pantalles on la boca d'aspiració connecta directament amb el volum d'aire contingut dintre l'envolupant que determina la carcassa externa de la pantalla, sense passar per una cambra intermèdia, tal i com s'ha representat a la fig. 5.107.a.

El segon grup de pantalles són aquelles on la boca d'aspiració connecta amb una cambra intermèdia abans d'efectuar l'aspiració del volum d'aire contingut dintre de la pantalla, segons es presenta a la fig. 5.107.b. Aquest segon grup, si bé el seu disseny constructiu encareix el preu de compra de la pantalla final, proporciona unes millors prestacions respecte del primer grup, ja que el cabal que cal aspirar per mantenir un correcte funcionament de la pantalla és menor.

Si bé el segon grup és més efectiu, o té un millor rendiment que el primer, cal millorar-lo ja que el balanç de la pantalla encara és massa gran respecte del que seria desitjable (tal i com s'ha dit abans, es planteja arribar a un disseny on el balanç sigui proper al 30%).

5.1.6. Procediment utilitzat en el sistema de redisseny de les pantalles

En primer lloc és necessari recopilar el màxim d'informació possible en relació al comportament de les pantalles d'assecatge actuals, per així poder determinar els seus punts dèbils i d'aquesta manera dedicar i centrar els esforços en millorar aquells punts considerats com a crítics.

Per fer-ho, es procedeix a assajar experimentalment en el banc de proves de l'empresa, el conjunt de pantalles d'assecatge que hi ha disponibles i caracteritzar-les. El que es busca, és determinar de manera experimental la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla, així com el balanç d'aquesta (quantitat d'aire addicional que cal aspirar, en relació a la quantitat d'aire que s'impulsa, per tal d'evitar que s'escapi aire carregat de solvent cap l'exterior de la pantalla). Aquesta recopilació de dades permet per una banda visualitzar aquelles zones de la pantalla que presenten un comportament inadequat, i per altra banda són dades molt valuoses ja que permeten comparar els resultats reals del comportament de la pantalla amb els resultats obtinguts de les simulacions CFD amb OpenFOAM, i així validar la modelització que s'està fent amb el software, i si escau, realitzar les modificacions pertinents.

Quan es disposa del model de simulació ajustat, es fa un estudi paramètric de com interactuen les diverses variables que entren en joc, a l'hora de tenir una distribució de velocitat uniforme al llarg del llavi de la pantalla. Es genera una matriu de resultats en funció dels diversos paràmetres que es poden variar en el disseny de la pantalla (com per exemple el diàmetre d'entrada o les dimensions i inclinacions de

les parets del caixó d'impulsió) i d'aquesta manera, gràficament, es podrà escollir la configuració que proporciona un millor resultat.

Una vegada definits els valors de les variables de disseny que proporcionen un millor comportament en tant que estabilitat en la velocitat de sortida de l'aire en el llavi de la pantalla a partir de l'estudi paramètric que s'ha realitzat, es proposa un nou disseny que es simula posteriorment i si el resultat es considera correcte aleshores es procedeix a fabricar aquest disseny per a poder-lo validar experimentalment.

Una vegada es disposa del prototip, es fa un anàlisi experimental en el banc de proves; en aquest cas, si s'acompleix amb la distribució de velocitat desitjada es continua amb el disseny tot analitzant la part corresponent a l'aspiració de la pantalla; en cas contrari es reformula la geometria corresponent a la impulsió i es torna a validar experimentalment el nou disseny.

No es procedeix a analitzar la part corresponent a l'aspiració de la pantalla, fins que es considera que el disseny de la part de la impulsió és el correcte.

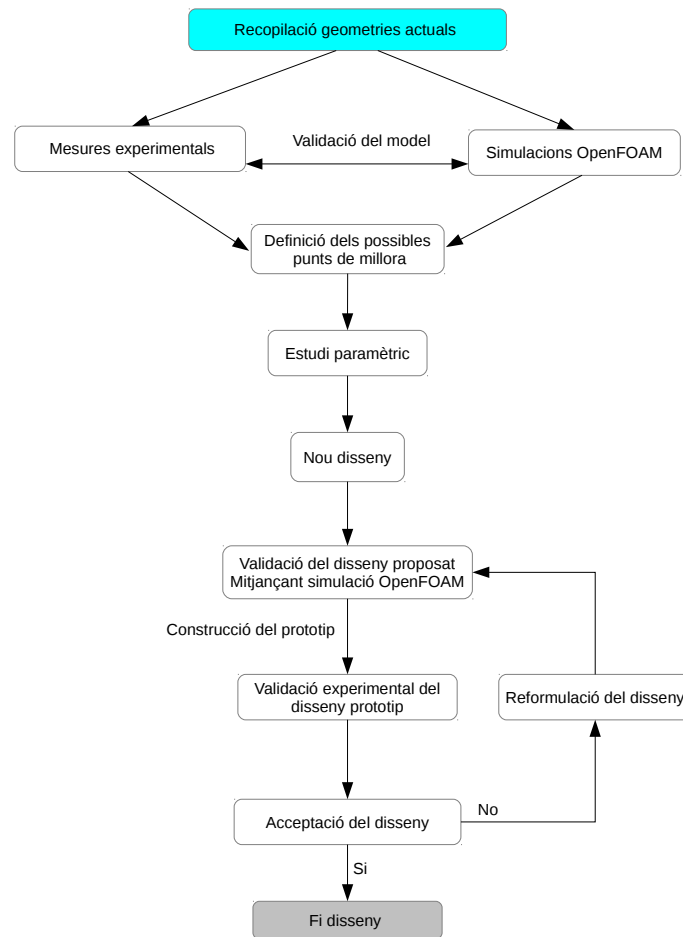


Figura 5.4.: Diagrama de blocs del procés seguit per a la millora del comportament de la pantalla d'assecatge entre tinters

Les diverses etapes que s'han seguit durant el procés d'optimització de les pantalles, i que s'ha explicat en aquest mateix apartat, s'han representat de manera esquemàtica en el diagrama que es mostra a la fig. 5.4.

5.1.7. Recull de models de màquines

A la taula. 5.1 es mostren les característiques tècniques més representatives dels diversos models de màquina als quals ha estat possible prendre mesures experimentals del comportament de les pantalles d'assecatge entre tinters.

Es pot veure com un mateix model de màquina es pot fabricar amb diverses amplades. L'amplada que apareix a la taula. 5.1 està relacionada amb la màxima amplada que és possible imprimir a partir de l'expressió:

$$\text{Amplada imprimible} = \text{Amplada màquina} + l_1 \text{ mm} \quad (5.1)$$

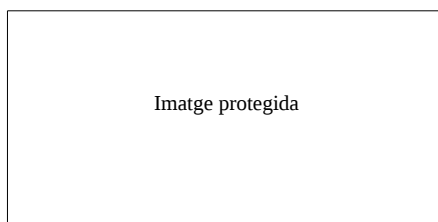
El mateix passa amb l'amplada del material i l'amplada del tambor de la màquina, que depenen de l'amplada de màquina:

$$\begin{aligned} \text{Amplada material} &= \text{Amplada màquina} + l_2 \text{ mm} \\ \text{Amplada tambor} &= \text{Amplada màquina} + l_3 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.2)$$

El format es pot definir com la repetició de la imatge que es vol imprimir (la repetició de la imatge impresa es produirà a una determinada longitud). A mesura que la màquina creixi en dimensions serà possible realitzar treballs amb un major format, és a dir, amb un desenvolupament més llarg.

La velocitat fa referència a la velocitat màxima a la qual pot arribar a imprimir la màquina.

El nombre de colors, fa referència al nombre de tinters de què disposa la màquina, repartits al voltant del tambor central, estipulat en 8 o 10 colors.



Taula 5.1.: Recull de característiques tècniques dels diversos models de màquina estudiats

5.1.8. Plantejament de les simulacions amb OpenFOAM

Amb la voluntat de no allargar de manera innecessària l'extensió d'aquest capítol, ja de per sí extens, tot incorporant una explicació detallada de com s'han preparat les simulacions dels diversos casos a analitzar amb el software OpenFOAM, s'ha decidit generar un annex, (annex. D) on s'ha adjuntat tota aquesta informació referent a la preparació de les simulacions de manera resumida; s'hi ha incorporat tota aquella informació que es considera té un caràcter més rellevant a l'hora de configurar els casos.

En aquest annex es fa un recorregut a través dels diversos diccionaris que defineixen les condicions de contorn del model, la manera com s'han definit les propietats del fluid així com la modelització de la turbulència, els paràmetres de discretització de les equacions diferencials, els paràmetres de control de l'execució de la simulació, i finalment es fa un breu recorregut a través del mallat de la geometria.

5.2. Tipus de pantalles utilitzades per Comexi

5.2.1. Geometries actuals (impulsió)

Com a primer pas, es procedeix a realitzar mesures experimentals de les diverses pantalles de què es disposa físicament, per tal d'evaluar-ne el seu comportament real i així establir aquells punts que cal millorar de manera indispensable. Es centra l'atenció principalment en el comportament que presenta l'aire just a la sortida del llavi de la pantalla, essent aquesta zona on es desitja obtenir unes propietats de velocitat i de temperatura del fluid el més uniforme possibles al llarg de tota la llargada del llavi; quan més uniformes siguin aquestes propietats, més uniforme serà l'assecat a tota la banda de material impresa.

Pel que fa al muntatge experimental necessari per a poder portar a terme la mesura de velocitats en el llavi de la pantalla, a la fig. 5.6 es proporciona una imatge corresponent a aquest dispositiu, en endavant anomenat també banc de proves. Aquest dispositiu consisteix bàsicament en uns ventiladors centrífugs accionats a través d'un variador de freqüència que els permet assolir diferents règims de gir, i per tant proporcionar diferents punts de treball a la pantalla (cabal, pressió). El muntatge també incorpora unes resistències elèctriques situades en sèrie després del ventilador d'impulsió, que permeten simular el comportament de la pantalla en condicions de temperatura. Així doncs, amb aquest dispositiu experimental es poden assolir diverses velocitats (diversos cabals) i temperatures a la sortida del llavi.

Les fletxes de color vermell indiquen la direcció que pren l'aire a la sortida del llavi, així com la distribució de velocitats en tota la llargada de la pantalla.

Les mesures s'han realitzat mitjançant un tub de Pitot que s'ha col·locat just a la sortida de la ranura que fa les funcions de llavi. Aquestes dades s'han agafat en diversos punts que recorren tota la llargada del llavi, i són equidistants entre ells.

Una vegada es disposa de totes les dades, aquestes es representen en una mateixa gràfica on s'hi grafia la velocitat en la direcció perpendicular al llavi en funció de la distància a la qual es troba cada mesura respecte de la boca d'impulsió de la pantalla (la boca d'impulsió és l'orifici a través del qual s'introdueix l'aire a la pantalla d'assecatge).

Degut al fet que a la fig. 5.6, es presenta la pantalla sencera (impulsió + aspiració), es considera necessari aportar una vista de la part dedicada només a la impulsió de la pantalla, segons es mostra a la fig. 5.5.



Figura 5.5.: Punt de mesura experimental de la velocitat en el llavi de la pantalla



Figura 5.6.: Muntatge experimental, i posició dels punts de mesura, per a la caracterització de velocitats en el llavi de la pantalla

Es combina la presa de mesures experimentals amb la simulació de les mateixes geometries mitjançant el software de simulació CFD OpenFOAM®, per tal de validar el modelat que s'ha fet amb les simulacions enfront els experiments. Una vegada comprovat l'ajust del model, es procedeix a estudiar a estudiar nous dissenys de la pantalla.

5.2.1.1. Pantalla tipus màquina “M1”

a) Dimensions més representatives de la pantalla:

La secció de la cambra d'impulsió no és constant en tota la llargada de la pantalla. L'àrea de la cambra d'impulsió es redueix gradualment a mesura que es produeix un allunyament en relació a la boca d'entrada per la qual s'introdueix l'aire d'assecat a la pantalla. Les cotes més representatives es mostren a la fig. 5.7.

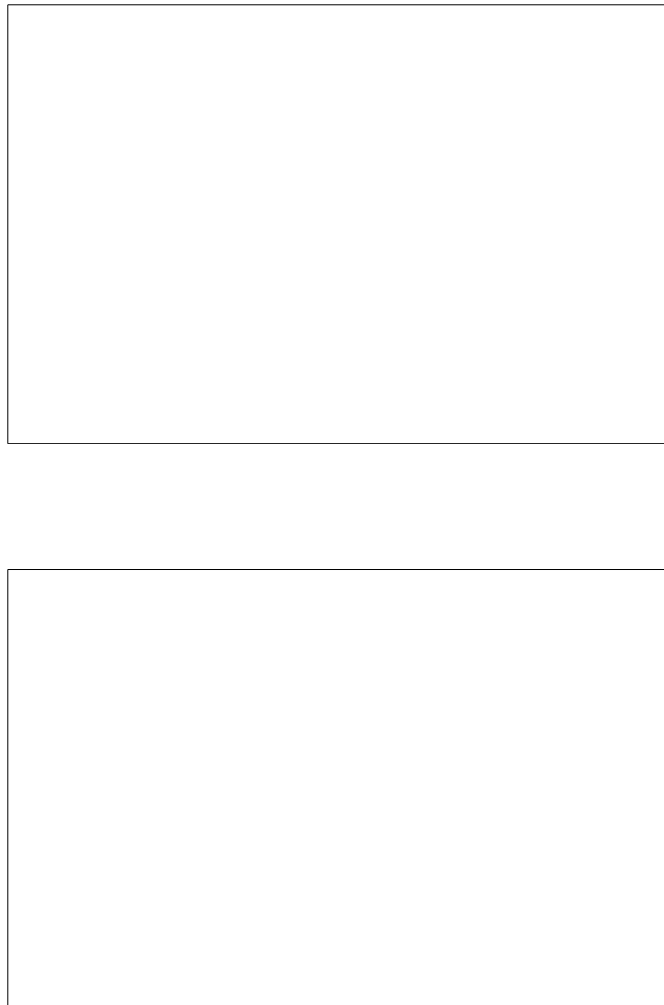


Figura 5.7.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M1”)

b) Mesures experimentals realitzades al banc de proves:

A continuació a la fig. 5.8 i a la fig. 5.9 es presenten les distribucions de velocitat a la sortida del llavi de la pantalla obtingudes a partir dels assaigs experimentals realitzats en el banc de proves. S'aporten dos assaig a dues velocitats mitjanes, una d'elles a $\bar{v} = 33,5m/s$ i l'altra a $\bar{v} = 39,7m/s$.

A les dues gràfiques s'aprecia un comportament molt similar pel que fa a la tendència global que segueix la distribució de velocitats a tot el llarg de la pantalla. A cadascuna de les gràfiques cal destacar dues zones ben diferenciades entre elles:

Hi ha una primera zona (la que està més propera respecte de la boca d'impulsió de la pantalla) que comprèn una longitud d'uns $200mm$ aproximadament, on les velocitats de sortida al llavi assoleixen els valors més baixos d'entre tot el conjunt de dades mesurades, essent el punt amb la velocitat més baixa el que està situat just a la part inicial del llavi. Si es mira la gràfica des d'un punt de vista global, es pot veure com aquesta primera zona té un pendent molt més gran que en la segona zona.

Pel que fa a la segona zona (situada entre els $200mm$ i els $950mm$ aproximadament) també hi ha una diferència apreciable entre els valors màxim i mínim dels dos extrems, però entre ells no hi ha una diferència tan gran com en la primera regió analitzada (tal i com s'ha comentat abans, aquesta zona presenta un pendent menor).

Si es relaciona la secció de la part corresponent al caixó d'impulsió de la pantalla, amb la distribució de velocitats en el llavi, es pot veure com les velocitats més elevades es presenten en aquelles regions on l'àrea de la cambra d'impulsió és menor.

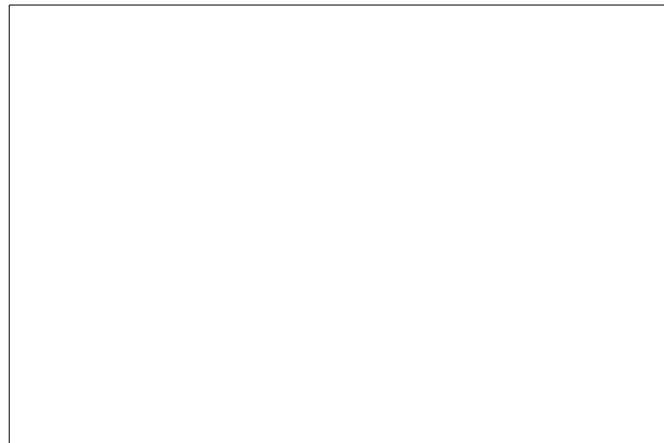


Figura 5.8.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M1”, amplada $850mm$, $\bar{v} = 33,5m/s$

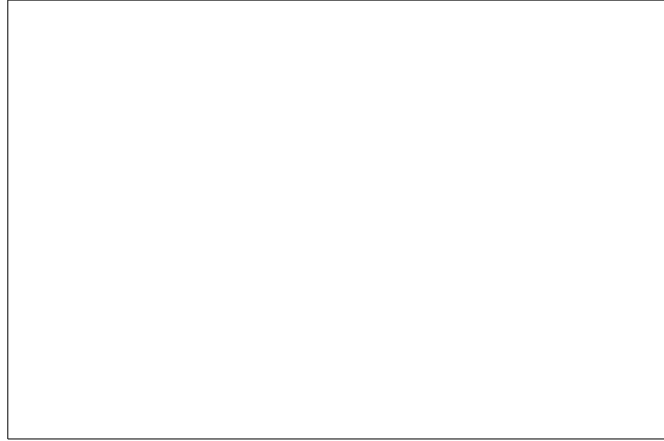


Figura 5.9.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M1”, amplada $850mm$, $\bar{v} = 39,7m/s$

5.2.1.2. Pantalla tipus màquina “M2”

a) Dimensions més representatives de la pantalla:

Aquest disseny de pantalla té una secció constant de la cambra d'impulsió en tota la llargada de la pantalla. El diàmetre d'entrada és major que en el cas de la “M1”, ja que aquesta pantalla ha de permetre treballar amb cabals més elevats, a l'estar prevista per amplades de màquina més grans.

En aquest disseny es fa un espejament de les parts més importants de la pantalla (fig. 5.10): la cambra d'impulsió, els deflectors (la finalitat dels quals és guiar en la direcció perpendicular al substrat, l'aire que surt a través del llavi de la pantalla), i finalment el llavi de la pantalla que té mecanitzat una ranura a través de la qual surt l'aire del conjunt. Tots els models que s'han assajat (des del model “M1” fins al model de la “M7”) tenen incorporats en el disseny aquests deflectors, malgrat no s'ha fet la representació tridimensional de les diverses peces que conformen una pantalla per els diversos models de pantalla analitzats. Les cotes més representatives es mostren a la fig. 5.11.

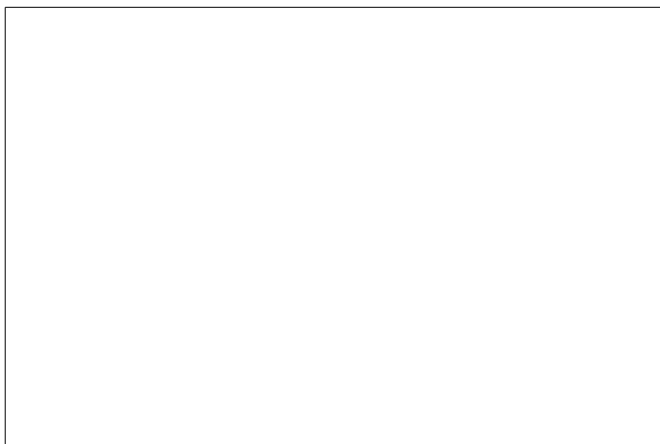


Figura 5.10.: Espejament de la part corresponent a la zona d'impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M2”)

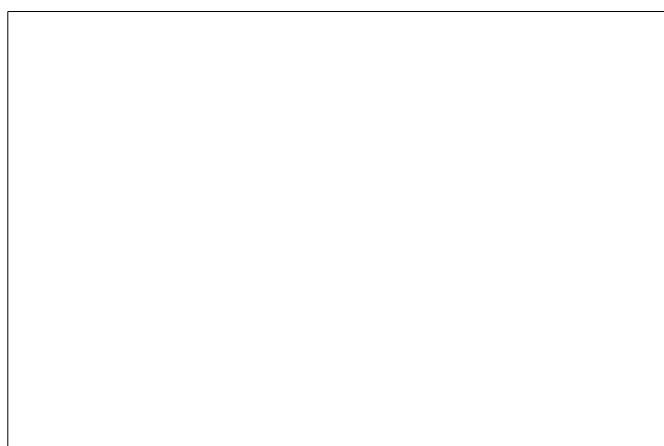
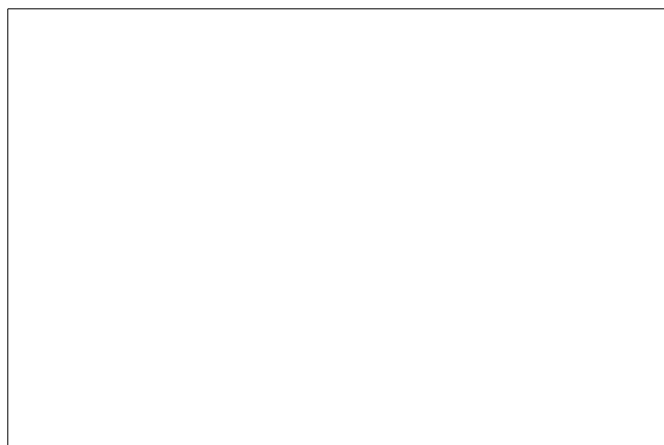


Figura 5.11.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M2")

5.2.1.3. Pantalla tipus màquina “M3”

a) Dimensions més representatives de la pantalla:

La pantalla d'aquest model de màquina és iguala a la de la “M2”. El seu especejament es mostra a la fig. 5.12, i les seves dimensions més representatives a la fig. 5.13 (les dimensions són les mateixes que les que apareixen a la fig. 5.11).

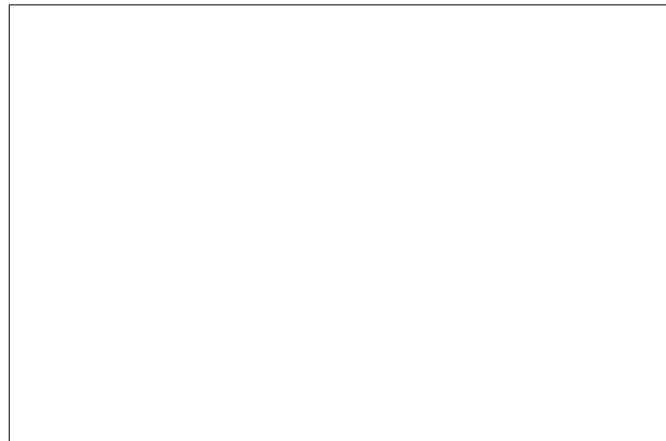


Figura 5.12.: Especejament de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M3”)

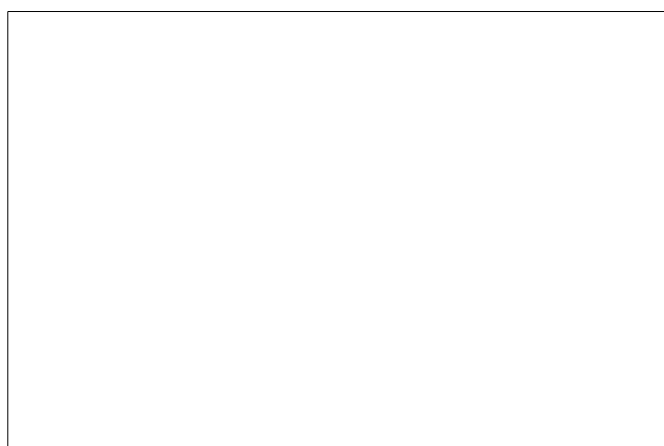
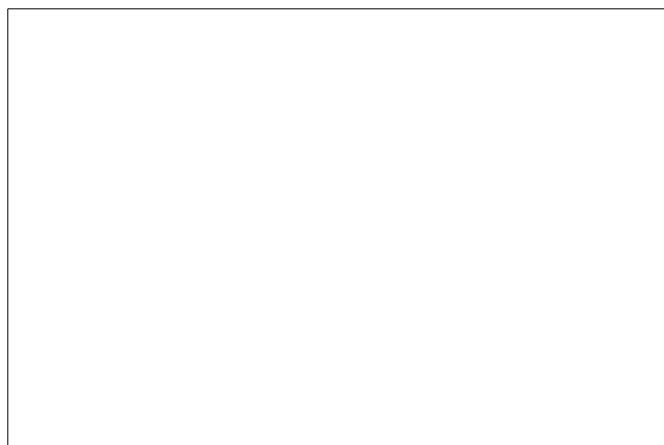


Figura 5.13.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsó d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M3")

b) Mesures experimentals realitzades al banc de proves:

Tot seguit es presenten les dades mesurades al llavi de la pantalla “M3”, per diverses velocitats mitjanes de $\bar{v} = 43,8m/s$ a la fig. 5.14, $\bar{v} = 50,3m/s$ a la fig. 5.15, i $\bar{v} = 58,5m/s$ a la fig. 5.16.

El comportament d’aquestes pantalles és molt similar al que s’ha obtingut amb la màquina “M1”, però amb alguns matisos que cal mencionar:

Malgrat la distribució de velocitats continua presentant dues zones ben diferenciades tal i com passava amb la “M1”, ara en les “M3” el pendent de la segona regió (compresa entre els $300mm$ i $1330mm$ aproximadament) és pràcticament igual a zero.

Tot i que aquesta tipologia de pantalla presenta un millor comportament que en el cas de les “M1”, en la primera regió que comprèn els primers $300mm$ del llavi continua havent-hi una zona amb una velocitat de sortida que cal millorar.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Una altra diferència a tenir en compte, és que la distància vertical entre el centre de la boca d’impulsió i el llavi de la pantalla és mínim en el cas de la “M3”, a diferència de la “M1” on el centre quedava distanciat de manera notable.

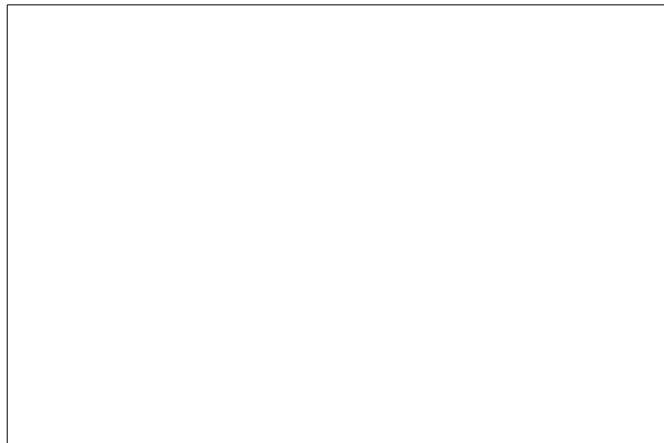


Figura 5.14.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M3”, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 43,8m/s$

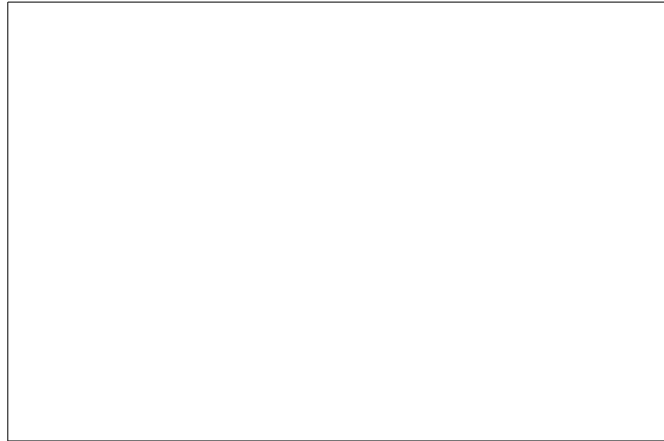


Figura 5.15.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M3”, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 50,3m/s$

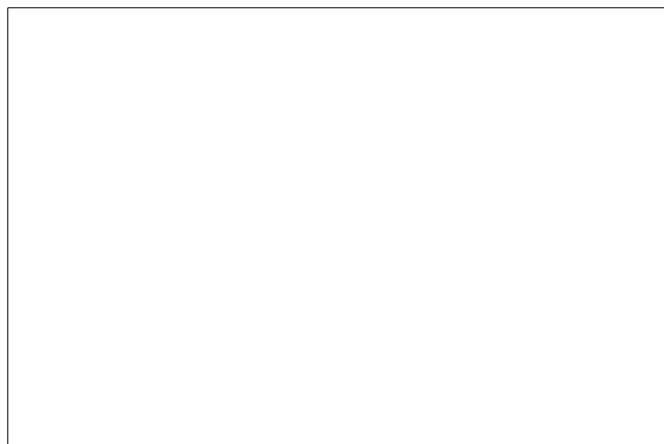


Figura 5.16.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M3”, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 58,5m/s$

5.2.1.4. Pantalla tipus màquina “M4” (1 sol llavi)

a) Dimensions més representatives de la pantalla:

Per aquest model, la secció de la cambra d'impulsió també es redueix progressivament a mesura que hi ha un allunyament respecte de la boca d'impulsió, de manera semblant al que passava amb el disseny de la pantalla de la “M1”.

Pel cas de la pantalla de la “M4” es manté un diàmetre d'entrada a la pantalla superior al del model “M1”, i de dimensions similars a la “M2” i “M3”, ja que les amplades de treball són també majors que per a la “M1”, i per tant ha de poder impulsar un major cabal d'aire. A la fig. 5.17 es presenta l'especejament per a la pantalla, i les seves dimensions generals es visualitzen a la fig. 5.18.

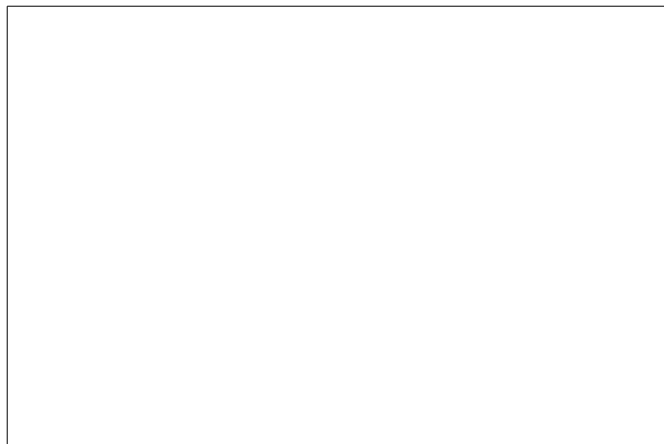


Figura 5.17.: Especejament de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M4”)

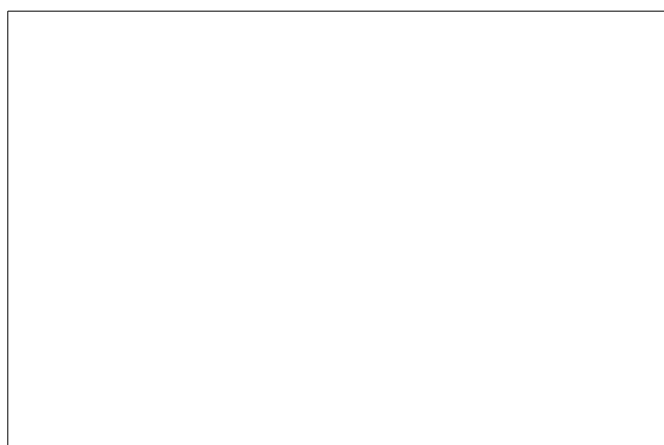
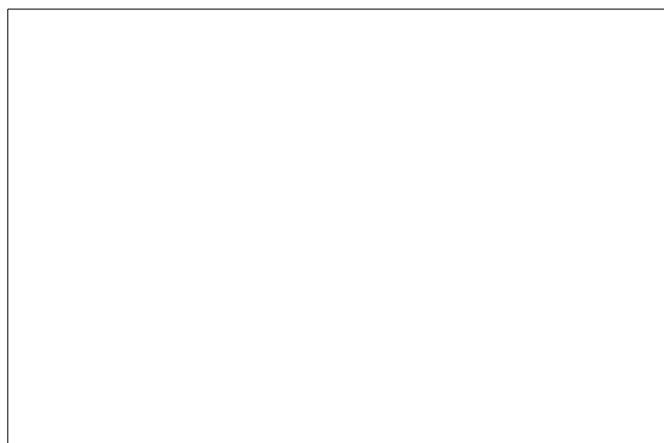


Figura 5.18.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M4")

b) Mesures experimentals realitzades al banc de proves:

A la fig. 5.19 i a la fig. 5.20 es grafia el comportament de la pantalla per dues velocitats mitjanes en el llavi, en concret de $\bar{v} = 40,7m/s$ i $\bar{v} = 51m/s$ respectivament. En aquest cas, la tendència en el comportament en la distribució de velocitats és molt diferent del que s'ha vist a la "M1" i a la "M3". La pantalla de les "M4" no presenta les dues zones amb dos pendents diferents, sinó que la tendència general és d'una distribució que segueix un creixement lineal amb un pendent positiu proporcional a la distància de separació entre el punt de mesura i la boca d'impulsió.

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"

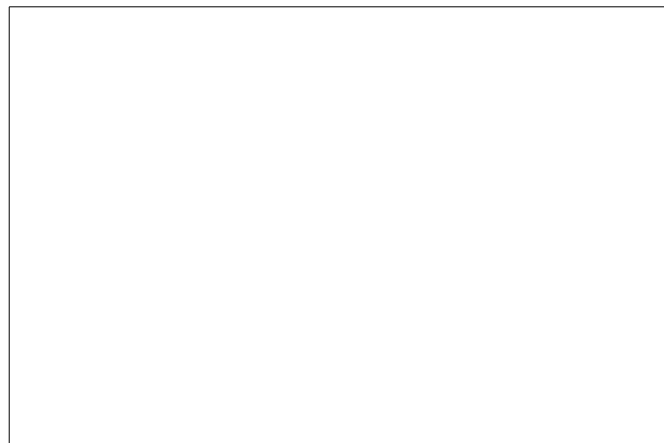


Figura 5.19.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, "M4", amplada $1250mm$, $\bar{v} = 40,7m/s$

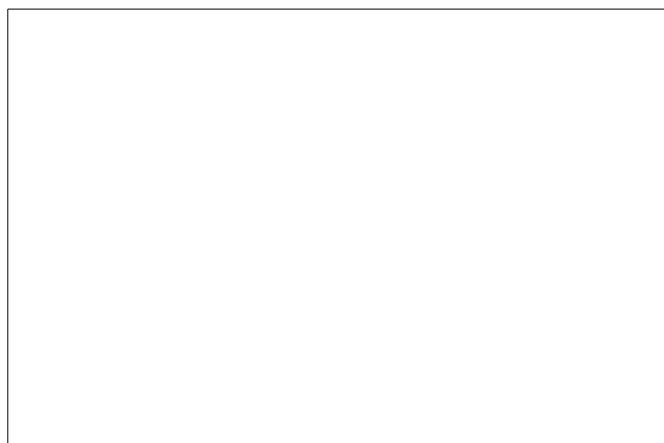


Figura 5.20.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M4”, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 51m/s$

c) Resultats obtinguts mitjançant simulació CFD:

En aquest apartat es realitza una simulació mitjançant OpenFOAM per tal de comparar els resultats experimentals amb els resultats teòrics obtinguts via simulació amb CFD. Tal i com s’ha dit a la fig. 5.4, aquesta comparativa de resultats permet ajustar la modelització que es fa de la pantalla i així aquest model pot ésser utilitzat posteriorment per a l’estudi paramètric de les pantalles així com per a la generació d’un nou disseny.

Els resultats de la pantalla “M4” d’amplada $1250mm$ i una velocitat mitjana al llavi de $\bar{v} = 40m/s$, es presenten a la fig. 5.21 (vista general a un tall longitudinal de la pantalla), i en més detall de la primera meitat de la pantalla a la fig. 5.22, i finalment un detall de la segona meitat de la pantalla a la fig. 5.23.

Si es comparen les imatges de la fig. 5.22 i la fig. 5.23, cal destacar el diferent degradat de colors just després dels deflectors que presenta la primera meitat de la pantalla enfront de la segona. Si es centra l’atenció en la distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius en la primera meitat de la pantalla, es pot veure com el fluid té una tendència a distribuir-se de manera no uniforme, tot obtenint velocitats més elevades en la paret del deflector situat aigües envall respecte de la boca d’entrada. A mesura que es va avançant cap a la segona meitat de la pantalla, aquesta gradació de colors tendeix a ser més uniforme, i la velocitat entre dos deflectors consecutius presenta una menor variació.

La diferent distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius es representa a la fig. 5.25 per a una velocitat mitjana al llavi de $\bar{v} = 40m/s$, i a la fig. 5.26 per una velocitat mitjana de $\bar{v} = 50m/s$. S’ha dividit la pantalla en diversos trams (quatre trams en total) i en cadascun d’ells es representa la distribució de velocitats entre dos deflectors situats consecutivament. El tram 1 es correspon amb el tram més

proper respecte de la boca d'impulsió, i el tram 4 és el més allunyat. Tal com s'ha mencionat més amunt, a més distància respecte de l'entrada del fluid a la pantalla, més estable és la distribució de velocitat entre dos deflectors.

A la fig. 5.24 s'ha representat la velocitat a la sortida del llavi al llarg de tota la pantalla per a una velocitat mitjana de $\bar{v} = 40m/s$ i per a una velocitat mitjana de $\bar{v} = 50m/s$, extret amb OpenFOAM. Si es comparen els resultats de la fig. 5.19, la fig. 5.20 i la fig. 5.24, es pot veure com la velocitat en la simulació segueix la mateixa tendència que en el cas experimental, és a dir, un increment en la velocitat de sortida del llavi a mesura que hi ha un distanciament respecte de la boca d'impulsió de la pantalla. En concret a la fig. 5.24 s'aprecia una oscil·lació com una dent de serra al llarg de tot el llavi de la pantalla, que va disminuint progressivament a la zona final de la pantalla; aquesta distribució amb oscil·lacions és el comportament que es pot veure en més detall a la fig. 5.25 i a la fig. 5.26.

De la mateixa manera que s'ha observat experimentalment, el fet d'augmentar la velocitat de sortida del l'aire a través del llavi, no ha provocat una diferència en la tendència de velocitats; és a dir, la gràfica de $\bar{v} = 50m/s$ és similar a la de $\bar{v} = 40m/s$ però desplaçada verticalment. La diferència que es detecta, és que en el cas d'augmentar la velocitat, porta associat un augment de l'amplitud de la oscil·lació de velocitats entre dos deflectors (les dents de serra mostren una major amplitud).

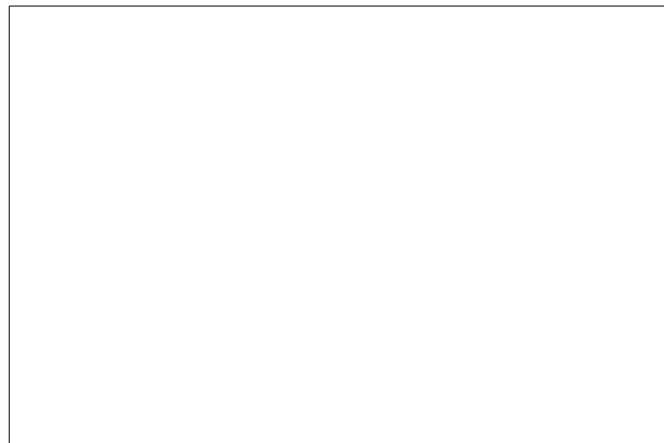


Figura 5.21.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M4”, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

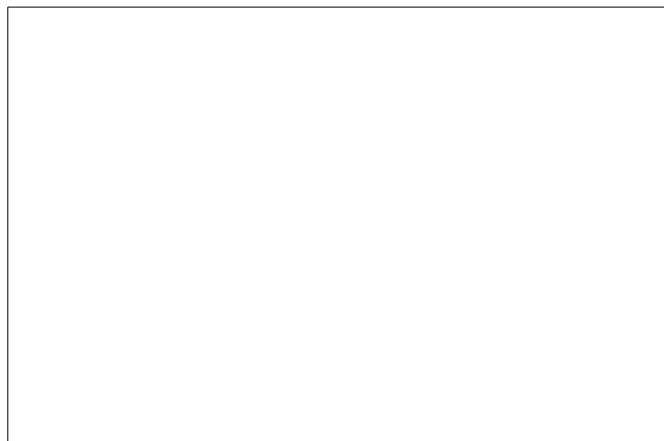


Figura 5.22.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M4” (primera meitat), amplada $1250mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

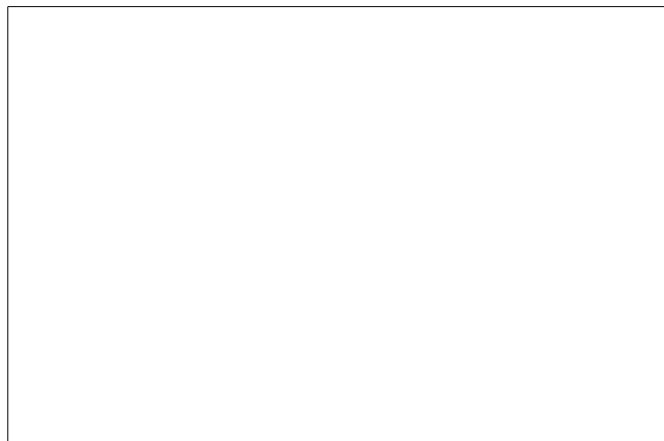


Figura 5.23.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M4” (segona meitat), amplada $1250mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

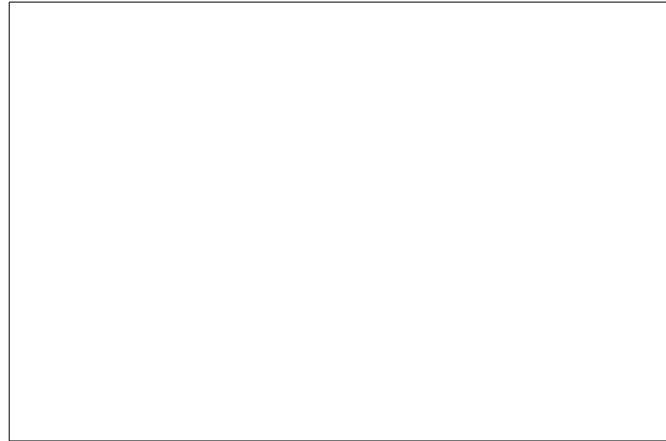


Figura 5.24.: Distribució de velocitats al llarg del llavi de la pantalla “M4”, amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ i $\bar{v} = 50m/s$ (simulació OpenFOAM)

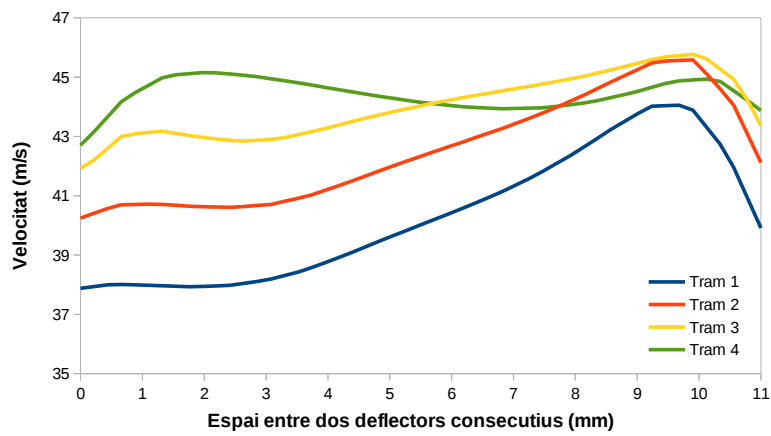


Figura 5.25.: Distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius, representat a diversos trams de la pantalla “M4”, amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

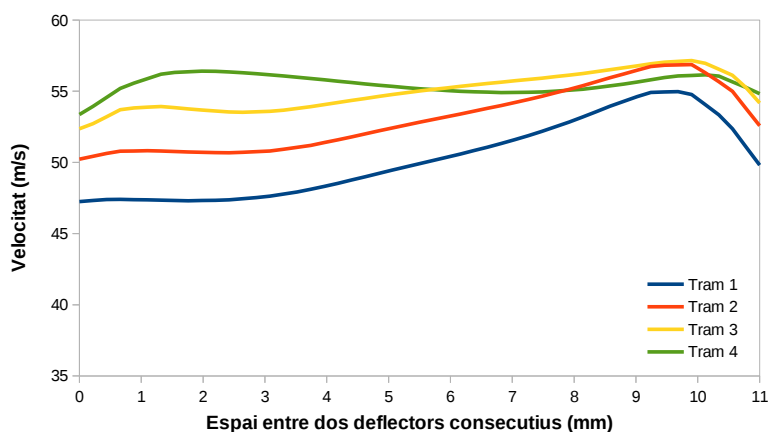


Figura 5.26.: Distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius, representat a diversos trams de la pantalla “M4”, amplada 1250mm , $\bar{v} = 50\text{m/s}$ (simulació OpenFOAM)

A la fig. 5.27 es represent el contorn de pressió a un tall central longitudinal de la pantalla. Al igual que succeïa amb la distribució de velocitats, a la part final de la pantalla (la part situada més cap a la dreta) és on hi ha una pressió més elevada, i per tant és la zona de la pantalla on s’obtenen velocitats més elevades. A la fig. 5.28 es representa la distribució de la pressió estàtica en el centre del conducte d’impulsió en tota la llargada de la pantalla.

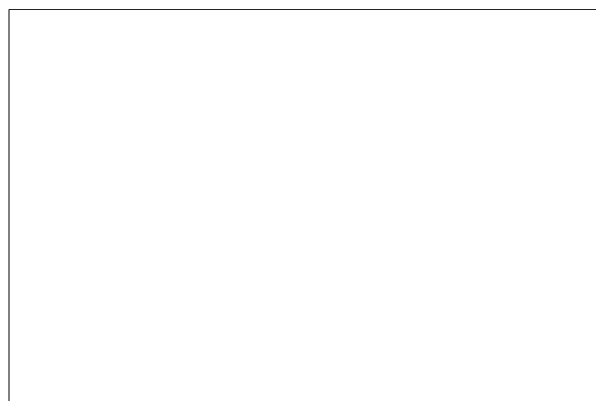


Figura 5.27.: Contorn de pressions a un tall central longitudinal de la pantalla “M4”, amplada 1250mm , unitats en m^2/s^2 (simulació OpenFOAM)

Segons es veu a la fig. 5.27 el software de simulació, en el diccionari p li associa unes unitats de m^2/s^2 corresponents a l'energia específica del fluid, eq. 5.3

$$\frac{J}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = N \cdot m \cdot \frac{m}{N \cdot s^2} = \frac{m^2}{s^2} \quad (5.3)$$

si es multiplica l'energia específica, per la densitat del fluid, aleshores s'obté la pressió en Pascals.

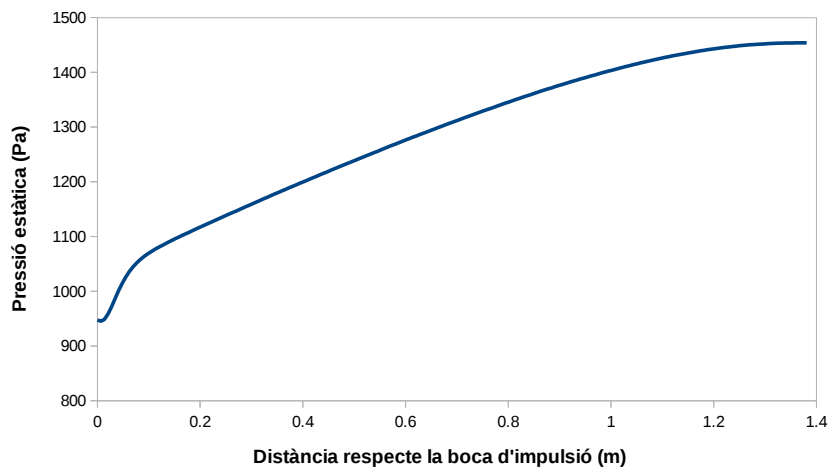


Figura 5.28.: Pressió estàtica al centre del conducte d'impulsió de la pantalla "M4", amplada 1250mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

5.2.1.5. Pantalla tipus màquina “M4” (2 llavis)

Aquest disseny es tracta d'una proposta de geometria que es va fer en el passat, i que va quedar descartada a la vista de la distribució de velocitats obtinguda experimentalment al llavi segons es mostra a la fig. 5.31. L'objectiu d'aquesta pantalla era donar resposta a aquells treballs més exigents des d'un punt de vista de l'assecatge com seria per exemple el fet de treballar amb tintes en base aigua en comptes de tintes en base solvent, o bé en aquells treballs on es requereix assecar una gran quantitat de solvent (com per exemple quan s'imprimeix un fons amb una aportació de tinta molt alta sobre del substrat). A la fig. 5.29 es presenta un especejament de la pantalla.

a) Dimensions més representatives de la pantalla:

Si es comparen les dimensions de la pantalla d'impulsió de la pantalla “M4” de dos llavis enfront de la de un sol llavi, es pot veure com s'ha passat de un sol llavi amb una obertura de “ $a \text{ mm}$ ” a dos llavis amb una obertura de “ $1,67 \cdot a \text{ mm}$ ” cadascun. Malgrat el cabal que es pretén fer circular per aquesta pantalla és més del doble que el que circula per una “M4” de un sol llavi, la dimensió de la boca d'entrada de la pantalla s'ha mantingut igual a l'anterior, a “ $\varnothing_1 \text{ mm}$ ”. Les dimensions més importants d'aquest model de pantalla es resumeixen a la fig. 5.29 i a la fig. 5.30.

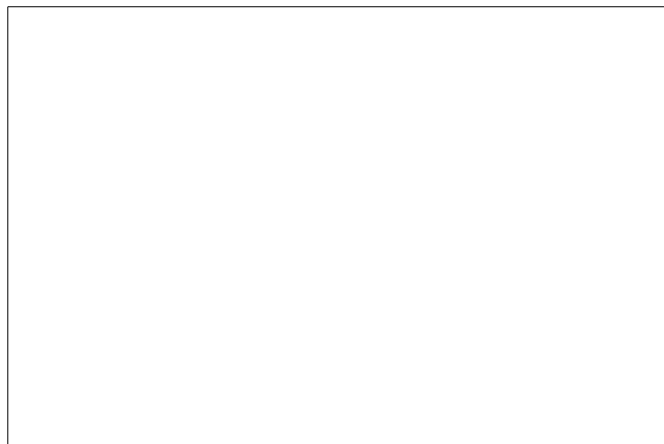


Figura 5.29.: Especejament de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M4” - 2 llavis)



Figura 5.30.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M4" - 2 llavis)

b) Mesures experimentals realitzades al banc de proves:

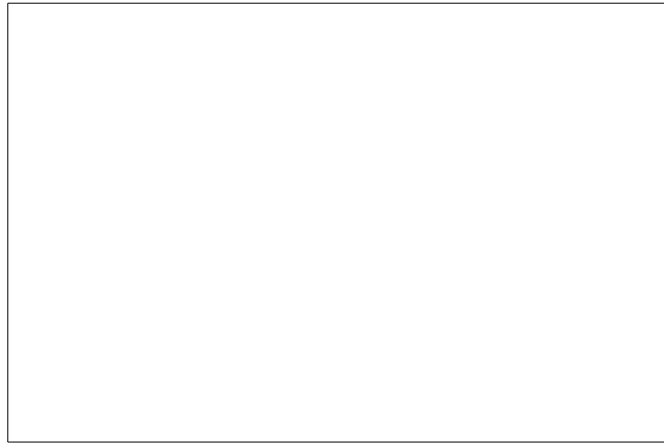


Figura 5.31.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M4” 2 llavis, amplada $1250mm$

c) Resultats obtinguts mitjançant simulació CFD:

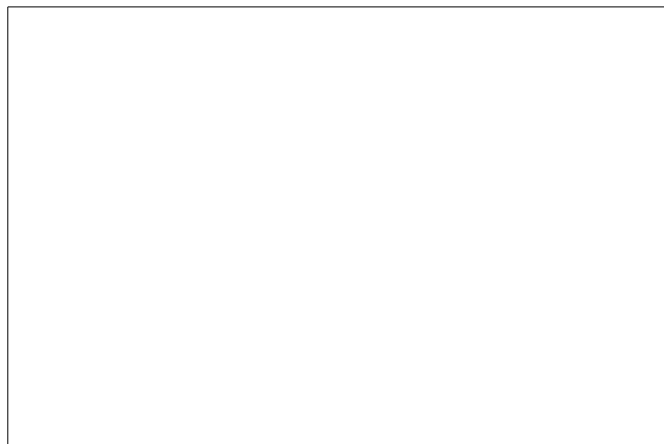


Figura 5.32.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M4” 2 llavis, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 15m/s$ (simulació OpenFOAM)

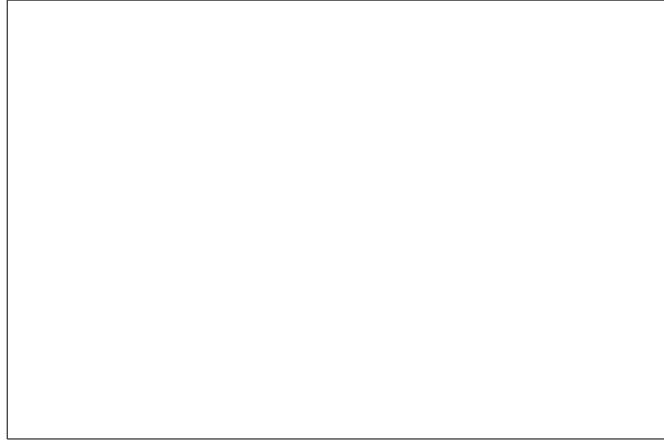


Figura 5.33.: Distribució de velocitats al llarg del llavi de la pantalla “M4” 2 llavis, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 15m/s$ (simulació OpenFOAM)

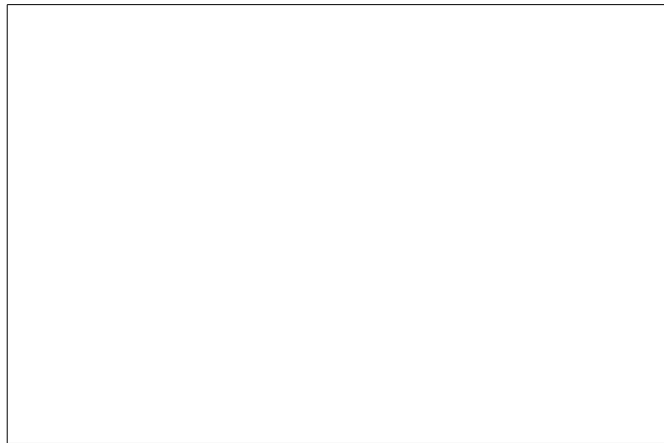


Figura 5.34.: Contorn de pressions a un tall central longitudinal de la pantalla “M4” 2 llavis, amplada $1250mm$, unitats en m^2/s^2 (simulació OpenFOAM)

En aquest cas, a la fig. 5.31, s'aprecia que hi ha una zona de la pantalla on enlloc d'expulsar aire a través del llavi, el que succeeix és justament el contrari, ja que s'aspira aire de l'exterior cap a dintre de la pantalla a través del propi llavi.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Si es comparen els resultats experimentals de la fig. 5.31 amb els resultats de la fig. 5.33, es pot veure com el software detecta clarament una zona del llavi que funciona de manera totalment anòmla tal i com s'ha observat en les mesures fetes en el banc de proves. Aquesta zona, que en ambdós casos comprèn els primers $200mm$ de longitud del llavi, s'observa com la pantalla no expulsa aira a través del llavi sinó que, degut a la quantitat de cabal tan alt que es vol impulsar, en aquesta zona es produeix una depressió suficient com per aspirar aire de l'exterior de la pantalla i introduir-lo cap a la cambra d'impulsió.

Si s'analitzen ambdues figures des d'un punt de vista més global, al igual que passava amb les pantalles tipus “M1” i tipus “M3”, es poden diferenciar dues zones amb pendents molt diferenciats; la primera d'ella en els primers $200mm$ del llavi amb un pendent més gran, i la segona des dels $200mm$ fins a la longitud final amb un pendent menys pronunciat. Tot i això l'aproximació de la simulació és molt propera a les mesures experimentals al llarg de tot el llavi, presentant la mateixa tendència global de velocitats.

En la simulació, no s'observa la oscil·lació provocada per els deflectors perquè, tal i com s'explica en el proper paràgraf, els deflectors no s'han tingut en compte en aquesta simulació per abaixar el temps de càlcul.

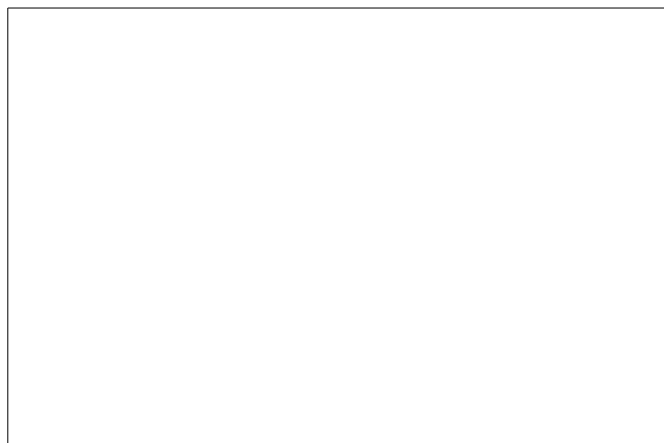


Figura 5.35.: Pressió estàtica al centre del conducte d'impulsió de la pantalla “M4” 2 llavis, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 15m/s$ (simulació OpenFOAM)

En la simulació que s'ha fet d'aquesta pantalla, al tenir dos llavis de sortida enlloc de un de sol, ha comportat haver d'augmentar de manera considerable el mallat de la simulació, ja que en les ranures de sortida d'aire del llavi cal fer un mallat més intensiu.

Per tal d'optimitzar el temps de càlcul, i en vista dels resultats experimentals que s'han mesurat abans de portar a terme les simulacions, s'ha optat per no incorporar els deflectors a la simulació i així el mallat s'ha pogut reduir de manera notable i tanmateix s'ha pogut fer córrer el cas amb menor temps de càlcul. En aquesta pantalla, ha estat important comprovar que el software de simulació també detectava aquest canvi en la direcció de l'aire a través del llavi (entrar aire a través del llavi enlloc d'expulsar aire a través del llavi).

5.2.1.6. Pantalla tipus màquina “M5”

Tot seguit es mostren les pantalles que s'utilitzen al model de màquina “M5”, el seu especejament a la fig. 5.36, i les seves dimensions generals a la fig. 5.37. Cal notar que la pantalla és la mateixa que per les “M2” i “M3”, tal i com s'ha comentat anteriorment.

a) Dimensions més representatives de la pantalla:

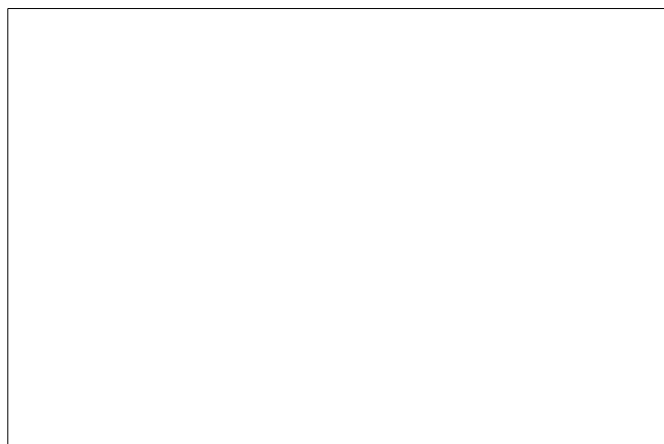


Figura 5.36.: Especejament de la part corresponent a la zona impulsó d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M5”)



Figura 5.37.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M5”)

5.2.1.7. Pantalla tipus màquina “M6”

Finalment s'estudien les pantalles corresponents al model de màquina “M6”, que són les que presenten la particularitat de ser les que tenen dimensions més grans respecte de totes les estudiades fins ara. La seva disposició constructiva, és igual que a la sèrie tipus “M2”, “M3” i “M5”. El seu especejament es mostra a la fig. 5.38 i les seves dimensions generals a la fig. 5.39.

a) Dimensions més representatives de la pantalla:

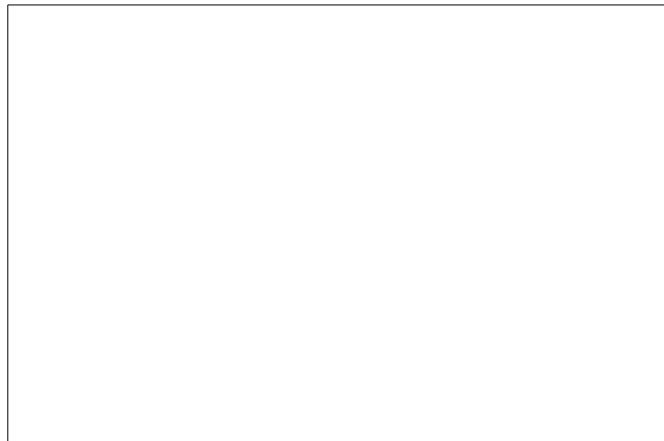


Figura 5.38.: Especejament de la part corresponent a la zona impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M6”)



Figura 5.39.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d'impulsió d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M6”)

b) Mesures experimentals realitzades al banc de proves:

Segons les mesures fetes en el llavi de la pantalla i representades a la fig. 5.40 i a la fig. 5.41 per una velocitat mitjana de $\bar{v} = 41,7m/s$ i $\bar{v} = 51,9m/s$ respectivament, s'aprecia com aquesta pantalla presenta una distribució molt planera, és a dir, que en tota la longitud de la pantalla la velocitat a la sortida del llavi es manté molt estable. Només hi ha un punt que presenta un comportament per sota de la mitjana i que es correspon al punt mesurat que està més proper a la boca d'impulsió de la pantalla; tot i això la diferència de velocitats entre aquest punt i la resta es pot considerar acceptable, al tractar-se d'una anomalia molt localitzada.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Dit això, aquest disseny presenta com a dificultat més destacable que la seva envoltant exterior ocupa un espai que no està disponible per a la majoria de màquines, ja que l'espai entre tinters és limitat.

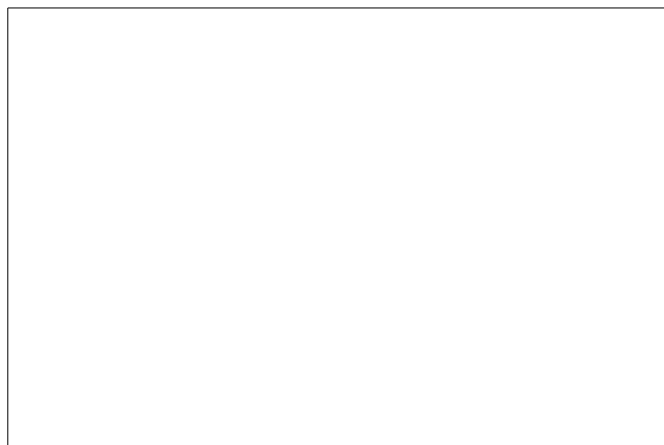


Figura 5.40.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M6”, amplada 1200mm, $\bar{v} = 41,7m/s$

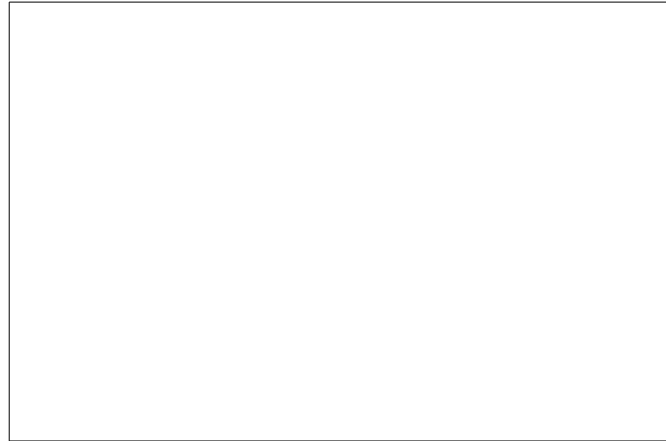


Figura 5.41.: Distribució de velocitats experimental al llarg del llavi de la pantalla, “M6”, amplada $1200mm$, $\bar{v} = 51,9m/s$

c) Resultats obtinguts mitjançant simulació CFD:

Pel que fa a la anàlisi amb el software OpenFOAM, i que es presenta de manera general a la fig. 5.42, i en detall a la primera meitat de la pantalla a la fig. 5.43 i en detall a la segona meitat de la pantalla a la fig. 5.44, es pot constatar que hi ha una concordança entre els valors mesurats i els simulats ja que al llarg de tota la pantalla la distribució de velocitats presenta el mateix patró de colors i per tant una distribució de velocitats molt uniforme.

La distribució de velocitats al llavi es mostra a la fig. 5.45; sobre aquest figura cal remarcar la uniformitat en la distribució de velocitats a tota la llargada de la pantalla, així com també una uniformitat en la oscil·lació de velocitat (dents de serra) que es produeix entre dos deflectors consecutius tal i com s’ha representat per diversos trams a la fig. 5.46. El comportament entre dos deflectors consecutius per a la pantalla “M6” és molt diferent del que s’ha exposat a la fig. 5.25 i a la fig. 5.26 per a la pantalla “M4”; aquest millor comportament es deu a les majors dimensions del caixó d’impulsió.

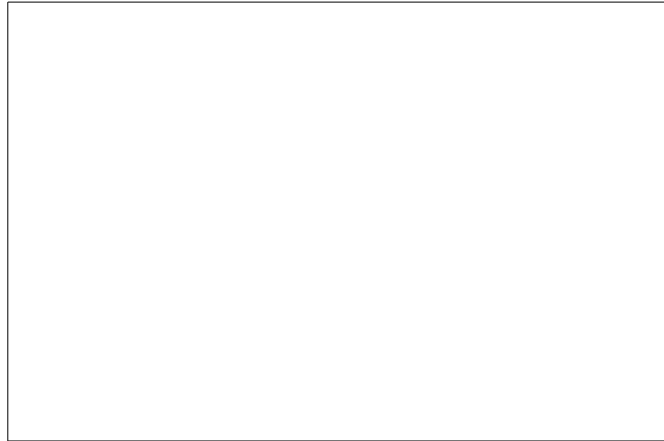


Figura 5.42.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M6”, amplada $1200mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

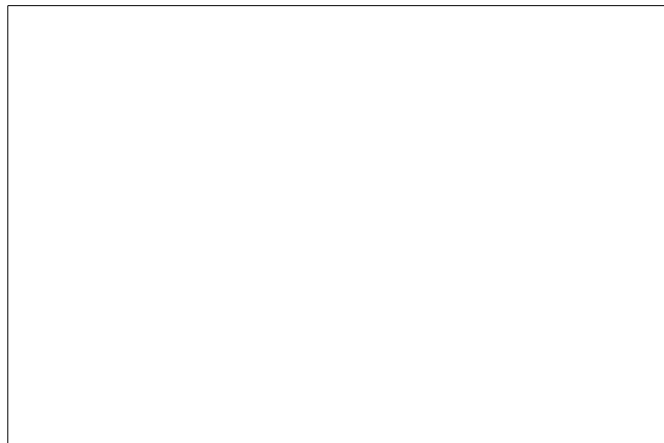


Figura 5.43.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M6” (primera meitat), amplada $1200mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

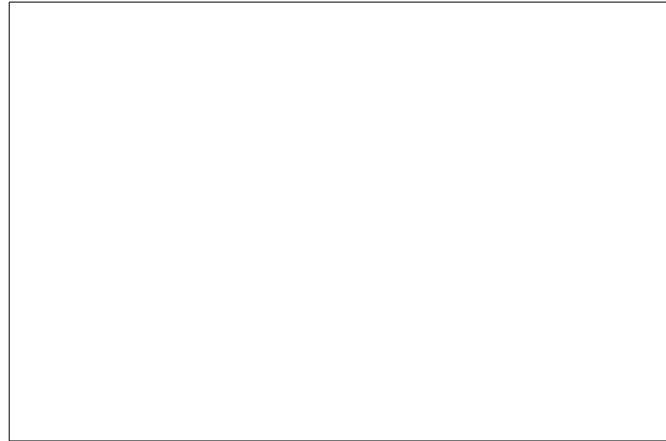


Figura 5.44.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla “M6” (segona meitat), amplada $1200mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

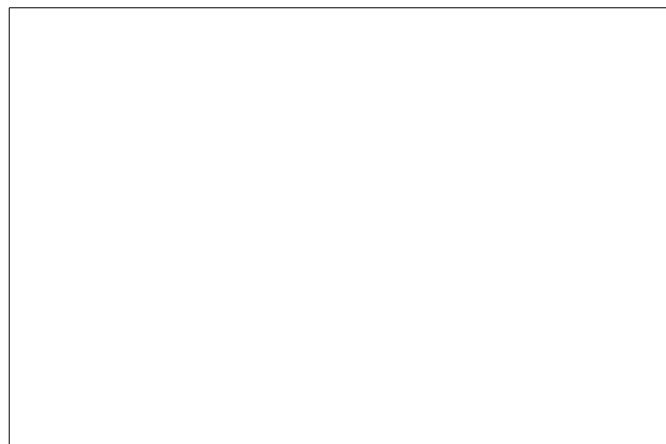


Figura 5.45.: Distribució de velocitats al llarg del llavi de la pantalla “M6”, amplada $1200mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

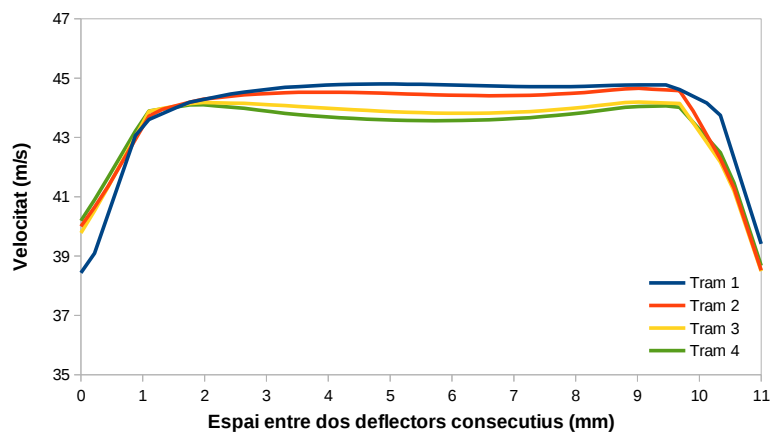


Figura 5.46.: Distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius, representat a diversos trams de la pantalla “M6”, amplada 1200mm , $\bar{v} = 40\text{m/s}$ (simulació OpenFOAM)

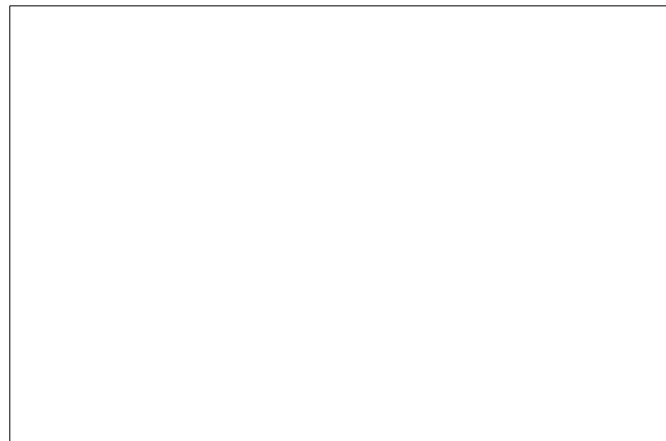


Figura 5.47.: Contorn de pressions a un tall central longitudinal de la pantalla “M6”, amplada 1200mm , unitats en m^2/s^2 (simulació OpenFOAM)

A la fig. 5.47 i a la fig. 5.48 es representa la distribució de pressió en el caixó d'impulsió; aquesta es manté molt uniforme des del principi al final de la pantalla, cosa que es tradueix en una uniformitat a la velocitat al llavi.

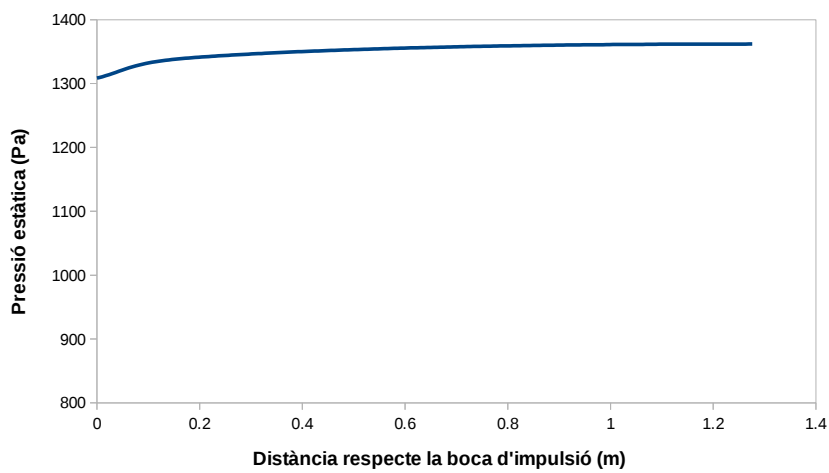
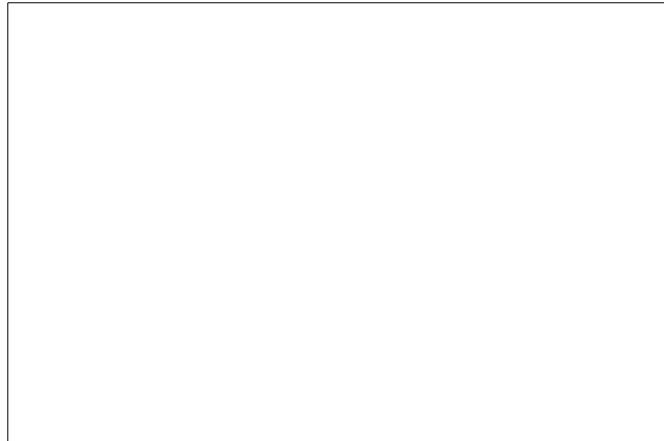


Figura 5.48.: Pressió estàtica al centre del conducte d'impulsió de la pantalla "M6", amplada 1200mm, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

5.2.2. Recull de resultats i conclusions



Taula 5.2.: Quadre resum de les velocitats mesurades experimentalment al llavi per diversos tipus de pantalles d'assecatge

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

5.3. Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)

5.3.1. Pantalles tipus “M6”

En l'apartat anterior s'ha fet una anàlisi corresponent només a la part d'impulsió de les pantalles d'assecatge entre tinters, a partir d'un conjunt de mesures experimentals portades a terme en el banc de proves i la posterior contrastació d'aquests resultats amb la informació proporcionada per el programari de simulació fluidodinàmica.

De totes les geometries que s'han analitzat, la que presenta un millor comportament és la corresponent al disseny que es munta a les màquines de la sèrie “M6”; aquesta gamma de màquines, té la particularitat que permet incorporar uns dissenys de pantalla d'assecatge de dimensions més generoses que la resta de màquines. Aquestes major disponibilitat d'espai per a encabir la pantalla d'assecatge dintre del bloc format per el cos impressor, així com el fet de que aquesta sèrie estigui pensada per a poder treballar amb amplades que poden arribar fins a un màxim de “ $c\text{ mm}$ ” (a major amplada de material que es pot imprimir, també és major la quantitat d'aire que ha de aportar la pantalla per assegurar un correcte assecatge de la banda impresa), proporcionen la necessitat de que els conductes d'impulsió i aspiració que es connecten a les pantalles siguin de dimensions també més grans que a la resta de productes de la gamma d'impressores flexogràfiques. Com que el diàmetre de la boca d'impulsió de la pantalla és de “ $\varnothing_2\text{ mm}$ ”, les dimensions del conducte d'impulsió són del mateix ordre de magnitud arribant fins als “ $W_2\text{ mm}$ ” x “ $H_2\text{ mm}$ ”, comportant una secció més gran del conducte d'impulsió.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

A partir dels resultats obtinguts amb aquest model de pantalla, es considera necessari fer un estudi variant els diversos paràmetres que entren en joc a l'hora de definir la geometria d'una pantalla, que són, a grans trets, el diàmetre d'entrada i la seva distància en vertical respecte del llavi, i finalment l'alçada i l'amplada del conducte d'impulsió.

5.3.1.1. Variació de les dimensions del diàmetre d'entrada del conducte d'impulsió, tot mantenint les dimensions del conducte d'impulsió constants

Per portar a terme aquest estudi, es mantenen les dimensions del conducte d'impulsió segons les mides originals de la pantalla que es poden visualitzar a la fig. 5.39, és a dir “ $W_2\text{ mm}$ ” d'amplada per “ $H_2\text{ mm}$ ” d'alçada, i només es varia progressivament el

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)

diàmetre d'entrada a través del qual s'introdueix l'aire dintre del conducte d'impulsió de la pantalla tot partint d'un diàmetre mínim de " $\varnothing_1 mm$ " fins a un diàmetre màxim igual a l'actual, que és de " $\varnothing_2 mm$ ". Per visualitzar l'efecte que produeix la variació del diàmetre d'entrada en la distribució de velocitats al llavi, s'ha mantingut en totes les simulacions la posició (o distància en vertical) del centre del diàmetre d'entrada respecte del llavi d'alumini.

Amb l'objectiu de reduir el màxim possible el temps de càlcul per al conjunt de simulacions que es porta a terme, es decideix preparar els casos simplificant el model, tot eliminant els deflectors de la geometria analitzada. Cal recordar que l'objectiu dels deflectors és només orientar de manera adient les components de velocitat de l'aire que surt a través del llavi de la pantalla, de manera que aquest aire incideixi de manera el màxim perpendicular possible contra la tinta dipositada sobre el substrat imprès que es desitja assecar.



a)



b)



c)

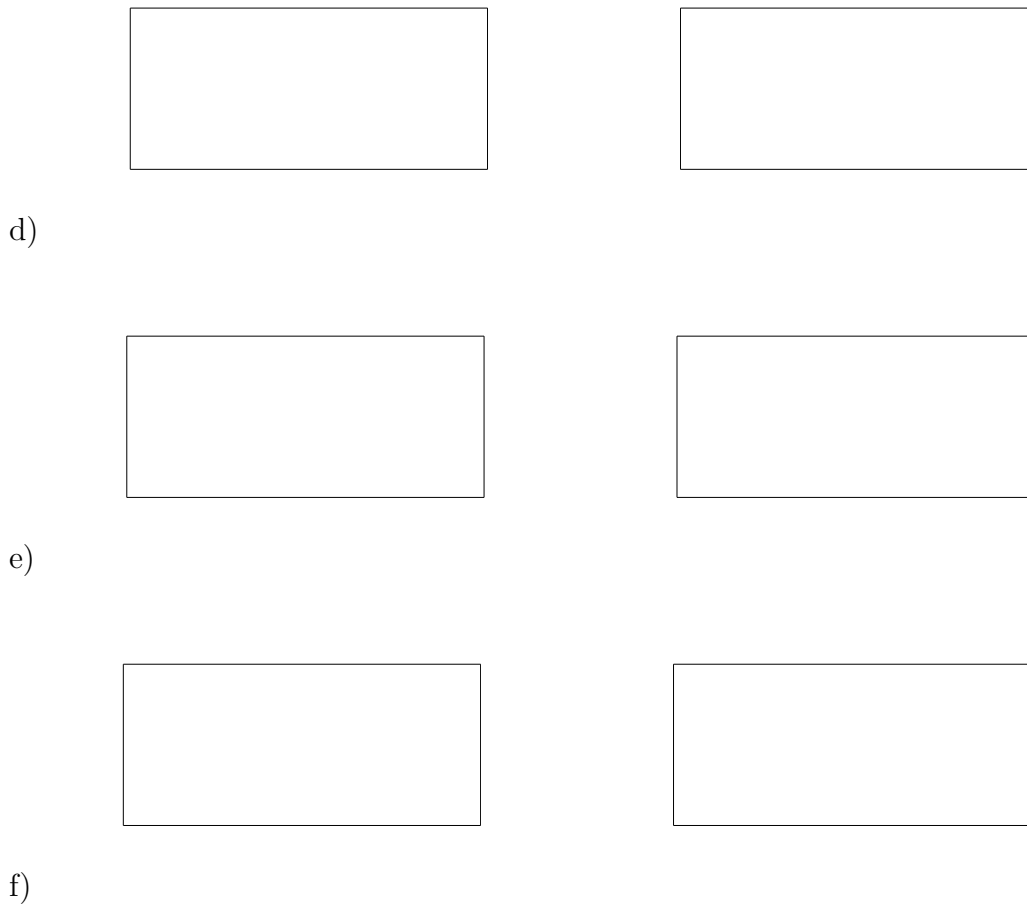


Figura 5.49.: Contorn de velocitat i de pressions, amplada “ $c\text{ mm}$ ”, sense deflectors, a un tall longitudinal efectuat a la part central de la pantalla per diversos diàmetres d’entrada: a) “ $\text{Ø}_1\text{ mm}$ ”, b) “ $\text{Ø}_3\text{ mm}$ ”, c) “ $\text{Ø}_4\text{ mm}$ ”, d) “ $\text{Ø}_5\text{ mm}$ ”, e) “ $\text{Ø}_6\text{ mm}$ ”, f) “ $\text{Ø}_2\text{ mm}$ ” (simulació OpenFOAM)

Les imatges de la fig. 5.49 que es presenten en aquests anàlisis corresponents al contorn de velocitat i pressió a un tall longitudinal de la pantalla, són de dimensions reduïdes on no s’aprecien massa els detalls del comportament del fluid, ja que es tracta més d’un estudi qualitatiu que no pas d’un estudi quantitatiu; l’objectiu d’aquestes simulacions és poder extreure tendències en la velocitat obtinguda en el llavi en funció dels diversos paràmetres que es van variant progressivament en els diversos apartats.

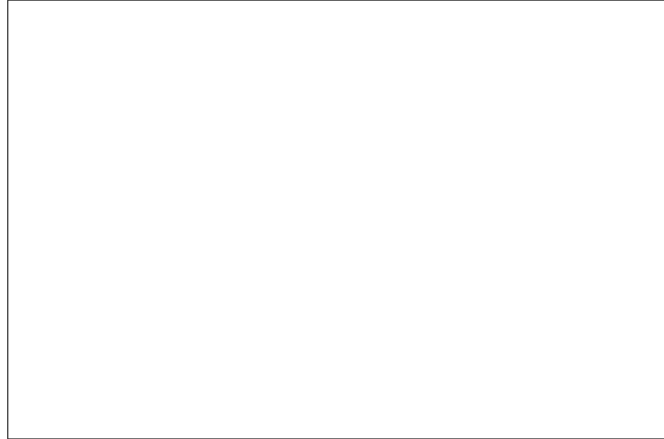


Figura 5.50.: Distribució de velocitats al llarg del llavi, amplada “ $c\text{ mm}$ ”, variant el diàmetre d’entrada i mantenint les dimensions del caixó d’impulsió originals (simulació OpenFOAM)

Tal i com es pot veure si es comparen els resultats de la fig. 5.41 i de la fig. 5.50 per el diàmetre d’entrada de “ $\varnothing_2\text{ mm}$ ” es pot comprovar que la simplificació que s’ha assumit d’eliminar els deflectors de les simulacions per tal de guanyar temps de càlcul, no aporta diferències significatives en tant que la distribució de velocitats assolides al llavi de la pantalla. El comportament és molt similar malgrat les amplades de les dues pantalles siguin diferents entre elles.

On sí que s’aprecien diferències és en l’efecte que produeix la incorporació o no dels deflectors a la pantalla, a la distribució de velocitats entre dos deflectors consecutius (oscil·lació de velocitats entre els valors màxims i mínims locals de velocitat), tal i com es pot veure a la fig. 5.45, enfront al resultat més suau que es mostra a la fig. 5.50.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

La diferència de velocitat al llavi obtinguda al llarg de la pantalla en funció del diàmetre d’entrada es recull a la taula. 5.3.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

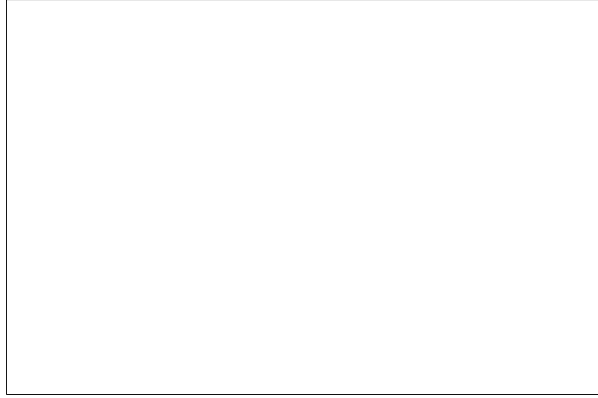
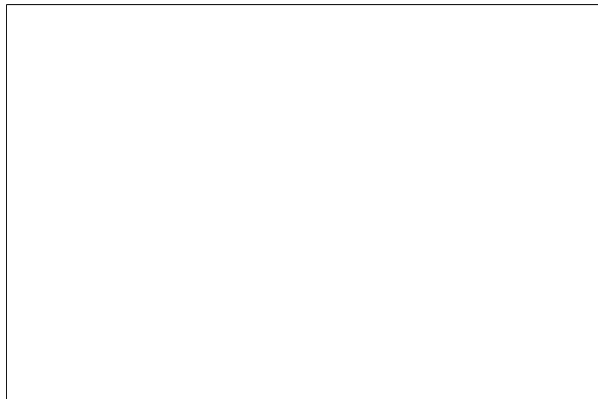


Figura 5.51.: Distribució de pressió al centre del conducte d’impulsió, amplada “ $c\text{ mm}$ ”, variant el diàmetre d’entrada i mantenint les dimensions del caixó d’impulsió originals (simulació OpenFOAM)



Taula 5.3.: Recopilació de resultats, amplada “ $c\text{ mm}$ ”, variant el diàmetre d’entrada, conducte d’impulsió “ $W_2\text{ mm}$ ” x “ $H_2\text{ mm}$ ”

5.3.1.2. Variant les dimensions del conducte d'impulsió

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

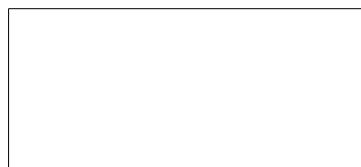
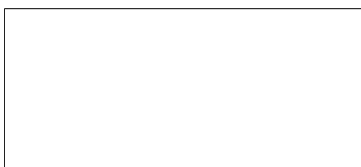
En aquest apartat s'estudia la viabilitat d'obtenir una uniformitat en la distribució de velocitats que sigui semblant a la que s'assoleix amb la geometria que té un diàmetre d'entrada de “ $\varnothing_2 mm$ ”, però en aquest cas variant les dimensions de la zona d'impulsió, tot reduint el diàmetre del conducte d'entrada i també del conducte d'impulsió. Els resultats es presenten a la fig. 5.52.



a)



b)



c)



d)

Figura 5.52.: Contorn de velocitat i de pressions, amplada “ $c\text{ mm}$ ”, sense deflectors, a un tall longitudinal efectuat a la part central de la pantalla per diverses dimensions del conducte d’impulsió: a) “ $\varnothing_3\text{ mm}$ ” i caixó de “ $W_3\text{ mm}$ ” x “ $H_3\text{ mm}$ ”, b) “ $\varnothing_4\text{ mm}$ ” i caixó de “ $W_4\text{ mm}$ ” x “ $H_4\text{ mm}$ ”, c) “ $\varnothing_5\text{ mm}$ ” i caixó de “ $W_5\text{ mm}$ ” x “ $H_5\text{ mm}$ ”, d) “ $\varnothing_6\text{ mm}$ ” i caixó de “ $W_6\text{ mm}$ ” x “ $H_6\text{ mm}$ ” (simulació OpenFOAM)

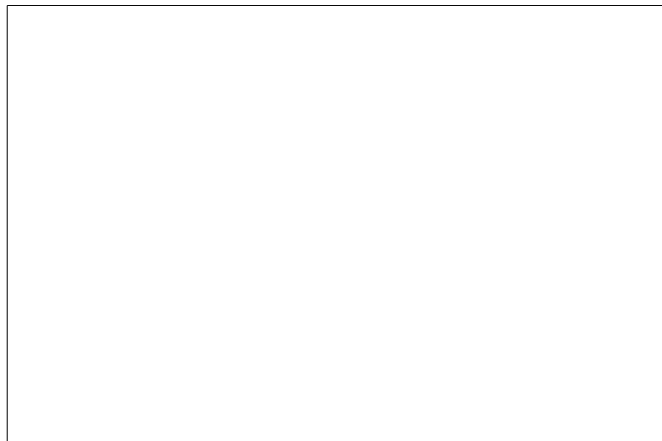


Figura 5.53.: Distribució de velocitats al llarg del llavi, amplada “ $c\text{ mm}$ ”, variant les dimensions del conducte d’impulsió (simulació OpenFOAM)

Si s’analitzen els resultats mostrats a la fig. 5.50 i a la fig. 5.53, es pot veure com ambdós estudis paramètrics que s’han portat a terme mostren un comportament diferent en funció de la distància respecte de la boca d’impulsió que s’està analitzant; aproximadament en tot el primer terç de la llargada de la pantalla és on les velocitats presenten un comportament menys estable, sobretot en la zona més pròxima al conducte circular que fa de boca d’impulsió de la pantalla. A mesura que la distància

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)

creix respecte de la boca d'impulsió, la velocitat es mostra molt més estable en gairebé els dos terços de pantalla que segueixen.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

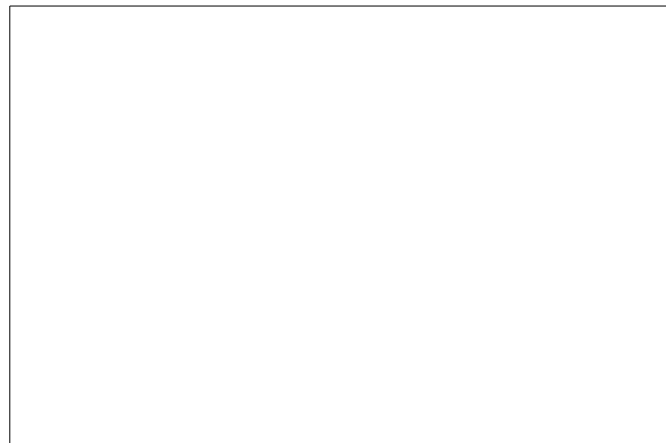


Figura 5.54.: Distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, amplada “*c mm*”, variant les dimensions del conducte d'impulsió (simulació OpenFOAM)



Taula 5.4.: Recopilació de resultats, amplada “*cmm*”, variant el diàmetre d’entrada, i les dimensions del conducte d’impulsió

5.3.1.3. Conclusions preliminars per el disseny de pantalla de les “M6”

Hi ha una relació directa entre la distribució de pressió dintre del conducte d’impulsió de la pantalla i la distribució de velocitat que s’obté a la sortida del llavi de la pantalla. Una major uniformitat en la pressió estàtica dintre de la pantalla, portarà associada una major estabilitat en la velocitat al llarg del llavi de la pantalla.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

5.3.2. Pantalles tipus “M4”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Una vegada millorat aquest disseny, les conclusions que se’n derivin es podran implementar a la resta de gamma dintre de la mateixa sèrie, ja que les pantalles tenen unes dimensions exteriors similars, així com uns diàmetres dels conductes d’impulsió i aspiració de la pantalla, també similars entre ells.

La sèrie de màquines a la qual pertany la pantalla “M4” presenta la particularitat de tenir un diàmetre d’entrada del conducte d’impulsió menor al que presenten les pantalles de les “M6”, i el seu comportament pel que fa a la distribució de velocitat obtinguda al llarg del llavi de la pantalla és pitjor, tal i com es pot veure a les mesures experimentals mostrades a la fig. 5.19 i fig. 5.40. En aquest cas la dimensió del diàmetre d’impulsió s’ha de mantenir molt pròxim a les dimensions actuals, ja que si creixés molt es podrien produir interferències entre els conductes que alimenten la pantalla, i la bancada de la pròpia màquina.

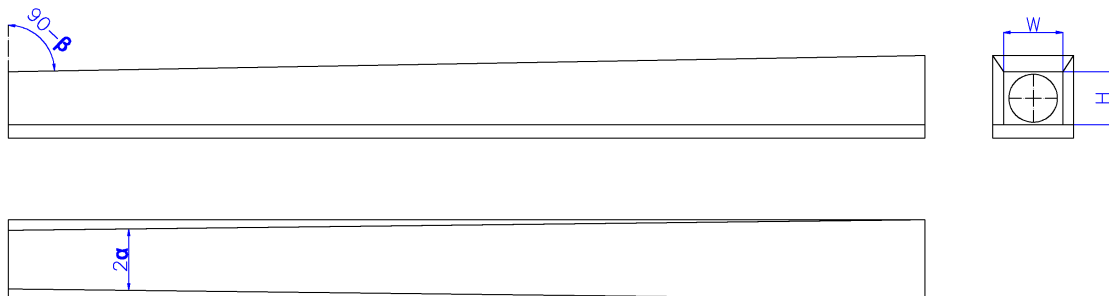


Figura 5.55.: Definició gràfica dels paràmetres que s’han variat per a la optimització del caixó d’impulsió de la pantalla

A la fig. 5.55 s'han representat el conjunt de paràmetres que es tenen en compte a l'hora d'efectuar l'estudi paramètric de les pantalles, i que es llisten a continuació.

H , alçada del caixó d'impulsió (a l'extrem on hi ha la boca d'impulsió).

W , amplada del caixó d'impulsió (a l'extrem on hi ha la boca d'impulsió).

α , angle que forma la paret lateral del caixó d'impulsió amb un pla vertical.

β , angle que formen la paret superior del caixó d'impulsió, respecte d'un pla horitzontal.

Les simulacions per aquest model de pantalla es porten a terme per una amplada de màquina de " $i\text{ mm}$ " corresponent a la màxima amplada de la màquina "M4".

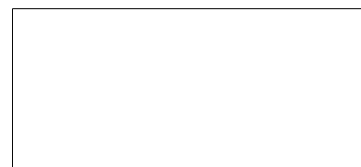
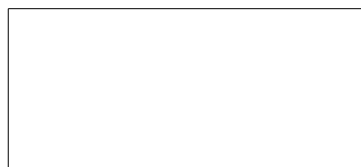
5.3.2.1. Variant les dimensions del conducte d'impulsió

a) Diàmetre del conducte d'entrada, i amplada del caixó d'impulsió, constants

El diàmetre d'entrada es manté constant i igual a " $\varnothing_1\text{ mm}$ ", i l'amplada del conducte d'impulsió es manté a " $j\text{ mm}$ ". Només es varia la cota corresponent a l'alçada del conducte d'impulsió. La distància vertical entre el centre de la boca d'impulsió i el llavi, es manté constant. En aquestes simulacions s'han inclòs els deflectors al model. A la fig. 5.56 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.57 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.



a)



b)

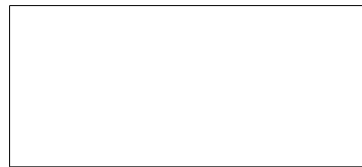
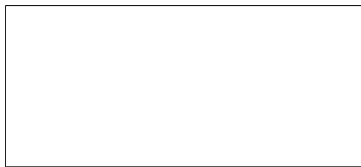
5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)



c)

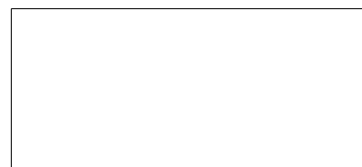
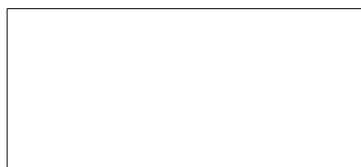


d)



e)

Figura 5.56.: Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $j mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "



a)

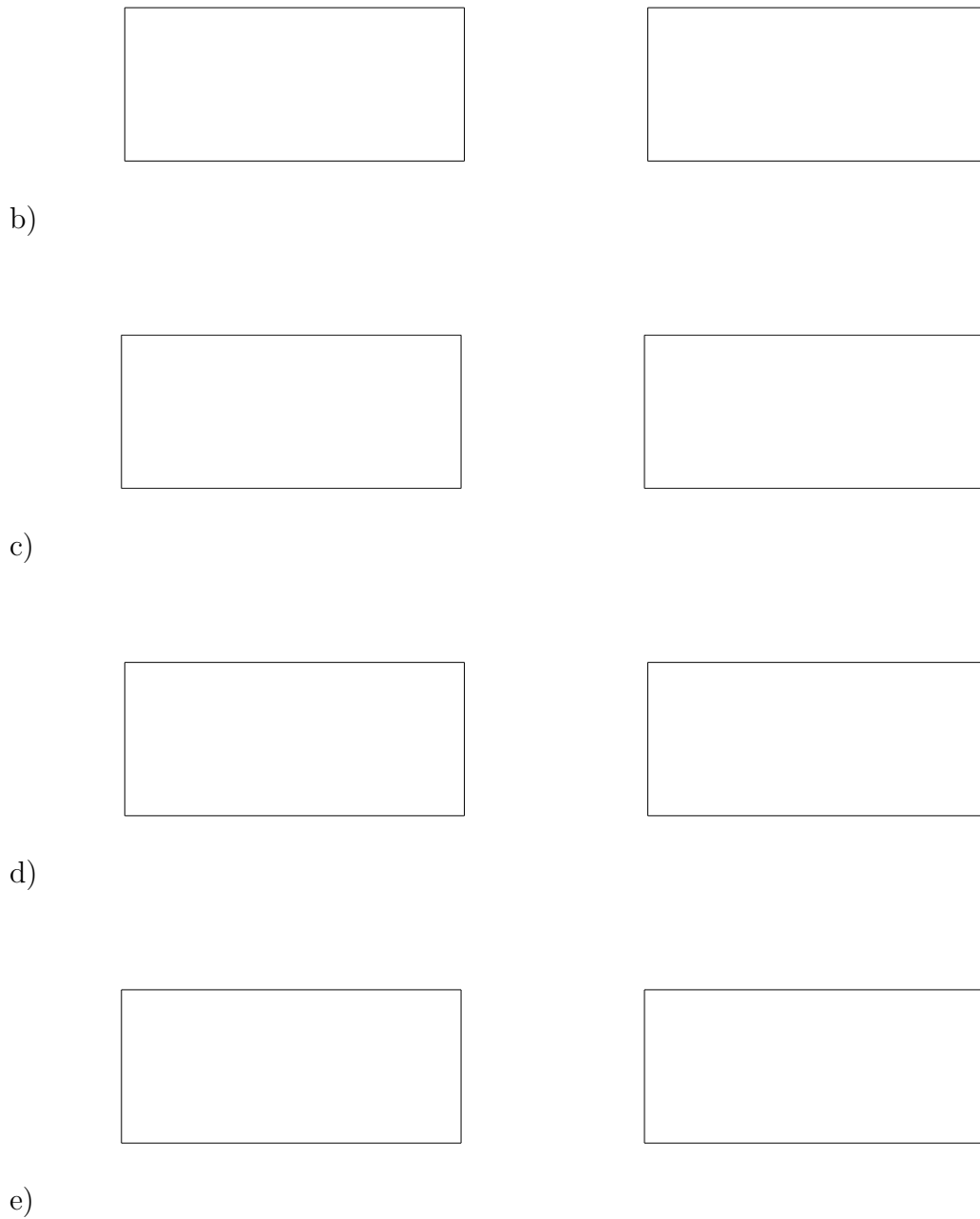


Figura 5.57.: Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $j mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "

b) Diàmetre del conducte d'entrada, i amplada del caixó d'impulsió, constants

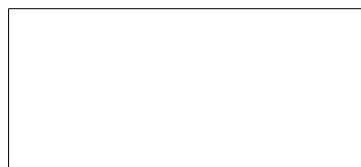
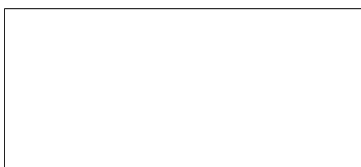
El diàmetre d'entrada es manté constant i igual a " $\varnothing_1 mm$ ", i l'amplada del conducte d'impulsió es manté a " $k mm$ ". Només es varia la cota corresponent a l'alçada del conducte d'impulsió. La distància vertical entre el centre de la boca d'impulsió i el llavi, es manté constant. En aquestes simulacions s'han inclòs els deflectors al model. A la fig. 5.58 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.59 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.



a)



b)



c)



d)

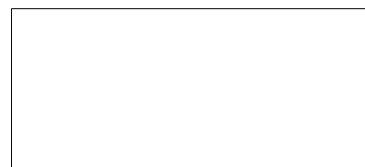
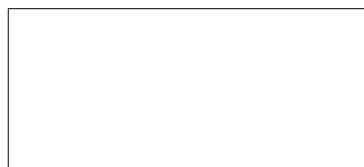


e)

Figura 5.58.: Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $k mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "



a)



b)

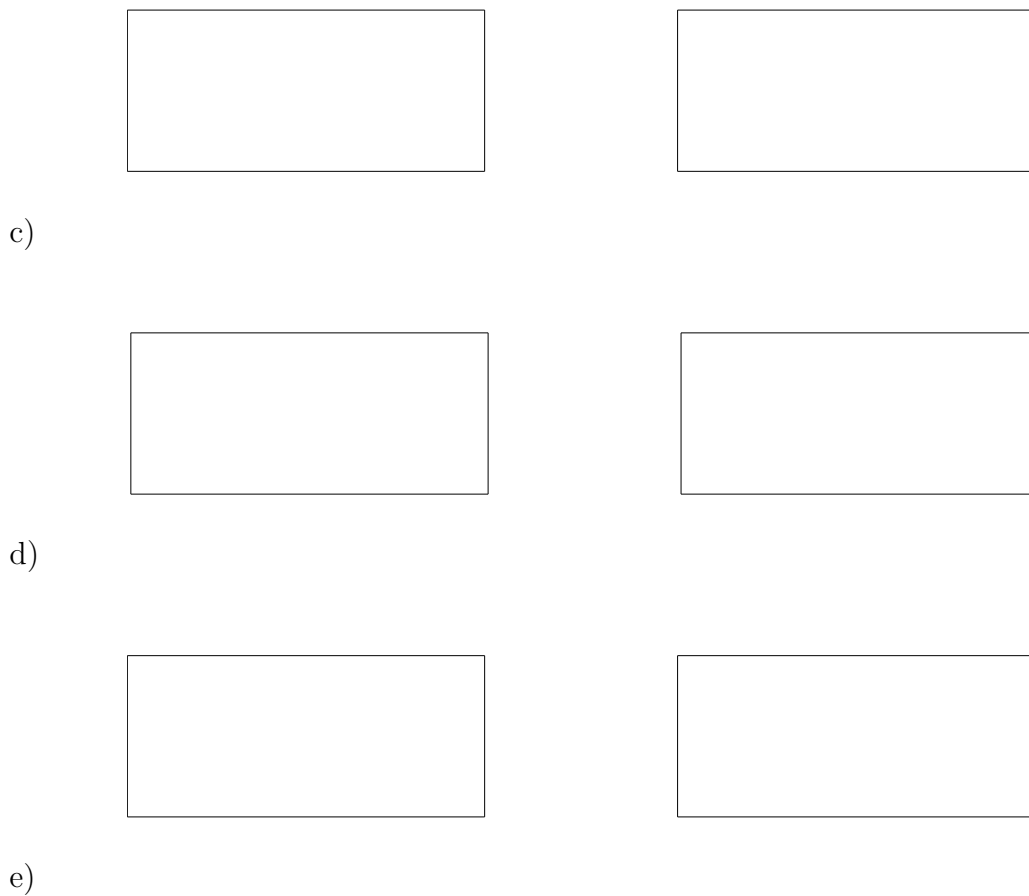
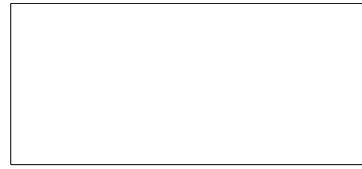
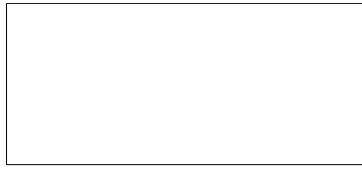


Figura 5.59.: Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $k mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "

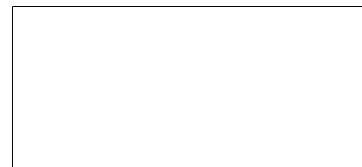
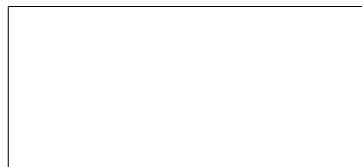
c) Diàmetre del conducte d'entrada, i amplada del caixó d'impulsió, constants

El diàmetre d'entrada es manté constant i igual a " $\varnothing_1 mm$ ", i l'amplada del conducte d'impulsió es manté a " $f mm$ ". Només es varia la cota corresponent a l'alçada del conducte d'impulsió. La distància vertical entre el centre de la boca d'impulsió i el llavi, es manté constant. En aquestes simulacions s'han inclòs els deflectors al model. A la fig. 5.60 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.61 es representa el contorn de pressió a un tall

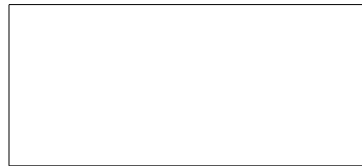
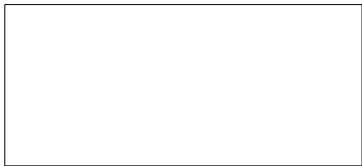
longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.



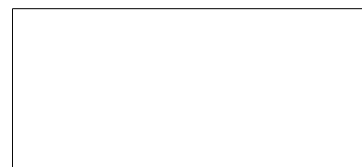
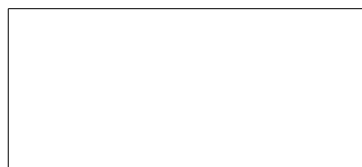
a)



b)



c)



d)

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)



e)

Figura 5.60.: Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $f mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "



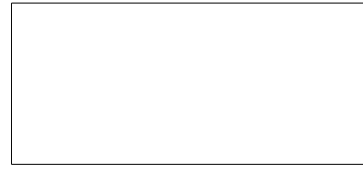
a)



b)



c)



d)



e)

Figura 5.61.: Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 \text{ mm}$ ", i un caixó amb una amplada de " $f \text{ mm}$ ". a) alçada " $j \text{ mm}$ ", b) alçada " $k \text{ mm}$ ", c) alçada " $f \text{ mm}$ ", d) alçada " $g \text{ mm}$ ", e) alçada " $l \text{ mm}$ "

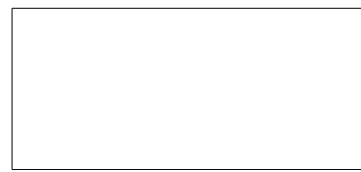
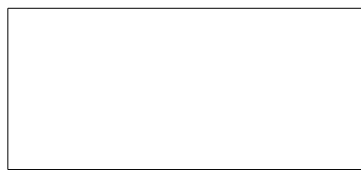
d) Diàmetre del conducte d'entrada, i amplada del caixó d'impulsió, constants

El diàmetre d'entrada es manté constant i igual a " $\varnothing_1 \text{ mm}$ ", i l'amplada del conducte d'impulsió es manté a " $g \text{ mm}$ ". Només es varia la cota corresponent a l'alçada del conducte d'impulsió. La distància vertical entre el centre de la boca d'impulsió i el llavi, es manté constant. En aquestes simulacions s'han inclòs els deflectors al model. A la fig. 5.62 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.63 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)



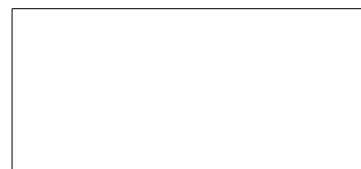
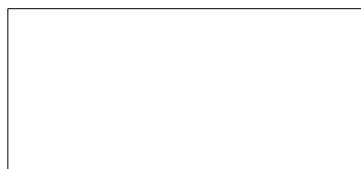
a)



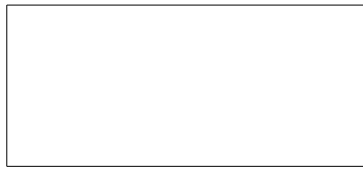
b)



c)

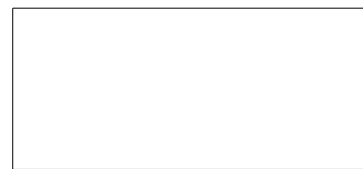


d)



e)

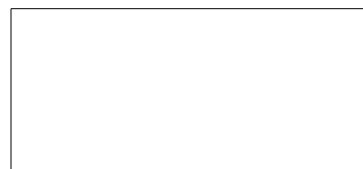
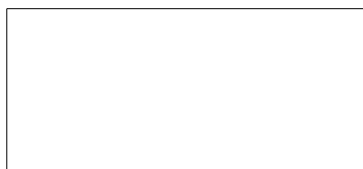
Figura 5.62.: Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $g mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "



a)



b)



c)

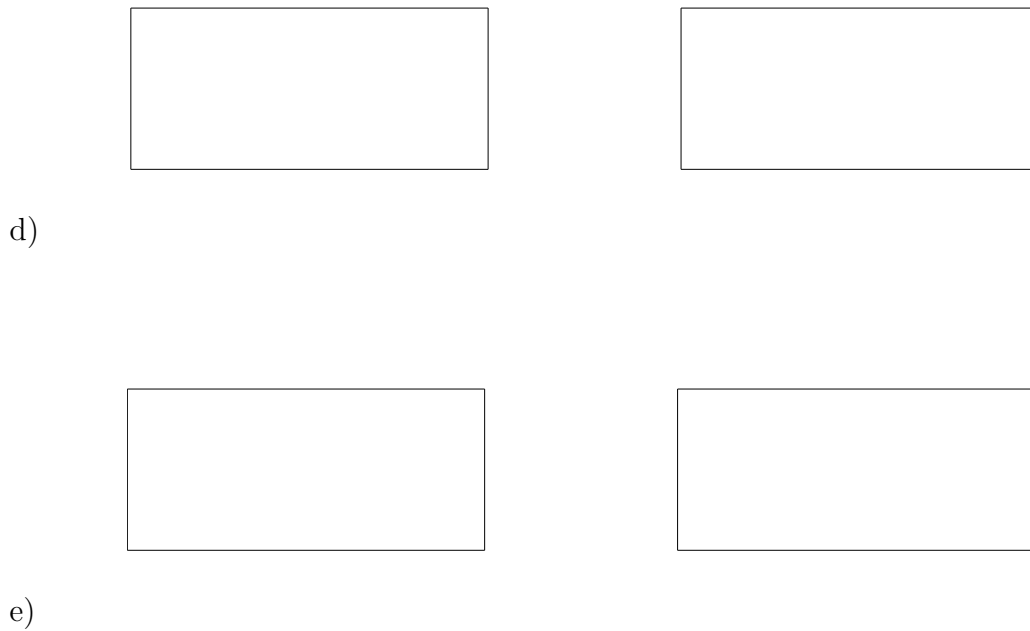


Figura 5.63.: Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $g mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "

e) Diàmetre del conducte d'entrada, i amplada del caixó d'impulsió, constants

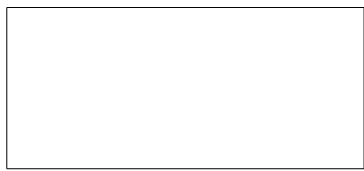
El diàmetre d'entrada es manté constant i igual a " $\varnothing_1 mm$ ", i l'amplada del conducte d'impulsió es manté a " $l mm$ ". Només es varia la cota corresponent a l'alçada del conducte d'impulsió. La distància vertical entre el centre de la boca d'impulsió i el llavi, es manté constant. En aquestes simulacions s'han inclòs els deflectors al model. A la fig. 5.64 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.65 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.



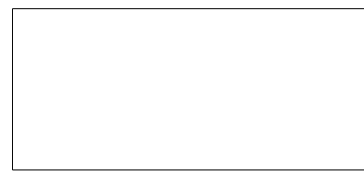
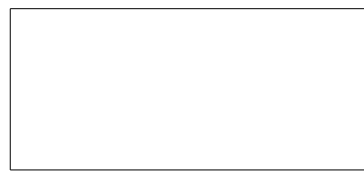
a)



b)



c)



d)

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)



e)

Figura 5.64.: Contorn de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó amb una amplada de " $l mm$ ". a) alçada " $j mm$ ", b) alçada " $k mm$ ", c) alçada " $f mm$ ", d) alçada " $g mm$ ", e) alçada " $l mm$ "



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 5.65.: Contorn de pressió, i distribució de pressió al centre del conducte d'impulsió, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 \text{ mm}$ ", i un caixó amb una amplada de " $l \text{ mm}$ ". a) alçada " $j \text{ mm}$ ", b) alçada " $k \text{ mm}$ ", c) alçada " $f \text{ mm}$ ", d) alçada " $g \text{ mm}$ ", e) alçada " $l \text{ mm}$ "

f)Conclusions - Interpretació gràfica dels resultats

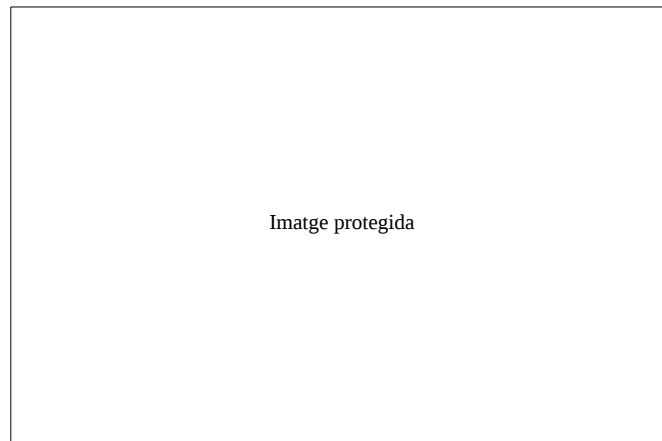


Figura 5.66.: Representació tridimensional de la desviació estàndard $StDev$ de la velocitat obtinguda a la sortida del llavi de la pantalla, en funció de l'amplada W i l'alçada H del conducte d'impulsió de la pantalla, tot mantenint constant el diàmetre del conducte d'impulsió, a " $\varnothing_1 mm$ ", així com el seu posicionament respecte del llavi

A partir de la fig. 5.66, s'aprecia que dintre del rang de possibilitats estudiat hi ha dues zones on apareixen dos mínims locals, un d'ells es correspon a $W_a, H_a, StDev = 2,13$ i l'altre a $W_b, H_b, StDev = 2,02$. Ambdós punts podrien ésser considerats com a punt de partida per el disseny del nou caixó d'impulsió, però es decideix centrar l'atenció i continuar iterant a partir del segon disseny (W_b i H_b), pel fet de tenir una millor estabilitat en la distribució de velocitats, així com pel fet de requerir d'unes dimensions del caixó d'impulsió menors. Cal tenir en compte que l'espai intern de què disposa el conjunt impulsíó-aspiració de tota la pantalla és limitat i bastant reduït, i per tant l'espai de més que es requereixi per a la zona d'impulsió serà espai de menys que quedarà disponible per a redissenyar la part corresponent a l'aspiració de la pantalla.

5.3.2.2. Variant la inclinació de les parets del caixó d'impulsió

Es comença a iterar a partir del punt que s'ha escollit com a millor candidat d'entre els que han destacat a la fig. 5.66, i que com ja s'ha dit és de W_b i H_b . En aquest apartat el que es proposa és estudiar la possibilitat de millorar el diagrama de velocitats obtingut al llavi de la pantalla, tot variant els angles d'inclinació de les parets que conformen el caixó d'impulsió de la pantalla. La secció que connecta amb el conducte d'impulsió pel qual s'introdueix aire dintre del caixó d'impulsió, es manté constant a totes les simulacions que s'han realitzat i amb les mides corresponents a W_b i H_b que s'acaben de comentar.

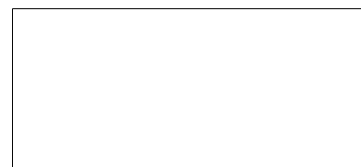
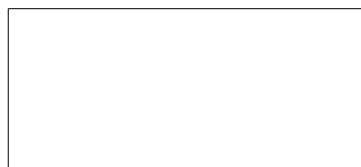
La distància vertical entre el centre de la boca d'impulsió i el llavi, es manté constant. En aquestes simulacions s'han inclòs els deflectors al model.

a) Mantenint constant l'angle $\alpha = 1$, i variant l'angle β entre el rang $-1 \leq \beta \leq 1$

A la fig. 5.67 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.68 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.

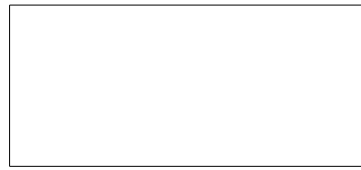
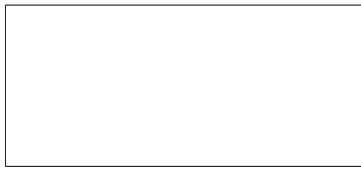


a)



b)

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)



c)



d)



e)

Figura 5.67.: Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 1$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$



a)

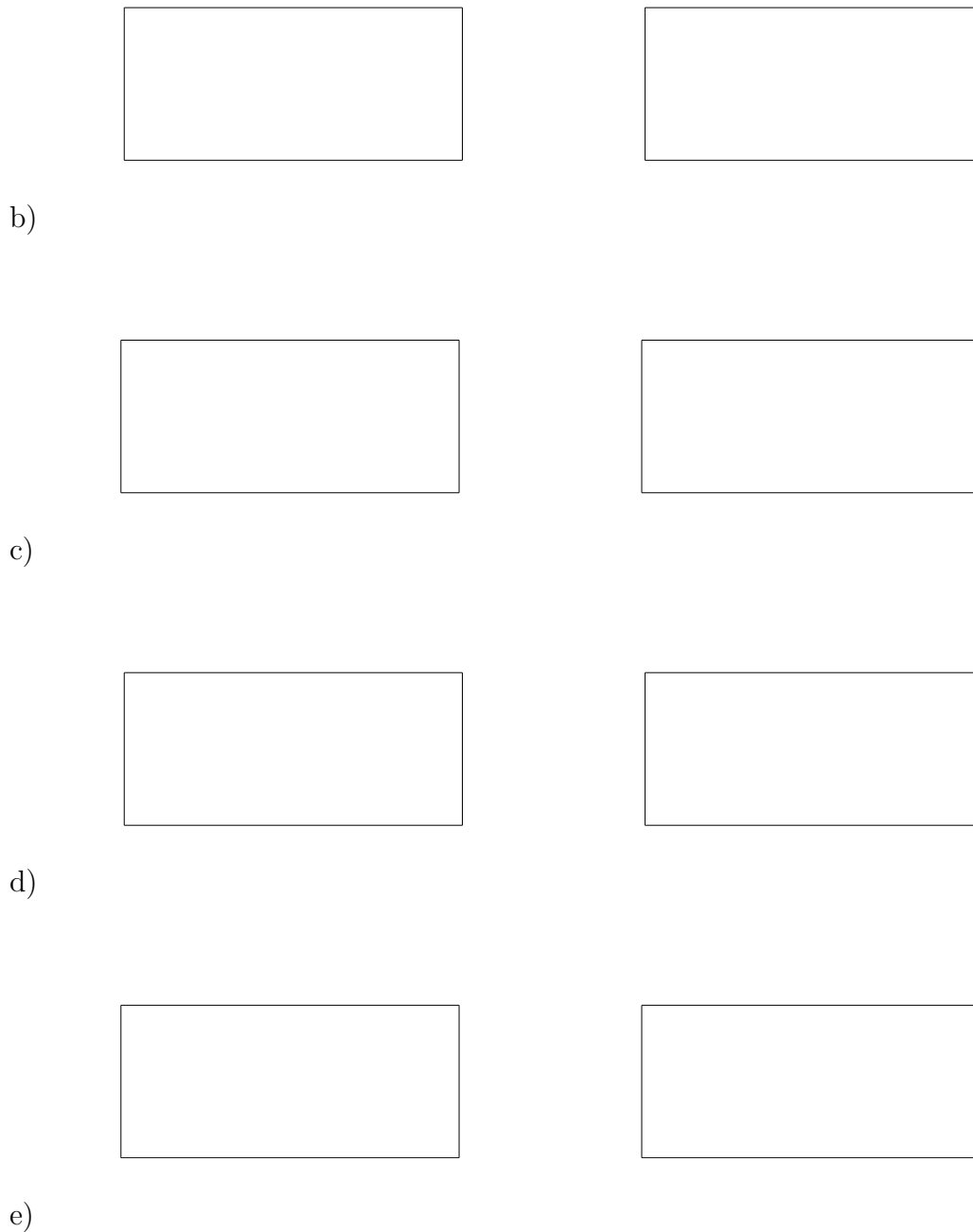
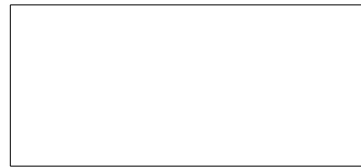
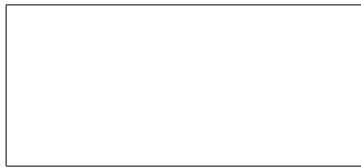


Figura 5.68.: Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 1$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$

b) Mantenint constant l'angle $\alpha = 0,5$, i variant l'angle β entre el rang $-1 \leq \beta \leq 1$

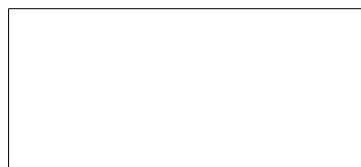
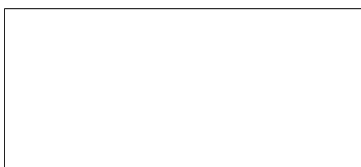
A la fig. 5.69 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.70 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.



a)



b)



c)



d)

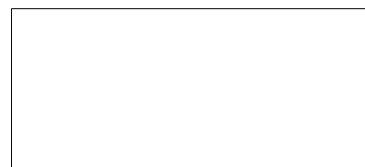
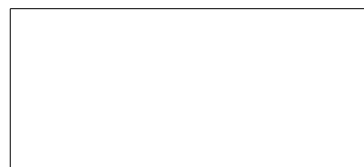


e)

Figura 5.69.: Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 0,5$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$



a)



b)

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)

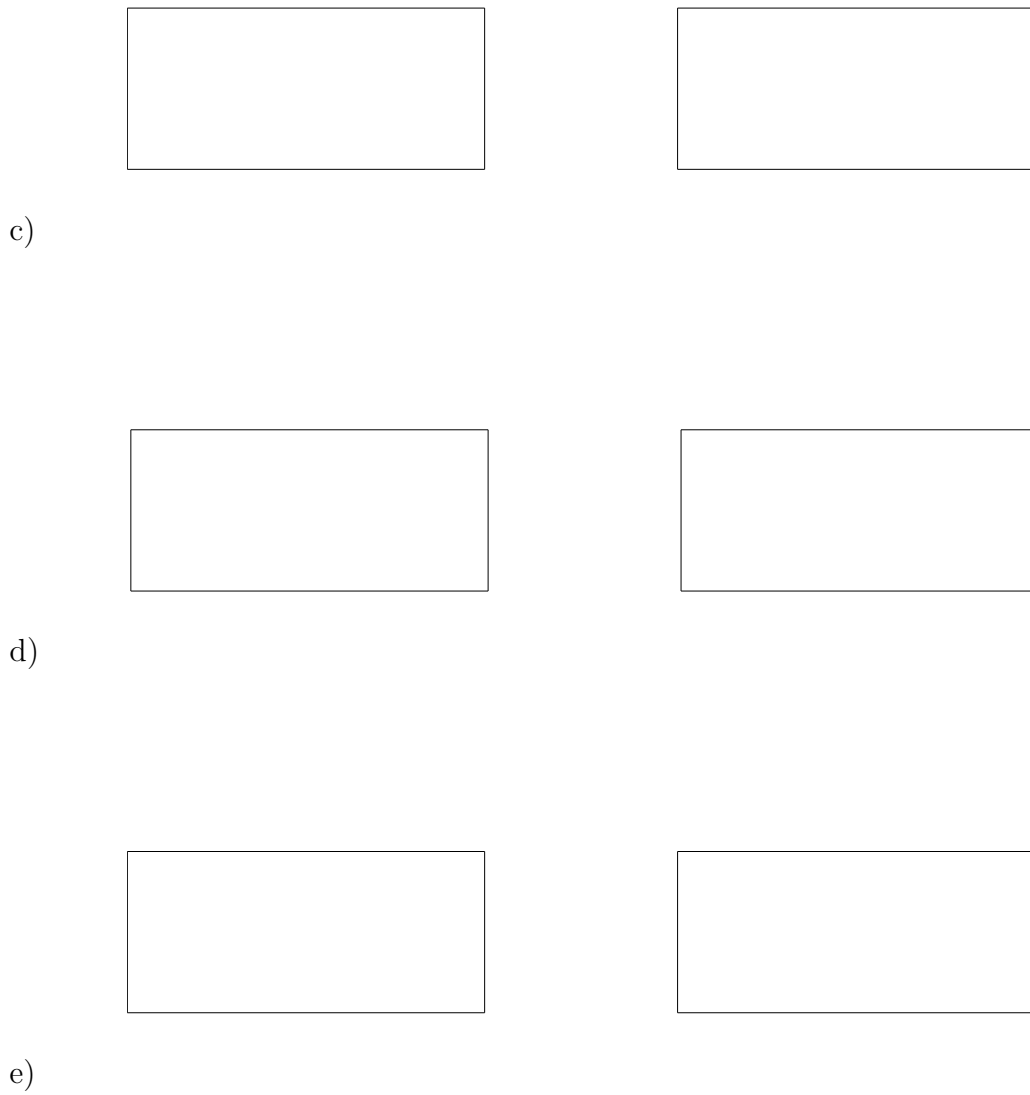


Figura 5.70.: Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 0,5$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$

c) Mantenint constant l'angle $\alpha = 0$, i variant l'angle β entre el rang

$$-1 \leq \beta \leq 1$$

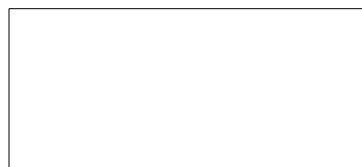
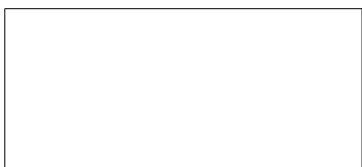
A la fig. 5.71 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.72 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.



a)



b)



c)

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)

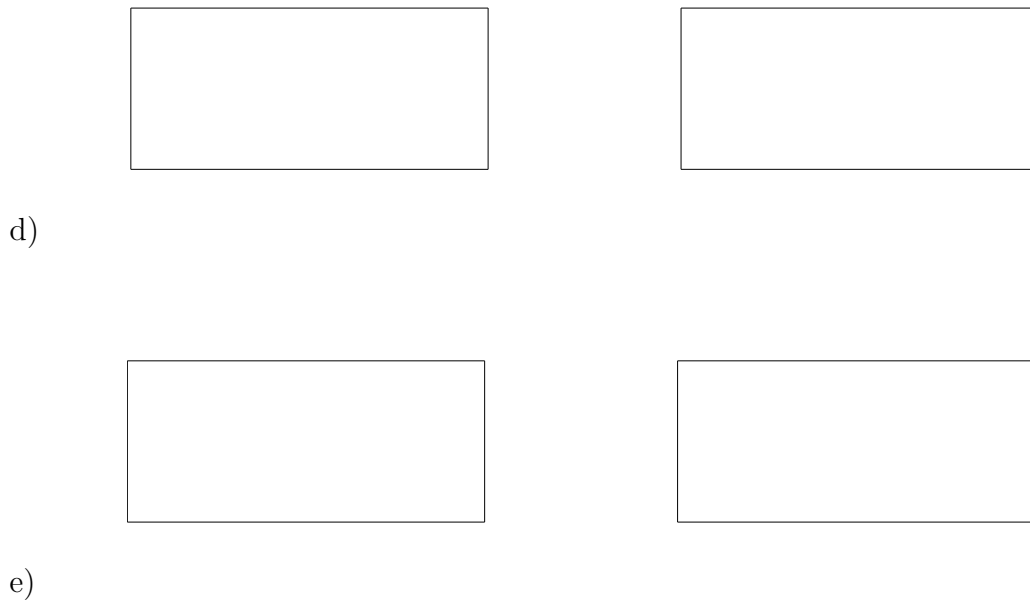
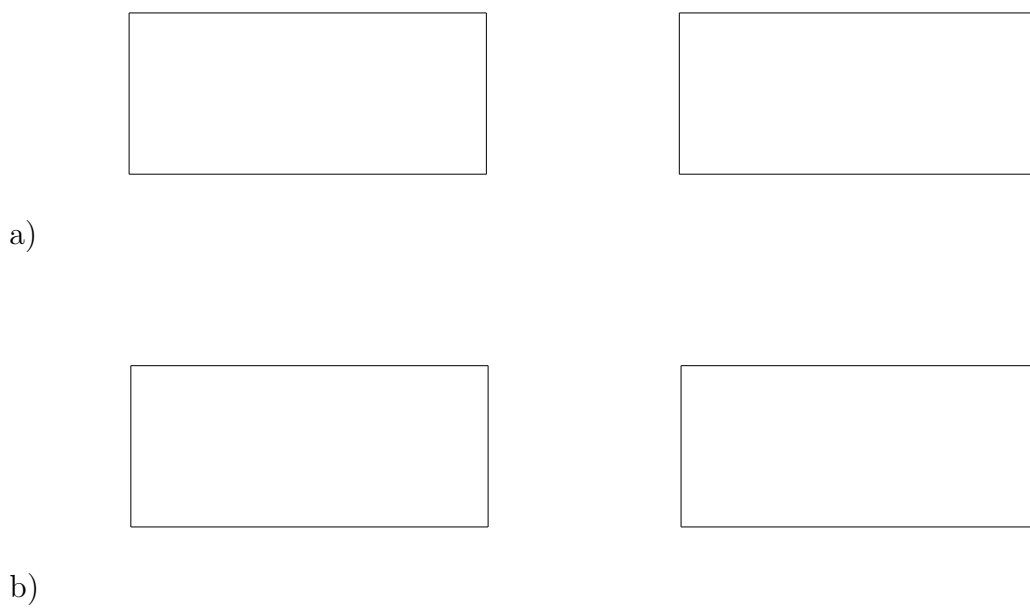


Figura 5.71.: Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 0$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$



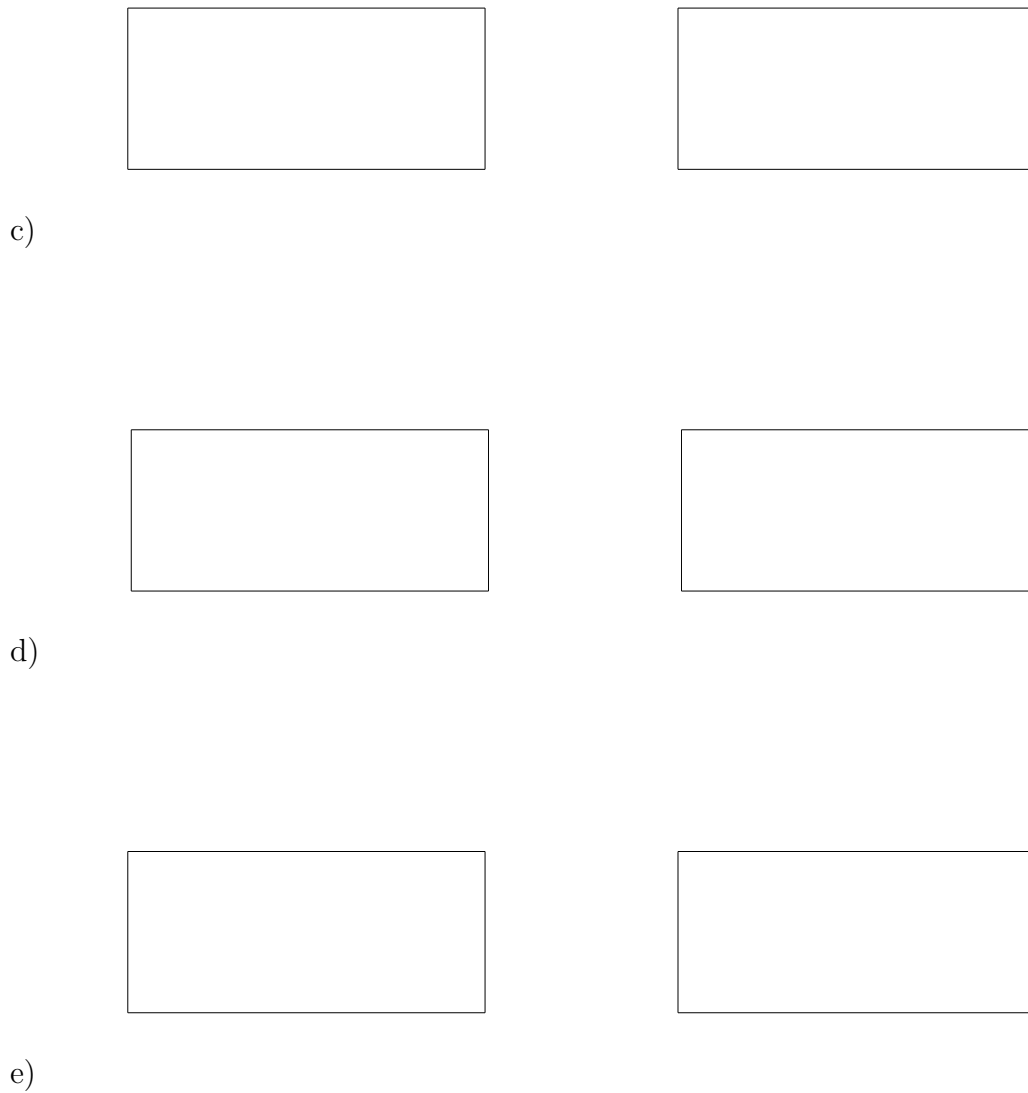


Figura 5.72.: Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = 0$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$

d) Mantenint constant l'angle $\alpha = -0,5$, i variant l'angle β entre el rang $-1 \leq \beta \leq 1$

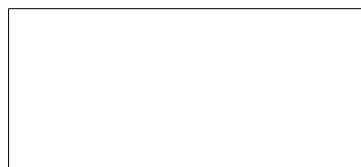
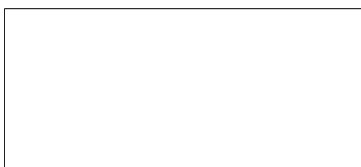
A la fig. 5.73 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.74 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.



a)



b)



c)



d)

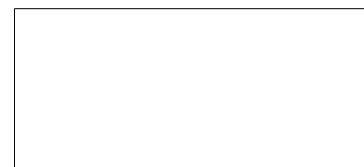
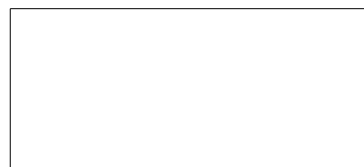


e)

Figura 5.73.: Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = -0,5$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$



a)



b)

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)

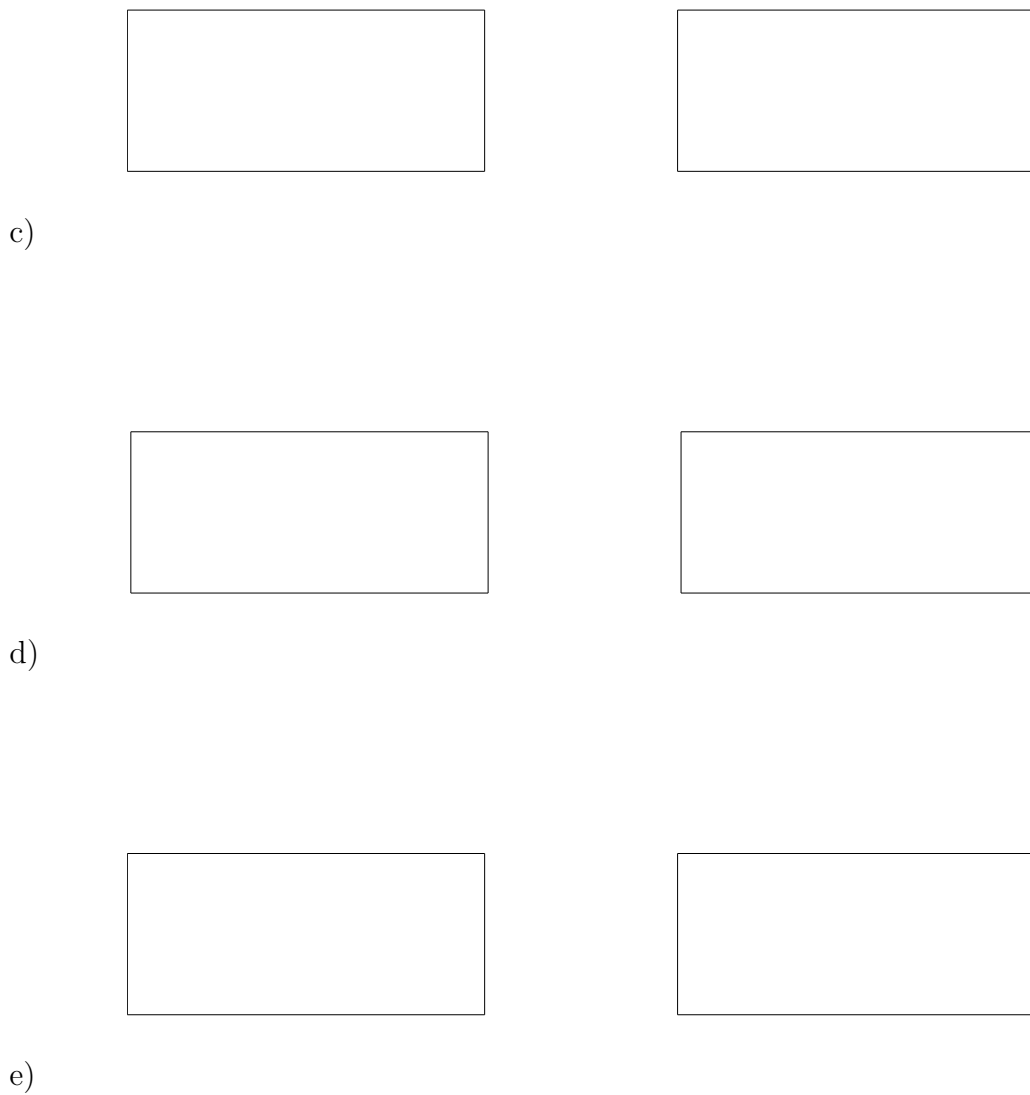


Figura 5.74.: Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = -0,5$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$

e) Mantenint constant l'angle $\alpha = -1$, i variant l'angle β entre el rang $-1 \leq \beta \leq 1$

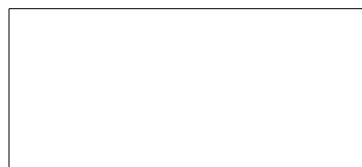
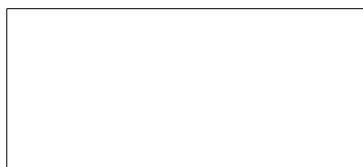
A la fig. 5.75 es representa el contorn de velocitats a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, així com la distribució de velocitats en el llavi de la pantalla. A la fig. 5.76 es representa el contorn de pressió a un tall longitudinal de la pantalla situat al seu pla de simetria, i la distribució de pressions en el centre del caixó d'impulsió.



a)



b)



c)

5.3 Estudi paramètric de les pantalles del cos impressor (part corresponent a la impulsió)

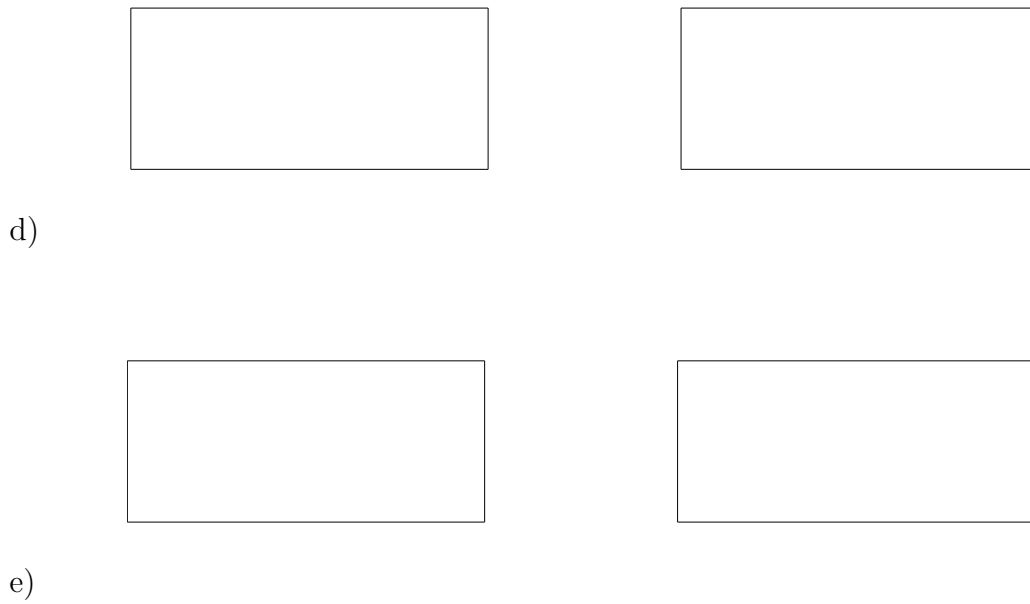
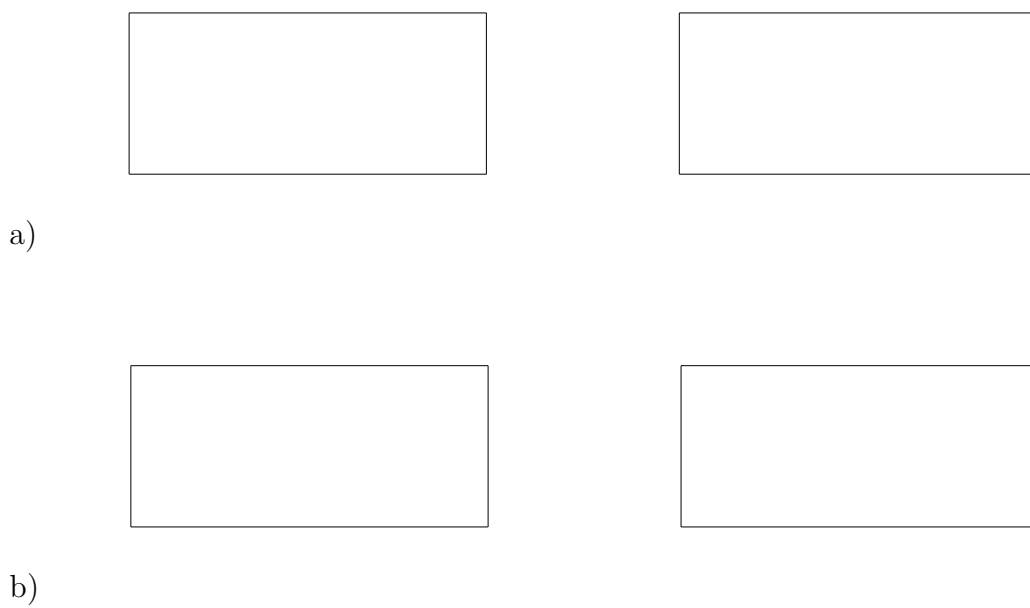


Figura 5.75.: Contorn longitudinal de velocitats, i velocitat en el llavi de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = -1$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$



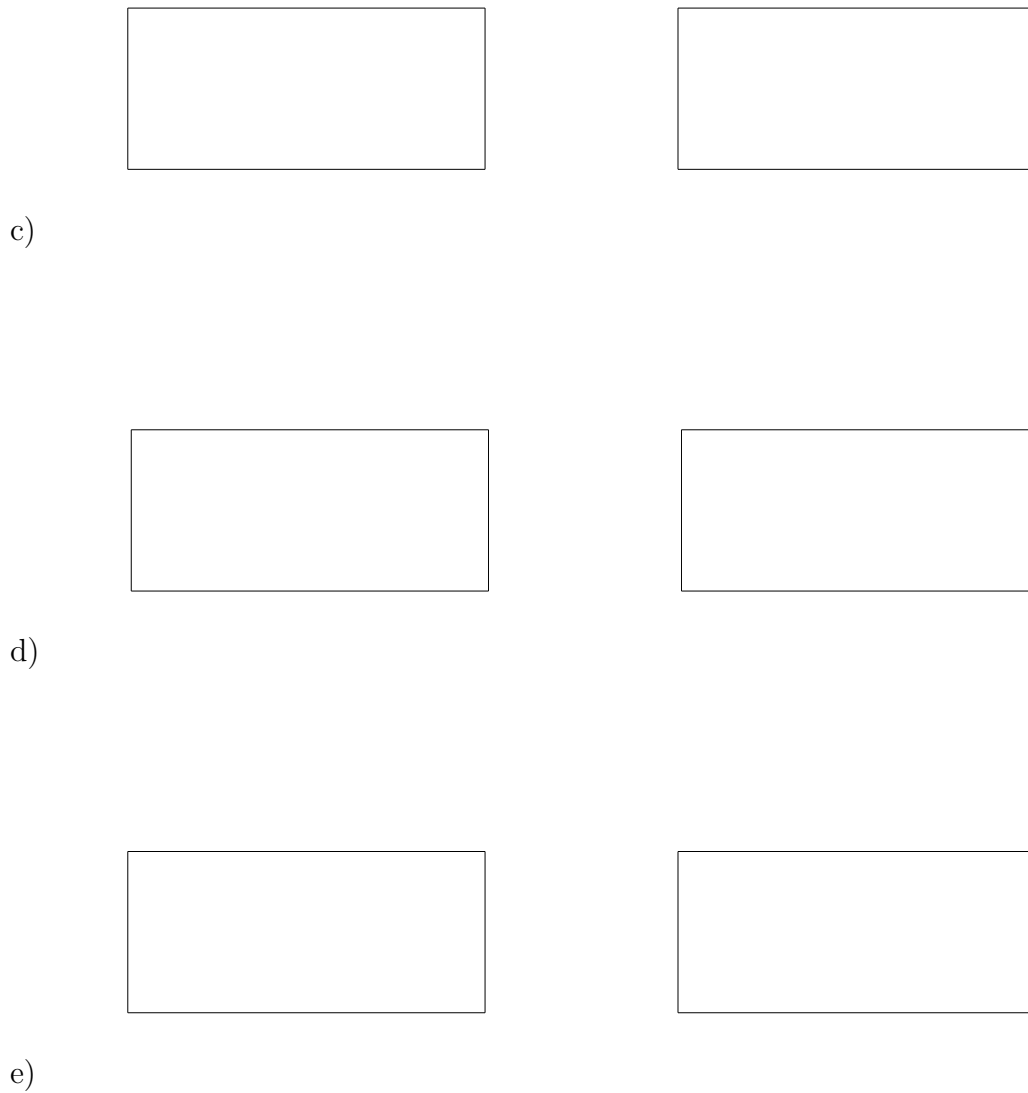


Figura 5.76.: Contorn longitudinal de pressió, i pressió estàtica en el centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per un diàmetre d'entrada de " $\varnothing_1 mm$ ", i un caixó d'impulsió d'amplada inicial de W_b , alçada inicial de H_b i un angle $\alpha = -1$. a) $\beta = 1$, b) $\beta = 0,5$, c) $\beta = 0$, d) $\beta = -0,5$ i e) $\beta = -1$

f)Conclusions - Interpretació gràfica dels resultats

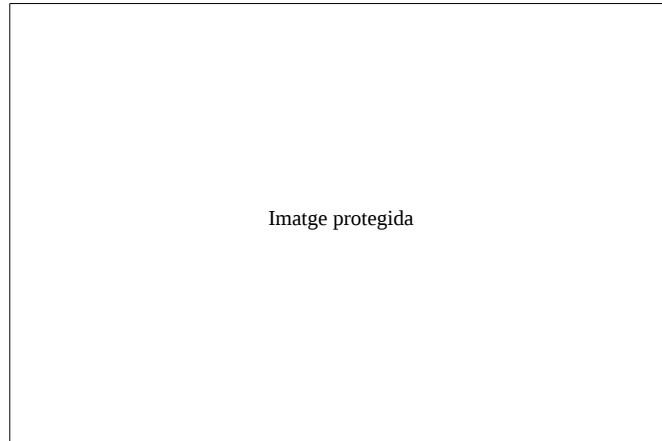


Figura 5.77.: Representació tridimensional de la desviació estàndard $StDev$ de la velocitat obtinguda a la sortida del llavi de la pantalla, en funció dels angles α i β de les parets que configuren el caixó d'impulsió, tot mantenint constant el diàmetre del conducte d'impulsió a " $\varnothing_1 mm$ " i l'amplada inicial i alçada inicial del caixó en W_b i H_b respectivament

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

5.4. Disseny de la part corresponent a la impulsió de la pantalla d'assecatge entre tinters

5.4.1. Primer prototip

5.4.1.1. Resultats obtinguts mitjançant simulació amb el software OpenFOAM

A la secció anterior s'ha fet un estudi paramètric de la distribució de velocitats que s'obté al llavi de la pantalla variant les dimensions del caixó d'impulsió, així com la inclinació de les seves parets. Del conjunt de simulacions que s'han realitzat, 50 en total, s'ha arribat a la conclusió que els millors resultats s'obtenen per una geometria del caixó d'impulsió de mides W_b , H_b , α_b i β_b .

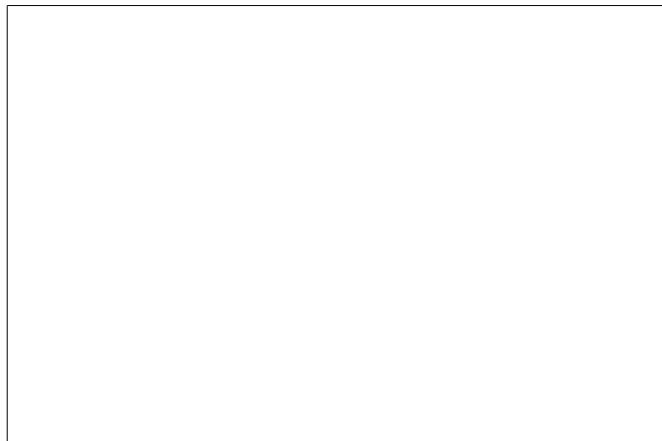


Figura 5.78.: Imatge tridimensional de la part corresponent a la impulsió de la pantalla formada per el caixó d'impulsió, llavi i deflectors, segons els resultats obtinguts de l'estudi paramètric (prototip núm. 1)

A la fig. 5.79 i fig. 5.80 es comparen les velocitats obtingudes en el llavi de la pantalla, i les pressions a la part central del caixó d'impulsió de la pantalla, del disseny actual de la pantalla "M4" i el prototip mostrat a la fig. 5.78.

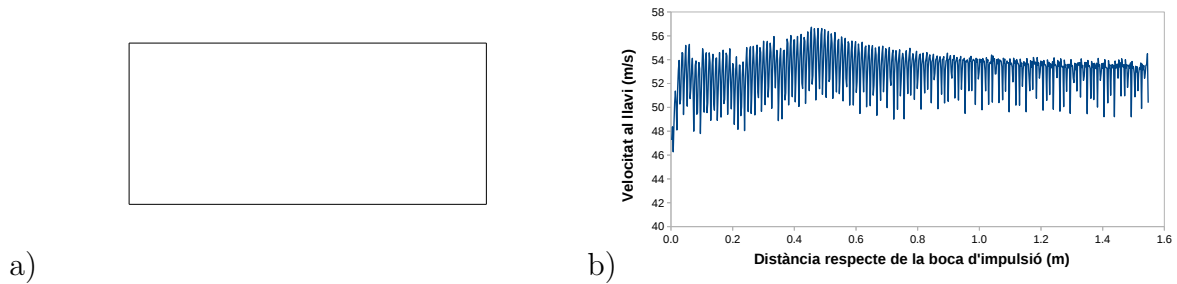


Figura 5.79.: Distribució de velocitats al llavi de la pantalla per una amplada de “ $i\text{ mm}$ ”, i una velocitat al llavi de 50 m/s . a) pantalla actual tipus “M4”, b) nou disseny proposat, versió 1, corresponent al disseny de la fig. 5.78

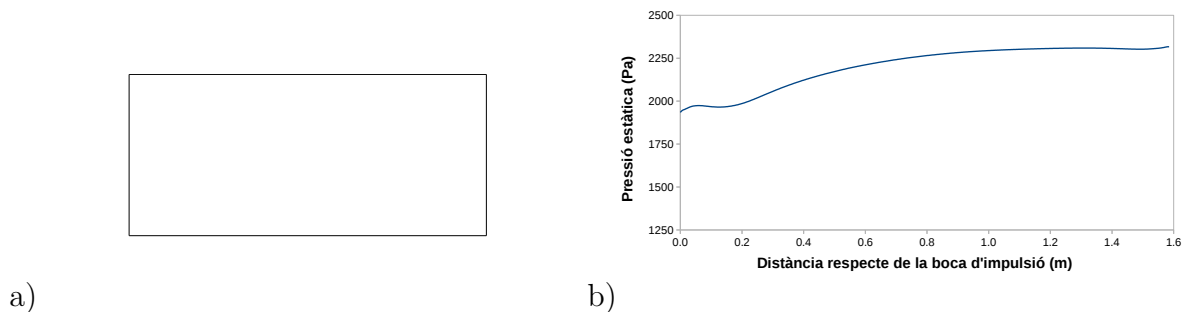


Figura 5.80.: Pressió estàtica al centre del caixó d'impulsió de la pantalla, per una amplada de “ $i\text{ mm}$ ”, i una velocitat al llavi de 50 m/s . a) pantalla actual tipus “M4”, b) nou disseny proposat, versió 1, corresponent al disseny de la fig. 5.78

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Malgrat que s'ha aconseguit obtenir una distribució de velocitats més plana, no ha estat possible eliminar la oscil·lació o soroll que es produeix entre dos deflectors consecutius, i que es corresponen amb els pics que apareixen a la fig. 5.79. Aquesta oscil·lació en el diagrama de velocitats es deu al canvi bruscat de direcció que experimenta el fluid al col·lisionar contra les parets dels deflectors que tenen una orientació vertical (i perpendicular a la direcció en què circula el fluid dintre del caixó d'impulsió), l'objectiu dels quals és dirigir convenientment l'aire que surt a través

del llavi perquè incideixi el més perpendicular possible sobre el substrat imprès que es desitja assecar.

Una vegada s'ha escollit el concepte de disseny que segons les simulacions aporta uns millors resultats, es decideix portar a terme la fabricació d'aquest primer prototip i així validar-lo experimentalment per decidir si cal portar a terme una revisió del primer concepte abans de continuar avançant cap a la següent etapa de disseny que consistiria en estudiar la part corresponent a l'aspiració de la pantalla i que cal acoblar a la part d'impulsió.

Si es col·loca el disseny que s'ha desenvolupat per a la impulsió dintre de tot el conjunt format per la pantalla completa (impulsió, aspiració i carcassa exterior) s'aprecia que l'espai que ocupa el caixó d'impulsió fa molt difícil el redisseny de la zona d'aspiració ja que en algunes zones queda molt poc espai disponible com per què l'aire que s'ha d'extreure de la pantalla pugui ésser retirat de forma fàcil i efectiva.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Al model simplificat arrodonit de la fig. 5.81 b, s'hi han incorporat unes ales soldades l'objectiu de les quals és poder afavorir una aspiració més uniforme al llarg de tota l'amplada de la pantalla segons es veu a la fig. 5.82.

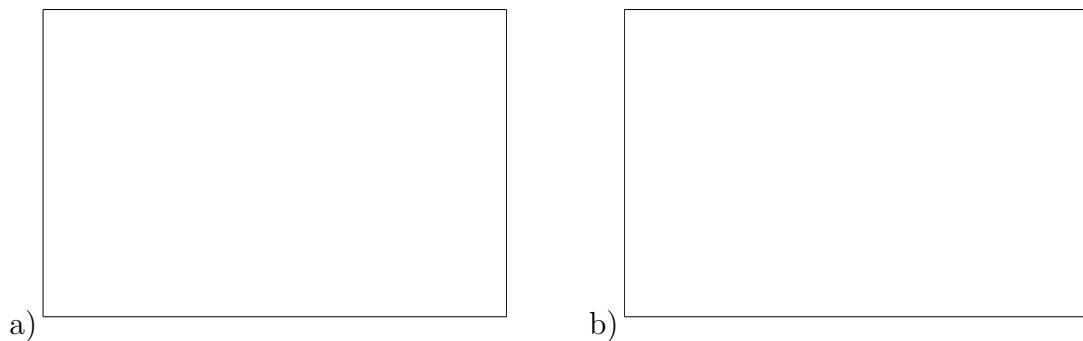


Figura 5.81.: Ubicació del caixó d'impulsió dintre del conjunt de la pantalla d'assecatge. a) disseny original obtingut a partir de l'estudi paramètric, b) disseny simplificat per facilitar que l'aspiració disposi de més espai

5.4.1.2. Resultats experimentals

En aquest apartat es valida experimentalment el comportament de la pantalla en tant que la distribució de velocitats i de temperatures al llarg del llavi, comparant el disseny original i el nou disseny proposat.

Prototip real

A la fig. 5.82 es presenta el disseny de la fig. 5.81 b una vegada ja construït, així es pot veure de manera més clara el disseny del primer prototip de la part corresponent a la impulsió. Com s'ha comentat abans, s'han soldat unes ales al caixó amb la voluntat d'aconseguir uniformitzar la part corresponent a l'aspiració de la pantalla.



Figura 5.82.: Imatges del model real assajat, amb la simplificació feta segons s'ha dit a la fig. 5.81

Velocitat mesurada a la sortida del llavi de la pantalla



Figura 5.83.: Velocitat experimental mesurada en el llavi per a la pantalla "M4" $\bar{v} = 42,6m/s$ i per el primer prototip $\bar{v} = 42,4m/s$



Figura 5.84.: Velocitat experimental mesurada en el llavi per a la pantalla “M4” $\bar{v} = 51,2m/s$ i per el primer prototip $\bar{v} = 48,1m/s$

A les fig. 5.83 i fig. 5.84 s’han representat els resultats obtinguts per una velocitat mitjana de $40m/s$, i també per a una velocitat de $50m/s$.

En tots dos casos, el nou prototip presenta una distribució de velocitats més plana, per tant més estable, en comparació amb el disseny actual; no obstant, el nou disseny presenta una zona situada just a l’inici de la pantalla, que es correspon a la part més propera al conducte d’impulsió pel qual s’introdueix aire dintre de la pantalla, en què hi ha una caiguda de velocitat situant-se en valors per sota de la pantalla de referència de la “M4” tal i com es pot veure a la fig. 5.85 (cal millorar el comportament d’aquesta zona que segons la gràfica té una longitud aproximada d’uns cinc centímetres per evitar que la banda impresa en aquesta zona pugui presentar un assecatge insuficient). Si es comparen els resultats de la fig. 5.85 corresponent al prototip número 1, amb el comportament de la pantalla “M4” de la fig. 5.24, cal destacar que el nou disseny presenta un soroll o oscil·lació de velocitat entre dos deflectors consecutius d’una menor amplitud, sobretot a la segona meitat de la pantalla, és a dir, entre una longitud de $0,6m$ fins arribar a l’extrem final de la pantalla.

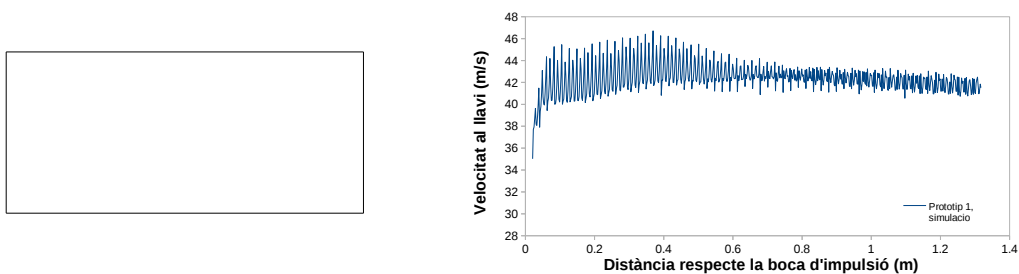


Figura 5.85.: Velocitat al llavi de la pantalla amb el disseny real de la fig. 5.82, valors experimentals i simulats

Tot i que en general la distribució de velocitat que s'ha aconseguit amb la nova proposta és millor (si s'obvien els primers centímetres on ja s'ha comentat que la velocitat és més baixa que en l'actualitat), la pantalla presenta una oscil·lació de velocitats important entre dos deflectors consecutius, sobretot a la primera meitat de la pantalla. A la taula. 5.5 es compara la distribució de velocitats al llavi de les dues pantalles, i es pot concloure que tot i que el nou prototip presenta un comportament pitjor en els primers cinc centímetres de la longitud del llavi de la pantalla envers la "M4", en general presenta una distribució de velocitats més bona que no pas el de la pantalla "M4" ja que la desviació estàndard de la velocitat per a la pantalla prototip és més baixa.



Taula 5.5.: Comparativa de mesures experimentals de la velocitat assolida al llavi, entre la pantalla de referència tipus "M4" i la pantalla prototip 1

Temperatura mesurada a la sortida del llavi de la pantalla

A la fig. 5.86 es mostra el dispositiu experimental que s'ha utilitzat per a la presa de mesures de temperatura en temps continu en diversos punts del llavi, per a una velocitat de sortida de l'aire d'uns $40m/s$, per obtenir la distribució de temperatures de l'aire que surt de bufador una vegada s'ha assolit un estat estacionari de funcionament. El dispositiu de National Instruments $NI - 9214$ permetia mesurar alhora la temperatura en el mateix instant en un total de 16 canals, on a cada canal s'hi havia connectat un termoparell tipus T i cadascun d'aquests s'havia col·locat en la part central de la obertura del llavi de " $a\text{ mm}$ " segons es mostra a la fig. 5.87; els 16 canals estaven distribuïts equitativament al llarg de tot el llavi, essent el canal número 15 el que està més proper a la boca d'impulsió que alimenta el caixó d'impulsió de la pantalla, i el canal 0 el que està a la part més extrema de la pantalla.



Figura 5.86.: Dispositiu experimental per a la mesura de temperatures en el llavi, per a la pantalla “M4”

La ubicació dels termoparells en el llavi, es mostra a la fig. 5.87; tal com es comentava s’han subjectat adequadament de manera que el termoparell quedi situat aproximadament al centre del llavi tot evitant que pugui entrar en contacte amb la part d’alumini que conforma el llavi.



Figura 5.87.: Dispositiu experimental per a la mesura de temperatures en el llavi, per al prototip 1

S’engega la font de calor, que és l’encarregada d’aportar l’energia calorífica necessària per incrementar la temperatura de l’aire que circula per dintre de la pantalla fins a la temperatura de consigna, que s’ha estipulat a T_1 °C que és la temperatura màxima a la que sol treballar l’assecatge entre tinters situat en el cos impressor. Els resultats es mostren a la fig. 5.88.



Figura 5.88.: Mesura de temperatura en temps real, durant 100 segons, en 16 punts del llavi de la pantalla; a l'esquerra per a la pantalla "M4", i a la dreta per el primer prototip

Segons es veu a la fig. 5.88 amb els dos dissenys s'experimenta una distribució de temperatures que no es manté totalment uniforme al llarg de tot el llavi, assolint una major temperatura en els punts més propers al conducte de la boca d'impulsió de la pantalla, i aquesta va disminuint de manera progressiva a mesura que la distància respecte de la boca d'impulsió augmenta. No obstant, tot i que en ambdós casos hi ha un decalatge de temperatura entre els dos extrems, en el cas de la pantalla tipus "M4" hi ha una diferència de ΔT_{M4} °C mentre que al prototip 1 hi ha una diferència de $\Delta T_{prototip1}$ °C, per tant la diferència de temperatures s'ha reduït pràcticament a la meitat. Els resultats es mostren a la fig. 5.89.

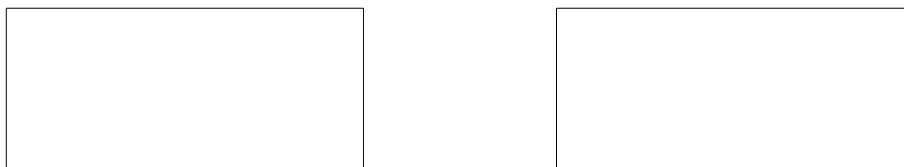


Figura 5.89.: Temperatura mitjana en cadascun dels 16 punts del llavi de la pantalla en els quals s'ha mesurat la temperatura en temps real; a l'esquerra per a la pantalla "M4", i a la dreta per el primer prototip



Taula 5.6.: Comparativa de mesures experimentals de la temperatura assolida al llavi, entre la pantalla de referència tipus “M4” i la pantalla prototip 1

5.4.1.3. Conclusions del primer prototip

Amb aquest primer prototip s’ha aconseguit homogeneïtzar en gran mesura la velocitat i la temperatura en el llavi respecte del disseny original, però es considera que la distribució de velocitats que s’ha mesurat experimentalment, sobretot en la zona compresa en els primers $0,6m$ de la pantalla més propers a la boca d’impulsió de la pantalla, presenten un comportament que cal millorar ja que com s’ha dit abans la distribució de velocitats presenta un cert soroll entre dos deflectors consecutius, i a més a més s’ha produït una caiguda de velocitat important respecte del disseny inicial en els primers centímetres de la pantalla.

Per resoldre totes les mancances que s’han detectat en el primer prototip es proposa redissenyar completament la zona d’impulsió, partint d’un principi de funcionament que sigui totalment diferent a l’actual, ja que la principal limitació és que l’espai disponible dintre de la pantalla no permet modificar de manera considerable el caixó d’impulsió i també el diàmetre del conducte d’entrada que alimenta la pantalla.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

5.4.1.4. Possibles modificacions a realitzar al primer prototip

A la vista que els resultats del primer prototip no han estat del tot satisfactoris, s’han explorat algunes modificacions que poguessin ésser implementades fàcilment al disseny anterior però que finalment han quedat descartades al comprovar que no es produïa una millora notable a la distribució de velocitats a la primera meitat de

la longitud de la pantalla, que és justament on les velocitats presenten valors més allunyats respecte de la mitjana.

Les modificacions que s'han plantejat han estat col·locar algunes xapes dintre de la cambra d'impulsió a mode de deflectors (ja sigui col·locats horitzontalment o bé verticalment) per intentar crear una sobrepressió a la primera meitat de la pantalla i així augmentar les velocitats en aquest tram, però els resultats no han estat satisfactoris, i és per aquest motiu que no es mostren en el present document.

5.4.2. Estudi preliminar per a definir la geometria del nou concepte que s'aplicarà al segon prototip

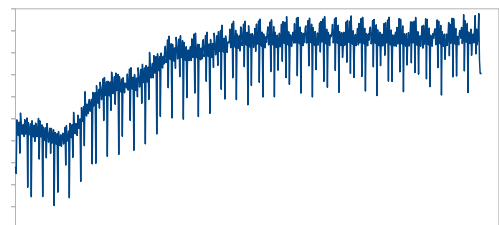
“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

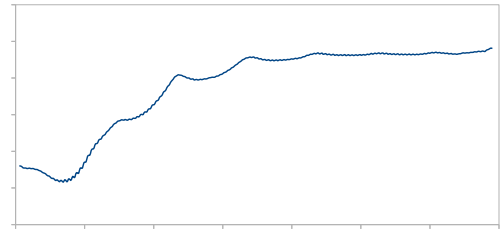
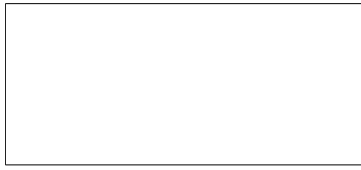
S'han estudiat diverses alternatives consistents en la col·locació de deflectors interns situats en el caixó d'impulsió de la pantalla per intentar crear una obstrucció i per tant proporcionar una sobrepressió just a la zona més propera a la boca d'impulsió de la pantalla que és on es presenten les velocitats més baixes a la sortida del llavi, per intentar així uniformitzar el perfil de velocitats. Tot i que han estat múltiples les opcions estudiades, en totes elles si bé sí que s'aconseguia apujar lleugerament la velocitat en el llavi en aquelles zones on la velocitat de sortida era més baixa, la col·locació del deflector dintre de la pantalla provocava un distorsionament important en les velocitats en el llavi just a la zona on s'havia col·locat el deflector; així doncs es decideix que cal idear una altra configuració per el disseny intern de la impulsió de la pantalla.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

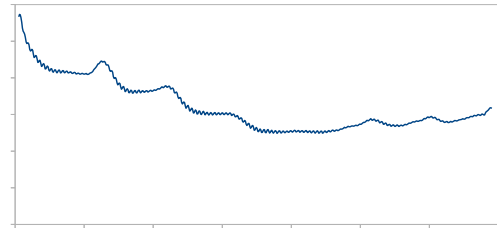
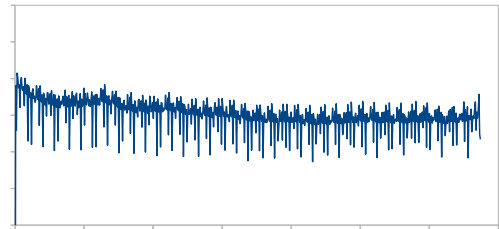
Tot seguit es presenten les geometries descartades que s'han analitzat iterativament fins que s'ha assolit el disseny definitiu que serà la base sobre la qual es treballarà el segon prototip, tot i que cal mencionar que no es presenten absolutament totes les geometries que s'han estudiat, sinó aquelles que es consideren més representatives

“Pàgina deixada intencionadament en blanc”



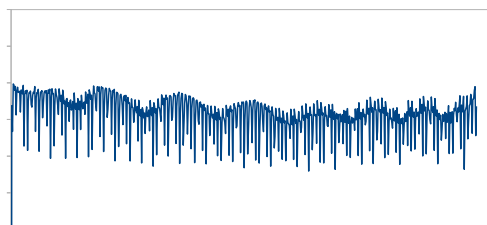


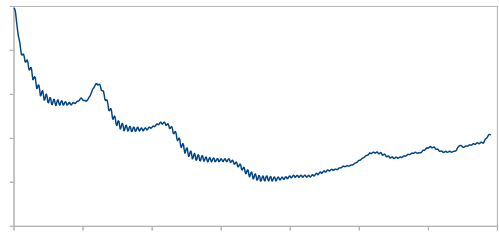
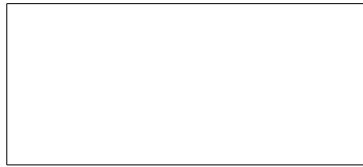
“Pàgina deixada intencionadament en blanc”



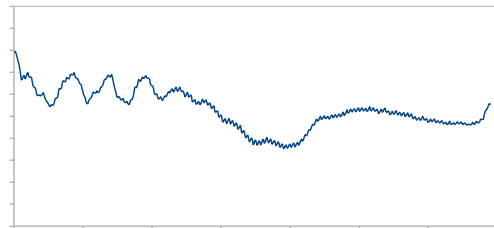
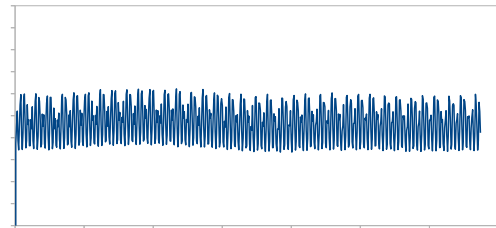
"Pàgina deixada intencionadament en blanc"

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"

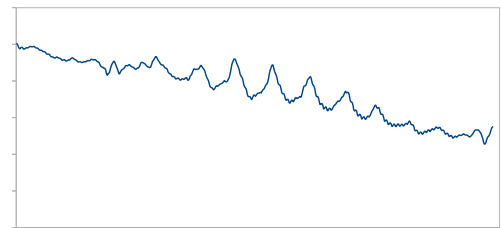
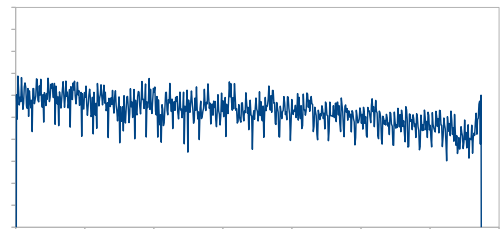
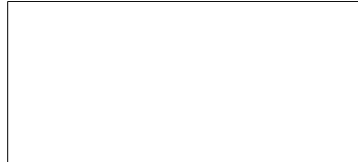




"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



"Pàgina deixada intencionadament en blanc"

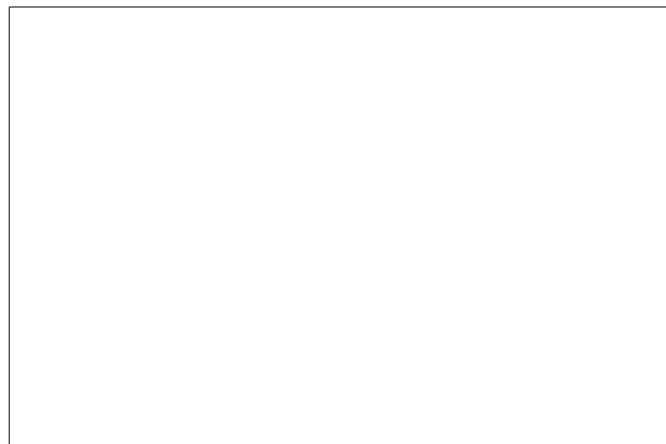


"Pàgina deixada intencionadament en blanc"

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



Pàgina deixada intencionadament en blanc"



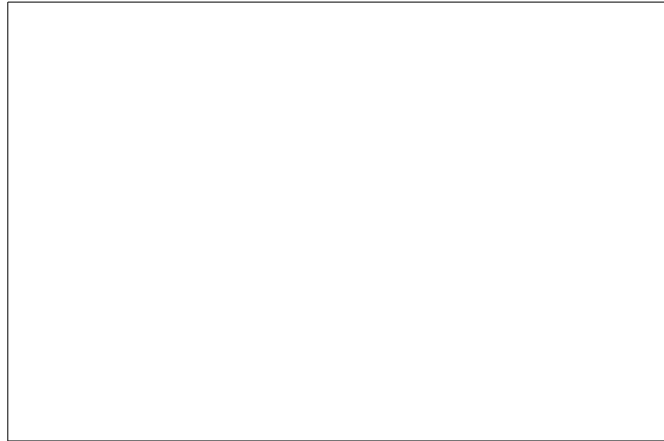


Figura 5.97.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla prototip 2 (primera meitat), amplada $1250mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

Si es comparen els resultats de la fig. 5.97 amb els de la fig. 5.22, es pot veure com el prototip 2 aporta una major estabilitat en la distribució de velocitats en aquesta zona a diferència del que passava amb la “M4”, on l’aire tendia a circular a una major velocitat just quan col·lisionava contra les parets dels defectors; ara aquest efecte ha quedat molt més difuminat.

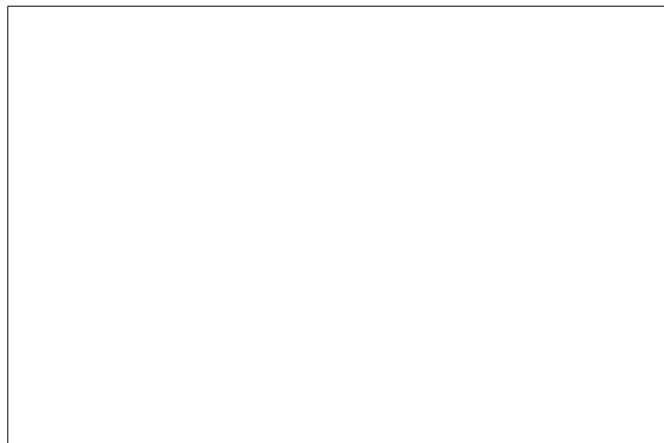


Figura 5.98.: Contorn de velocitats a un tall central longitudinal de la pantalla prototip 2 (segona meitat), amplada $1250mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

La zona final de la pantalla presenta un comportament en quant a velocitats estable, al igual que succeïa amb el disseny de la “M4”.



Figura 5.99.: Línies de corrent per a la pantalla prototip 2, amplada $1250mm$, $\bar{v} = 40m/s$ (simulació OpenFOAM)

5.4.3.2. Resultats experimentals

Velocitat mesurada a la sortida del llavi de la pantalla

Es prenen mesures de velocitat al llavi, en el rang de velocitats comprès entre $30m/s$ i $60m/s$.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Els resultats experimentals a les diverses velocitats al llavi es representen a les fig. 5.100, fig. 5.101 i fig. 5.102.



Figura 5.100.: Velocitat experimental mesurada en el llavi per a la pantalla “M4” $\bar{v} = 40,7m/s$, $StDev = 0,67$ (esquerra) i per el segon prototip $\bar{v} = 40,3m/s$, $StDev = 0,27$ (dreta)



Figura 5.101.: Velocitat experimental mesurada en el llavi per a la pantalla “M4” $\bar{v} = 51,0m/s$, $StDev = 0,53$ (esquerra) i per el segon prototip $\bar{v} = 49,9m/s$, $StDev = 0,19$ (dreta)



Figura 5.102.: Velocitat experimental mesurada en el llavi per el segon prototip $\bar{v} = 30,4m/s$, $StDev = 0,16$ (esquerra) i $\bar{v} = 60,6m/s$, $StDev = 0,28$ (dreta)

A la taula. 5.7 es resumeixen els valors més representatius de velocitat màximes i mínimes assolides en tota la longitud del llavi amb la segona pantalla prototip, i

es comparen amb els valors de la pantalla de referència tipus “M4”. En tots els casos la millora és notable, presentant una millora en l’estabilitat de la velocitat en aproximadament un 85%.



Taula 5.7.: Comparativa de mesures experimentals de la velocitat assolida al llavi, entre la pantalla de referència tipus “M4” i la pantalla prototip 2

Temperatura mesurada a la sortida del llavi de la pantalla

De la mateixa manera que s’ha fet en el primer prototip, es mesura la temperatura a la sortida del llavi de la pantalla per una velocitat experimental de $40m/s$ i $50m/s$. Els resultats obtinguts es presenten a la fig. 5.103, fig. 5.104, fig. 5.105 i fig. 5.106. Els resultats es presenten de manera resumida a la taula. 5.8, i tot comparant amb els resultats del primer prototip (taula. 5.6) cal destacar que el segon prototip presenta una distribució més uniforme en tant que velocitats i temperatures que el primer prototip.



Figura 5.103.: Mesura de temperatura en temps real, durant 100 segons, en 16 punts del llavi de la pantalla; a l’esquerra per a la pantalla “M4”, i a la dreta per el segon prototip, per una velocitat al llavi de $40m/s$



Figura 5.104.: Mesura de temperatura en temps real, durant 100 segons, en 16 punts del llavi de la pantalla per el segon prototip, per una velocitat al llavi de $50m/s$



Figura 5.105.: Temperatura mitjana en cadascun dels 16 punts del llavi de la pantalla en els quals s'ha fet la temperatura en temps real; a l'esquerra per a la pantalla "M4", i a la dreta per el segon prototip, per una velocitat al llavi de $40m/s$



Figura 5.106.: Temperatura mitjana en cadascun dels 16 punts del llavi de la pantalla en els quals s'ha fet la mesura de temperatura en temps real per el segon prototip, per una velocitat al llavi de $50m/s$



Taula 5.8.: Comparativa de mesures experimentals de la temperatura assolida al llavi, entre la pantalla de referència tipus “M4” i la pantalla prototip 2

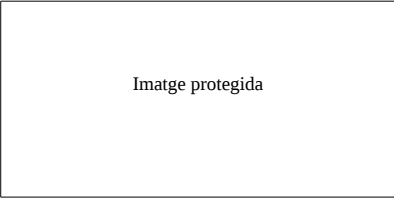
La temperatura al llavi per una velocitat de $50m/s$ resulta ser inferior a la que s’obté per una velocitat de $40m/s$ això es deu a què la font de calor no tenia potència suficient com per fer possible apujar la temperatura de treball del fluid. El nou disseny aporta una diferència de temperatures menor entre els dos extrems de la pantalla, i aquest fet, conjuntament amb el fet de tenir una velocitat més uniforme al llavi afavorirà que l’assecatge sigui més uniforme al llarg de tota la amplada del material. La variació de temperatura entre els dos extrems més allunyats del llavi s’ha reduït a gairebé un 40% del valor que tenia el disseny de referència del qual s’ha partit, tipus “M4”.

5.4.3.3. Conclusions del segon prototip

El disseny que s’ha analitzat compleix amb tots els requeriments imposats com a criteri per a donar com a validada la part d’impulsió de la pantalla, ja que s’ha assolit una bona uniformització de velocitat així com de temperatura a la sortida del llavi. Malgrat s’han acomplert els objectius de millora que s’havien proposat, per fer-ho amb l’espai limitat de la pantalla de què es disposava, ha estat necessari variar de manera substancial el disseny intern de la pantalla, i això ha afectat negativament al sistema en tant que s’ha incrementat la pèrdua de càrrega de la part d’impulsió corresponent a la pantalla.

El proper cas consisteix en dissenyar la part corresponent a la aspiració de la pantalla tot adaptant-la al màxim a les dimensions que vénen imposades per la carcassa externa de tot el conjunt que defineix la pantalla, i que no interfereixi amb la part que s’acaba de validar que correspon al circuit d’impulsió de la pantalla.

Pàgina deixada intencionadament en blanc"



Imatge protegida

A la fig. 5.107 es mostra un esquema de funcionament molt simplificat de les diverses tipologies de pantalles, segons la classificació que s'acaba de comentar:

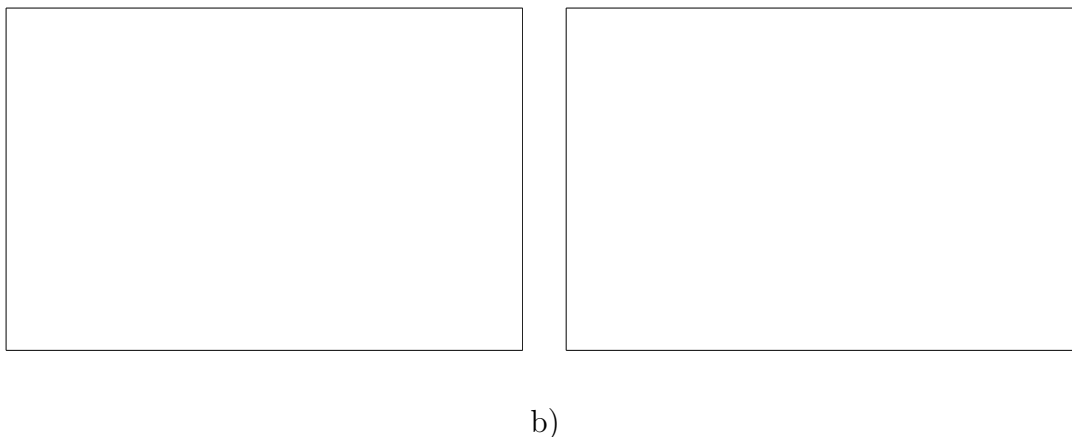


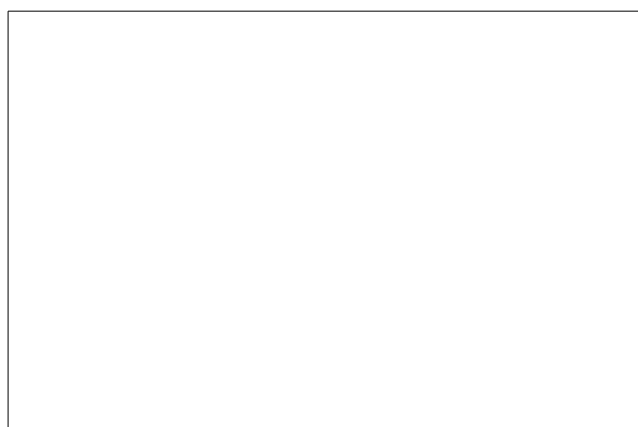
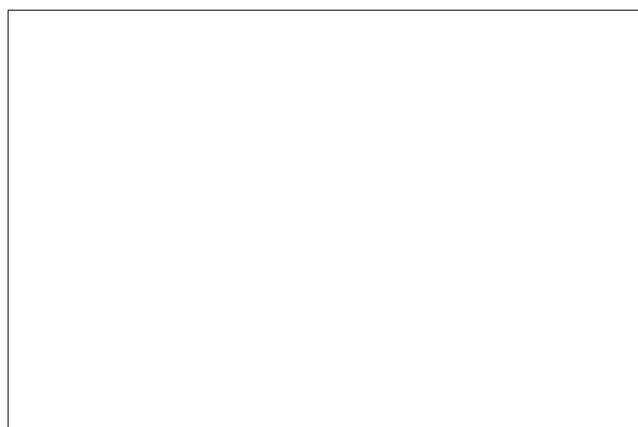
Figura 5.107.: Representació esquemàtica del recorregut de l'aire en una pantalla d'assecatge entre tinters (impulsió i aspiració). a) pantalles tipus “M2”, “M3”, “M5”, “M6”, b) pantalla tipus “M4”

A la fig. 5.107 es mostren els dos principis de funcionament en els quals es basen els dissenys de pantalla que es fabriquen actualment. El disseny de l'esquerra té pitjors prestacions en tant que a balanç de la pantalla, entès com a la quantitat d'aire que cal aspirar (de color taronja a la figura) per recollir l'aire que s'ha impulsat per a l'assecatge (de color vermell). Cal apuntar que hi ha una certa quantitat d'aire, anomenat aire fals (de color blau), provinent de l'exterior de la pantalla que també és inevitable que s'aspiri per l'espai de separació que queda entre la pantalla i el tambor central de la impressora.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Una possible millora al disseny de la fig. 5.107 a, podria ésser la instal·lació d'aquestes ales al caixó d'impulsió però de manera que no fossin de secció uniforme al llarg de tota la llargada de la pantalla; es proposa augmentar la secció de pas d'aire que queda disponible entre la carcassa exterior de la pantalla i la part més extrema de l'ala, a mesura que s'augmenta la distància respecte de la boca d'aspiració de la pantalla, i d'aquesta manera intentar garantir una succió més uniforme al llarg de tot l'obturador longitudinal. De fet, aquesta proposta de millora ja estava prevista aplicar-la en el primer prototip que s'ha fabricat de la part corresponent a la impulsió, segons es veu a la fig. 5.82. Finalment la implementació d'aquesta idea es

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



5.5.1.2. Pantalla tipus màquina “M3”

Dimensions més representatives de la pantalla:

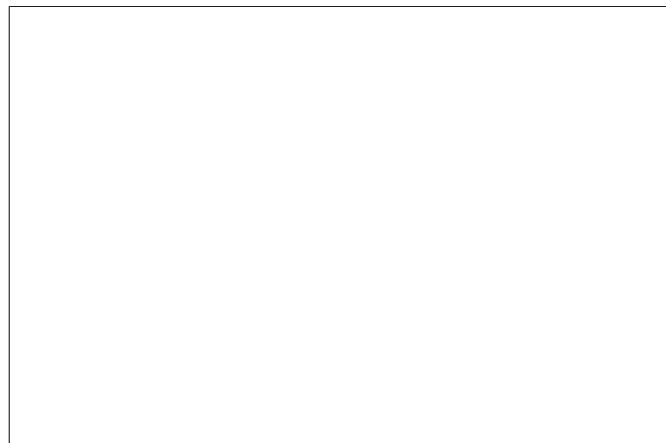
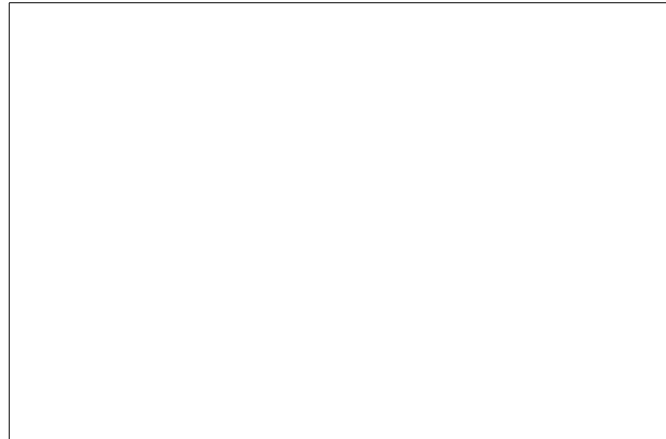


Figura 5.109.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d'aspiració d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M3”)

5.5.1.3. Pantalla tipus màquina "M4"

Dimensions més representatives de la pantalla:

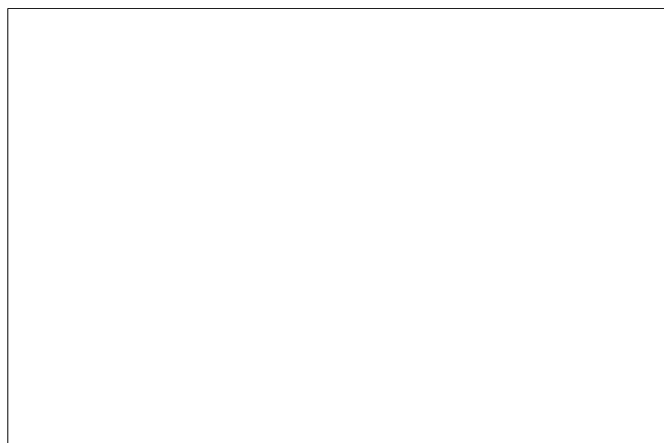
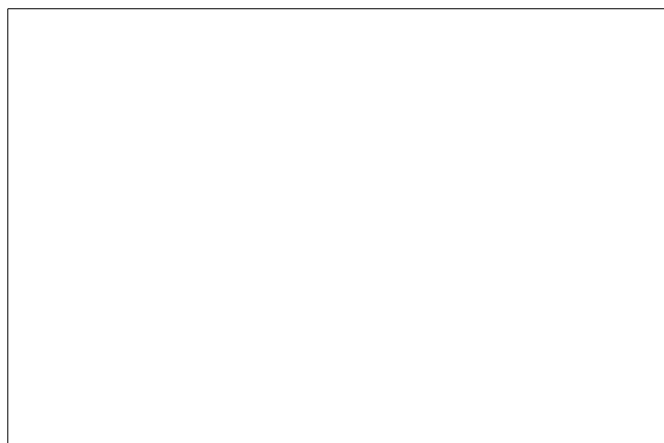


Figura 5.110.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d'aspiració d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M4")

5.5.1.4. Pantalla tipus màquina “M5”

Dimensions més representatives de la pantalla:

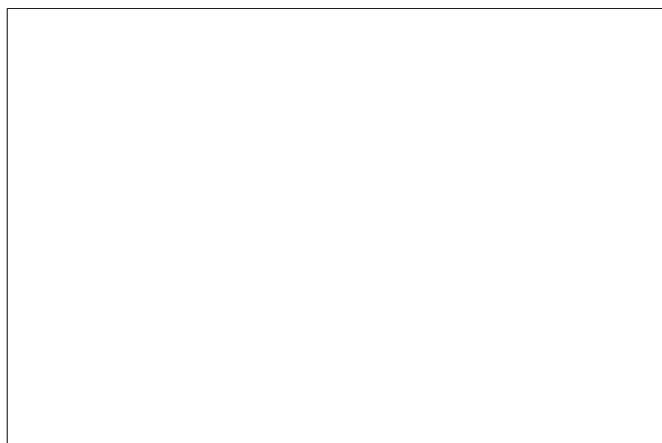
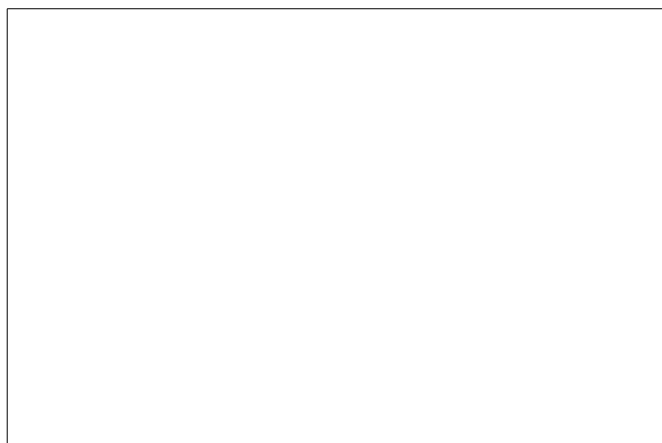


Figura 5.111.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d'aspiració d'una pantalla d'assecatge entre tinters (“M5”)

5.5.1.5. Pantalla tipus màquina "M6"

Dimensions més representatives de la pantalla:

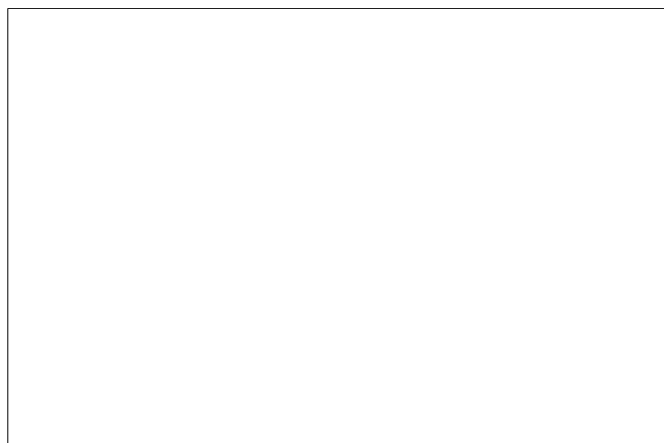
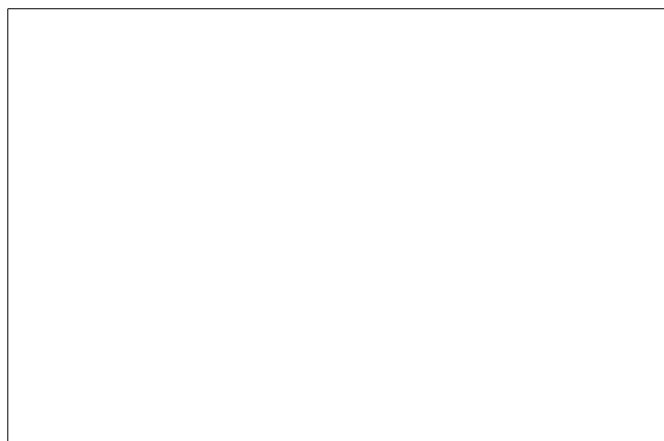


Figura 5.112.: Dimensions més representatives de la part corresponent a la zona d'aspiració d'una pantalla d'assecatge entre tinters ("M6")

5.5.2. Estudi del comportament d'una pantalla simètrica tipus "M4"

La pantalla tipus "M4", a diferència de les altres màquines que fabrica Comexi, presenta la particularitat que la part corresponent a l'aspiració de la pantalla té una cambra d'aspiració independent de la impulsió, a través del qual s'aspira l'aire que s'ha utilitzat per assecar la tinta que s'ha estat imprimint en l'etapa anterior a la pantalla.

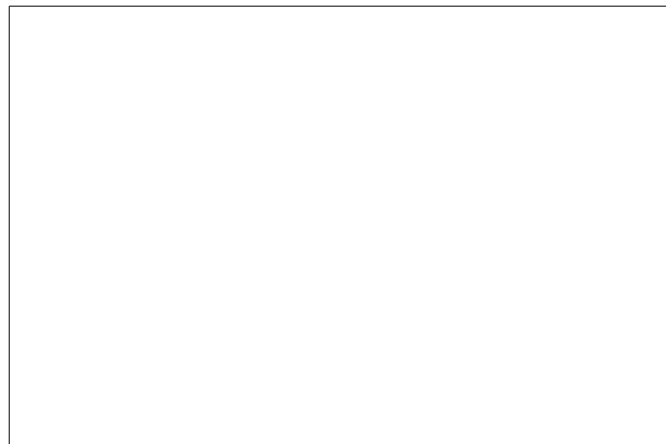


Figura 5.113.: Modelat tridimensional d'una pantalla "M4" simètrica i completa, d'amplada 1250mm



Figura 5.114.: Vista en alçat de la pantalla "M4" simètrica

A la fig. 5.114 es diferencia la part corresponent a la impulsió de la pantalla representada per la fletxa de color vermell, de la part destinada a l'aspiració representada per la fletxa de color taronja.

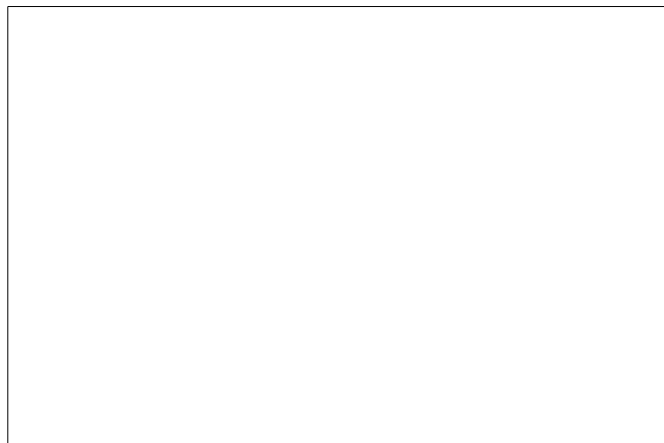


Figura 5.115.: Vista de perfil de la pantalla “M4” simètrica

A la fig. 5.115 es presenta la vista de la pantalla del cos impressor, vista des del lateral per on s'efectuen les connexions de la pantalla amb les corresponents boques d'impulsió i d'aspiració que aporten i extreuen l'aire de la pantalla, respectivament. S'ha marcat de color vermell a la fig. 5.115, l'esclatxa de pas o ranura que queda lliure i a través de la qual pot entrar aire de l'exterior (aire ambient - aire fals) cap a dintre de la pantalla, o bé l'aire que s'ha impulsat a través del llavi i ha impactat contra el tambor es pot escapar de la pantalla cap a l'ambient. Per tal de que la pantalla funcioni de manera correcta és necessari que la direcció de l'aire ambient sigui el que s'ha marcat amb les fletxes de color vermell; això vol dir que no s'escapa aire carregat de solvent provinent de l'assecatge del substrat que s'està imprimint, cap a l'exterior de la pantalla amb els riscos que això podria comportar. Quant menor sigui la quantitat d'aire que entri a través d'aquestes ranures longitudinals que queden entre la pantalla i el tambor, sense que en cap punt de l'obturador longitudinal s'escapi aire, serà avantatjós per la màquina ja que aquesta haurà de moure un menor volum d'aire en el circuit d'extracció (RTO de menor volum), i degut a això aquest aire restarà més concentrat amb solvent cosa que afavorirà que l'incinerador pugui arribar més fàcilment en les condicions de “autotherm”.

5.5.2.1. Estudi del comportament de la pantalla “M4” a través de simulació amb OpenFOAM

Un primer pas per a la millora del comportament de la pantalla, passa per caracteritzar de manera més acurada possible el comportament de la pantalla de referència de la qual es parteix i així poder determinar aquells punts on el comportament no és l'esperat i centrar esforços per tal de millorar el disseny just en aquells punts on s'han detectat debilitats en el disseny.

Es porten a terme diverses simulacions on s'analitza conjuntament el comportament de la pantalla quan actua alhora la part corresponent a la impulsió així com l'aspiració de la pantalla; per fer-ho es comença imposant un cabal volumètric fix en el conducte d'entrada que alimenta el caixó d'impulsió de la pantalla, de manera que aquest cabal es correspongui amb una velocitat mitjana teòrica al llavi de “ $V_1 m/s$ ”, que es correspon amb la velocitat de disseny fixada segons els estàndards establerts per Comexi. Es realitzen diverses simulacions on el que es planteja és variar el cabal d'aspiració del sistema, partint d'un cabal d'aspiració de la pantalla exactament igual al que s'impulsa, i anar-lo augmentant de manera progressiva fins arribar al punt en què no s'escapi gens d'aire en cap punt al llarg de tot l'obturador longitudinal de la pantalla; és a dir, s'augmenta el cabal d'extracció de la pantalla fins que el sentit del flux d'aire a través de l'obturador longitudinal és el que es visualitza a la fig. 5.115. Es fan diverses iteracions, augmentant progressivament el cabal en cadascuna d'elles en un 25%. Per reduir temps de càlcul amb la simulació, i com que la pantalla objecte d'estudi és totalment simètrica, es decideix aplicar la condició de simetria en un pla vertical longitudinal aplicat just a la part central de la pantalla. Per el conjunt de simulacions que s'ha realitzat, la separació vertical entre la base del llavi de la pantalla i el tambor és de “ $b mm$ ” i la separació entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor és de “ $e mm$ ”.

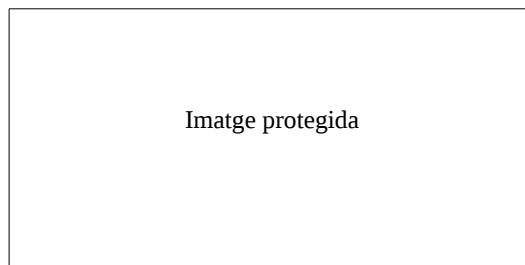


Figura 5.116.: Talls en les tres direccions dels eixos de coordenades, per visualitzar el comportament del fluid en una pantalla simètrica tipus “M4” (balanç 50%)

A la fig. 5.116 es representa el contorn de velocitat en 3 plans ortogonals entre ells, per visualitzar el comportament del flux d'aire dintre el conjunt de la pantalla, on s'aprecia una zona on hi ha un comportament irregular en què apareix un remolí i que afecta molt negativa el balanç de la pantalla, ja que per què la zona d'aspiració pugui vèncer l'efecte d'aquest remolí implica haver d'assolir un cabal d'aspiració molt més elevat del que seria l'ideal; aquesta pertorbació en el comportament del fluid es representa amb més detall a la fig. 5.118, en les zones encerclades en vermell. Més endavant es plantegen diverses opcions per intentar vèncer l'anomalia que es produeix en aquesta regió.

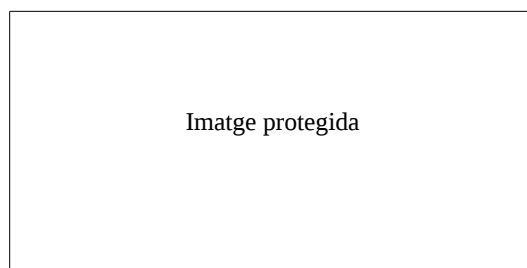


Figura 5.117.: Talls en les tres direccions dels eixos de coordenades, per visualitzar la pressió que experimenta el fluid en una pantalla simètrica tipus “M4” (balanç 50%)

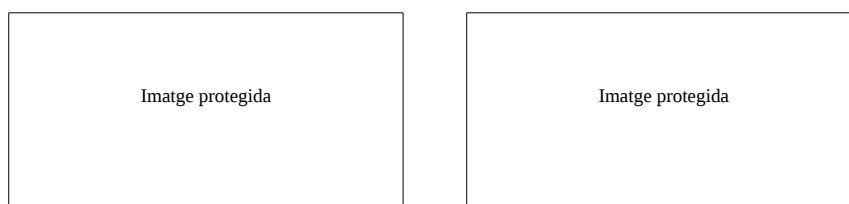


Figura 5.118.: Visualització del contorn de velocitats a un pla horitzontal, paral·lel a la base del llavi d'alumini de la pantalla, segons la línia de color blau de la figura (balanç 50%)

A la fig. 5.118 es representa de manera més detallada la zona que presenta un comportament que cal millorar, i que es troba ubicada en els dos punts més extrems de l'obturador longitudinal situat entre la pantalla i el tambor central. Aquesta figura mostra la vista en planta del tall que s'ha realitzat segons la línia de color blau, i on s'aprecia clarament que l'aire una vegada ha sortit del llavi d'alumini i impacta contra el tambor de la màquina, pren una certa curvatura i això provoca un remolí en aquesta zona, que afecta el balanç de la pantalla.

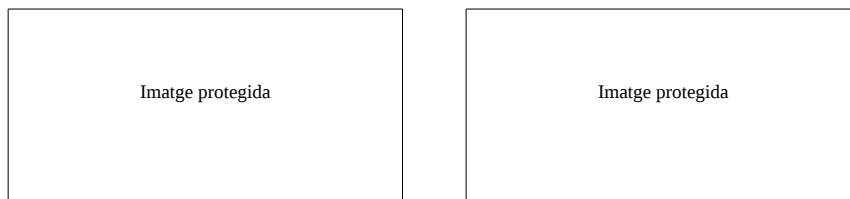


Figura 5.119.: Velocitat de l'aire a l'espai comprès entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor, corresponent al punt blau marcat a la figura (diversos balanços). Separació entre llavi i tambor de " $b \text{ mm}$ " i entre obturador longitudinal i tambor de " $e \text{ mm}$ "

La fig. 5.119 representa la velocitat que assolix l'aire que circula entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor de la màquina, i que es correspon amb la component horitzontal de velocitat de l'aire al llarg de tota la longitud de l'obturador i que estaria col·locada al punt de color blau que s'ha marcat a la figura de la dreta. Els valors que apareixen a la gràfica i de signe negatiu es corresponen a aquells punts on l'aire que s'ha vehiculat a la impulsió s'escapa cap a l'exterior de la pantalla, i que per tant es tracta d'aire amb contingut de solvent que la part corresponent a l'aspiració de la pantalla no és capaç de recollir.

El balanç extret segons les simulacions i que permetria aspirar tot l'aire que s'impulsa sense que s'escapi cap a l'exterior de la pantalla estaria comprès entre un " $B_1 \%$ " i un " $B_2 \%$ "; més endavant es compararan els resultats obtinguts experimentalment amb els resultats obtinguts via simulació.

De la gràfica de la fig. 5.119 es desprèn que a mesura que el balanç de la pantalla augmenta, tal i com es lògic, l'aire té una menor tendència a escapar cap a l'exterior de la pantalla.

També és important notar que a mesura que el balanç augmenta, el remolí situat a la zona més propera de la boca d'aspiració de la pantalla disminueix de manera més ràpida que no pas el remolí que queda més allunyat de la boca d'impulsió. Si es

va augmentant el balanç, s'arriba a un punt d'equilibri on desapareix el rebuï, però malauradament això succeeix per cabals d'aspiració molt alts, i per tant balanços també molt alts.

5.5.2.2. Estudi del comportament de la pantalla "M4" a través de mesures experimentals al banc de proves

Aquest banc de proves de què disposa Comexi està situat al Research Center, i consisteix en dos ventiladors, un dels quals es destina al circuit d'impulsió, i l'altre al circuit d'aspiració. Cadascun dels ventiladors té associat el seu propi variador de freqüència de manera que es pot regular a voluntat el règim de gir del ventilador, i per tant variar el cabal que és capaç de vehicular el ventilador segons es desitja. El muntatge disposa a més a més d'una planxa cilíndrica que simula la forma d'un tambor d'una impressora flexogràfica amb un diàmetre de " $\varnothing_7 \text{ mm}$ ", així com d'una estructura a la qual es subjecta la pantalla amb uns punts de pivot que permeten orientar la pantalla de manera que l'aire que surt del llavi de la pantalla incideixi de manera perpendicular contra la xapa corbada que actua simulant el tambor. La disposició en què es col·loca la pantalla respecte de la xapa plegada guarda la mateixa relació que tindria la pantalla en una màquina real; és a dir, la distància vertical de separació entre el tambor i el llavi d'alumini està fixada en " $b \text{ mm}$ ", i el pas lliure o obertura que queda entre la làmina de material plàstic que actua com a obturador longitudinal i el tambor central està estipulat també en " $b \text{ mm}$ ".

Per a la realització de l'assaig el primer que es fa és mesurar la velocitat al llavi de la pantalla per diverses freqüències; s'augmenta la freqüència del ventilador d'impulsió fins que s'assoleix una velocitat mitjana en el llavi de " $V_1 \text{ m/s}$ " (aquesta velocitat mitjana es mesura amb un tub de Pitot al llarg de tot el recorregut del llavi). Una vegada es té la velocitat desitjada es connecta el ventilador d'aspiració i es va augmentant la freqüència tot mesurant per a cadascuna de les freqüències la velocitat de l'aire a la regió corresponent a la línia vermella de la fig. 5.120, fins que al llarg de tota aquesta línia l'aire entra dintre de la pantalla.

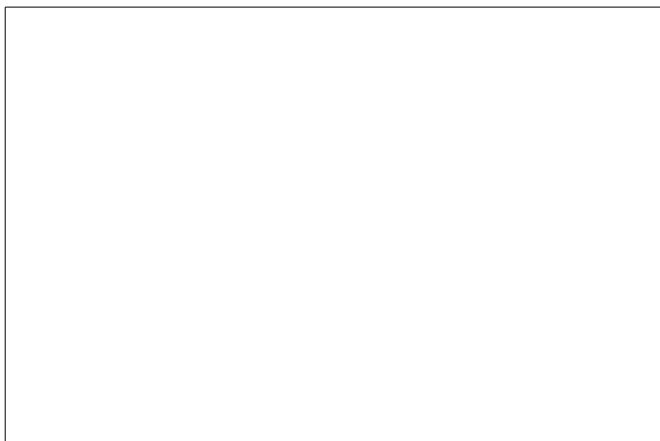


Figura 5.120.: Dispositiu experimental per a la determinació del balanç de la pantalla (vista general)

La línia de color vermell de la fig. 5.120 es correspon amb l'escletxa de “ bmm ” de separació que queda entre l'obturador longitudinal i el tambor, i es tracta de la zona on es realitzaran les mesures mitjançant un tub de Pitot (la mesura no és del tot correcta ja que el punt on mesura la pressió estàtica el tub de Pitot no és el mateix punt on mesura la pressió dinàmica). Tot i que la mesura no es pugui portar a terme en les condicions ideals, la pressió que llegeix el Pitot sí que serà útil per saber si l'aire entra cap a la pantalla o si bé surt de la pantalla a través de l'escletxa.

Pel que fa a la mesura de cabals al circuit d'impulsió i d'aspiració, es col·loquen uns tubs de xapa plegada de diàmetre conegut i es connecten aquests a les dues boques de la pantalla; la mesura de cabal s'efectua en aquests conductes.



Figura 5.121.: Dispositiu experimental per a la determinació del balanç de la pantalla (detall de les zones més extremes de la pantalla)

La línia vermella de la fig. 5.120 s'ha dividit en un total de 30 porcions, però degut als resultats de distribució de velocitats que s'ha obtingut a la fig. 5.118 es decideix prendre una major densitat de mesures en aquelles zones on es produeix el rebuf de la pantalla; és a dir, en les parts més extremes de l'obturador.

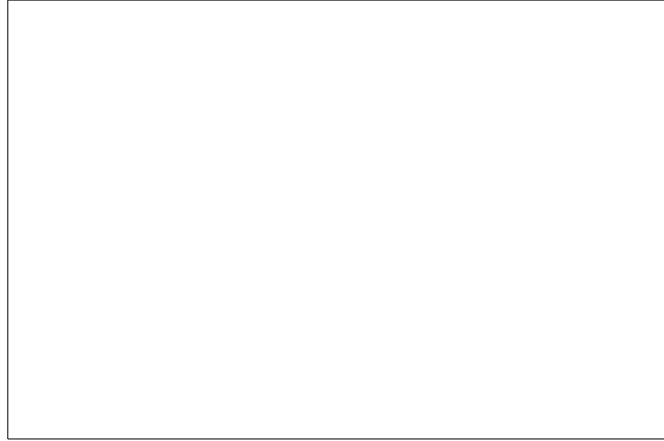


Figura 5.122.: Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " $b mm$ "; separació tambor - obturador, " $e mm$ " (pantalla "M4")

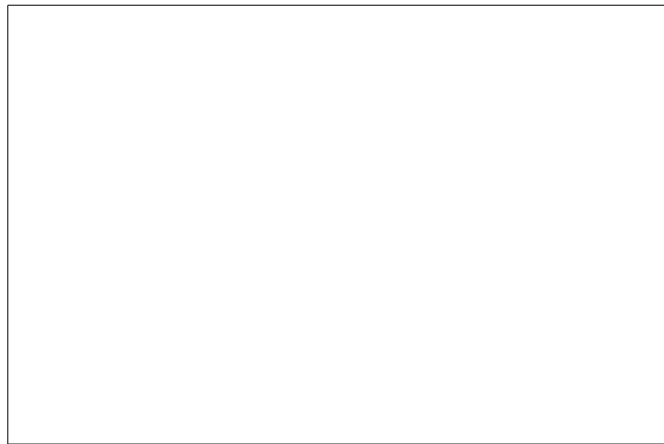


Figura 5.123.: Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " $b mm$ "; separació tambor - obturador, " $u mm$ " (pantalla "M4")

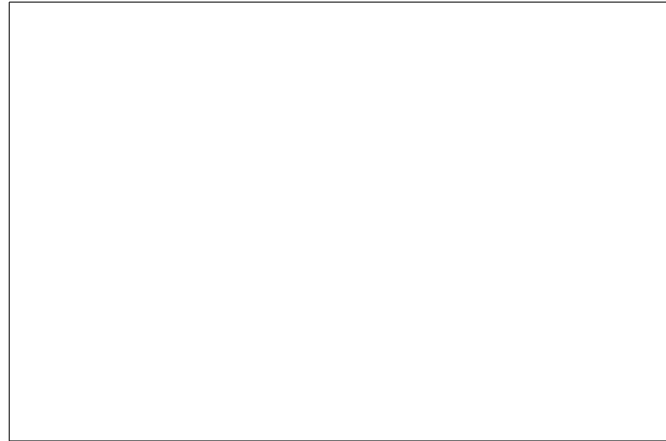


Figura 5.124.: Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " $b mm$ "; separació tambor - obturador, " $o mm$ " (pantalla "M4")



Taula 5.10.: Balanços experimentals de la pantalla "M4" per a diverses distàncies de separació entre l'obturador longitudinal i el tambor

Si es comparen els resultats experimentals de la fig. 5.122 amb els resultats obtinguts mitjançant simulació de la fig. 5.119 es pot veure com hi ha una bona correspondència de resultats entre ells. En tots dos casos apareixen dues zones crítiques que destaquen clarament i que estan situades pràcticament al límit dels extrems de l'obturador longitudinal; aquestes zones, que s'ha pogut demostrar que realment es comporten d'aquesta manera mitjançant les mesures experimentals que s'han fet en el banc de proves, es deuen al remolí que es posava de manifest a les simulacions que s'han fet segons es veia a les fig. 5.116 i fig. 5.118.

A mesura que s'augmenta el balanç de la pantalla, és a dir la quantitat d'aire que s'aspira de més respecte de la quantitat d'aire que s'impulsa a través del llavi, el remolí que està situat més proper a la boca d'aspiració de la pantalla és el que té tendència a desaparèixer en primer lloc; el fet de voler fer desaparèixer el segon remolí, implica que cal apujar molt el balanç de la pantalla, ja que aquest segon remolí es produeix just a la zona més allunyada de la boca d'aspiració de la pantalla, que és justament aquella ubicació on la pressió estàtica dintre de la cambra d'aspiració és més alta ja que la depressió provocada per el ventilador d'aspiració ha quedat molt difuminada al trobar-se tan lluny de la boca d'aspiració de la pantalla.

Dels resum de resultats que es mostren a la taula. 5.10, cal notar que el balanç de la pantalla és extremadament sensible a l'espai lliure de pas que resta entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor central d'impressió.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Una vegada vist el bon ajustament entre els resultats obtinguts es pot donar com a vàlid el modelat que s'ha fet mitjançant simulació i s'empra el mateix modelat per a l'estudi d'alternatives de noves geometries.

5.5.2.3. Estudi d'alternatives per evitar el remolí que es produeix una vegada l'aire que surt del bufador ha impactat contra el tambor de la màquina

Segons es desprèn de les mesures experimentals que s'han efectuat a la pantalla tipus “M4”, i que es resumeixen a la fig. 5.122, fig. 5.123 i fig. 5.124, el comportament de la part corresponent a l'aspiració de la pantalla en la zona de l'obturador longitudinal és molt diferent segons si es centra l'atenció en la part central de la pantalla o bé a la part corresponent als extrems de la pantalla.

A la fig. 5.119 es veu com la distribució de velocitats a la zona central de l'obturador es manté molt uniforme en tota la longitud de la pantalla a excepció dels dos extrems de la pantalla que és la zona on apareix el remolí que es genera degut al xoc de l'aire que surt del llavi de la pantalla i incideix contra el tambor central de la màquina. Aquest remolí genera unes turbulències en aquestes zones i fa que el disseny de l'aspiració de la pantalla perdi part de la seva efectivitat i faci falta augmentar el cabal d'aspiració com per vèncer aquesta pertorbació en el flux de l'aire.

Abans de passar a dissenyar la part corresponent a l'aspiració de la pantalla és necessari comprendre quines són les causes que produeixen aquest remolí, per així poder evitar que es formi i d'aquesta manera es podrà millorar el balanç de la pantalla.

Malgrat que en aquest apartat encara no és objecte d'estudi el disseny com a tal o

optimització de la zona d'aspiració de la pantalla (només es desitja determinar les causes de l'origen del remolí que s'acaba de citar), el que sí que es fa és anar tantejant diverses opcions possibles de disseny de la zona corresponent a l'aspiració al mateix temps que s'analitza el rebuf, per avançar més ràpidament i disminuir el nombre total de simulacions que sigui necessari portar a terme per redissenyar la pantalla. Una vegada solucionat el tema del rebuf es farà l'anàlisi de la part corresponent a l'aspiració de la pantalla.

a) Geometria número 1

Les característiques de la geometria assajada es llisten a continuació:

L'envolupant exterior de la pantalla es correspon a una pantalla tipus "M4", simètrica, i d'amplada $1250mm$. El llavi assajat és el que per defecte es munta en una pantalla tipus "M4".

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"

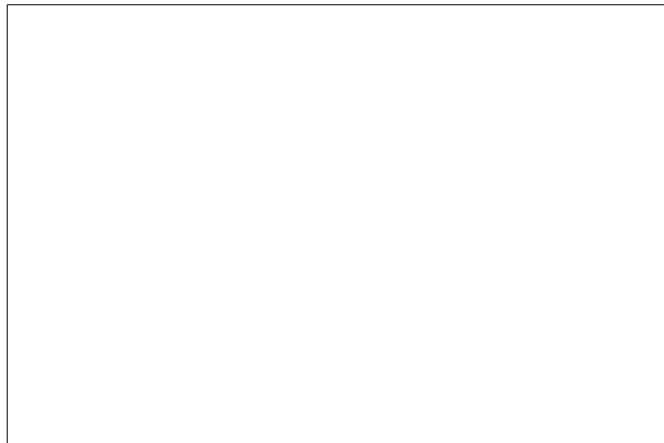


Figura 5.125.: Llavi pantalla "M4"

La part corresponent a l'aspiració de la pantalla es fa amb el mateix principi de funcionament que s'aplica a l'actualitat a les pantalles tipus "M4".

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"

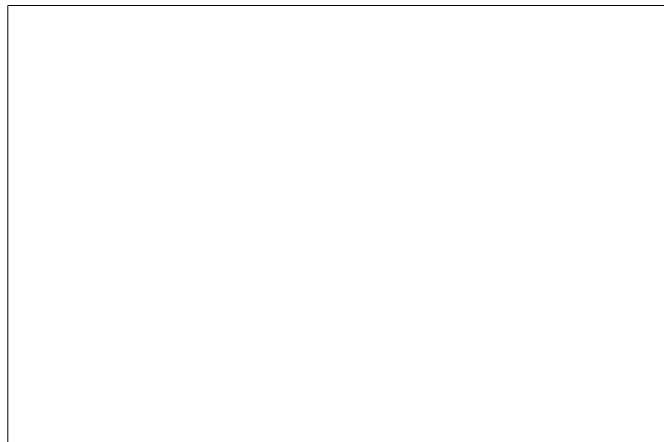


Figura 5.126.: Vista tridimensional del model assajat

La fig. 5.126 mostra el modelat tridimensional d'una pantalla sencera amb el cos d'impulsió segons la geometria desenvolupada en el prototip 2 i un cos d'aspiració provisional que permeti fer una primera aproximació del comportament de la pantalla.

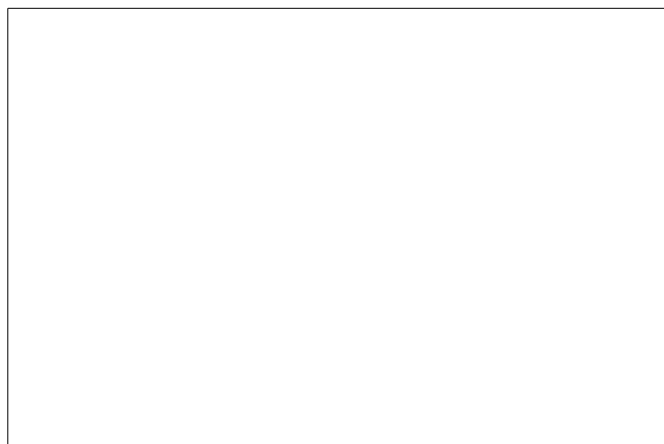


Figura 5.127.: Mostra dels vectors de velocitat en un tall transversal de la pantalla, on es pot visualitzar el recorregut de l'aire dintre les diverses cambres de la pantalla

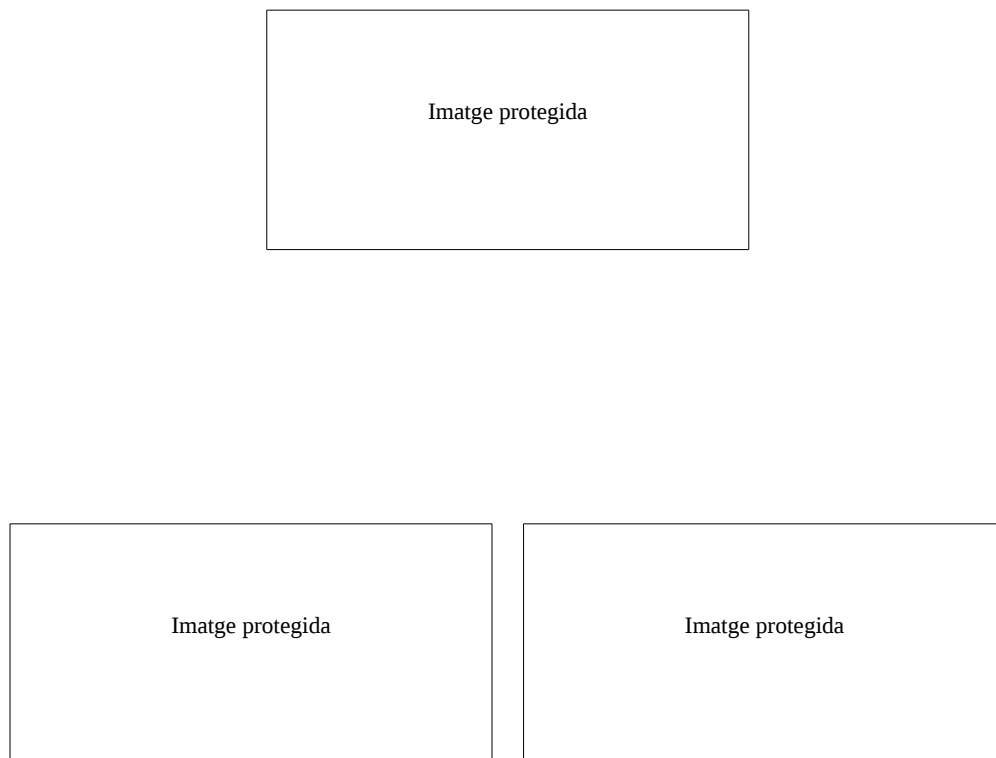


Figura 5.128.: Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)

Pel que fa al desenvolupament del flux d'aire just després de que aquest hagi estat expulsat a través del llavi de la pantalla, no s'aprecien diferències notables de comportament segons si s'implementa el nou caixó d'impulsió o bé l'antic. Amb el disseny nou encara es produeix el mateix remolí que es generava amb la pantalla "M4" als dos extrems del llavi. El flux de l'extrem del llavi, després d'impactar contra el tambor tendeix a definir un traçat amb una certa curvatura, que origina el rebuf aigües avall en la zona de l'obturador longitudinal. En les simulacions que

segueixen es vol esbrinar si és possible reordenar aquest flux d'aire una vegada ha abandonat el llavi de la pantalla mitjançant alguna xapa o deflector que s'introdueixi dintre de la geometria, o si bé per contra cal actuar sobre el disseny del propi llavi.

b) Geometria número 2

Segons s'ha comprovat en la simulació anterior, en la qual s'ha fet l'anàlisi de la pantalla sencera (cos d'impulsió i cos d'aspiració), el temps de càlcul per a l'anàlisi de tota la pantalla comporta un cost computacional elevat i per tant un temps de càlcul associat a la simulació que ha resultat ser molt elevat. Per fer el procés més àgil es planteja eliminar part del recorregut de l'aire per el circuit d'impulsió de la pantalla, i que la part corresponent a la impulsió consisteixi únicament en el llavi de la pantalla tot imposant-li la velocitat de sortida desitjada dels " $V_1 m/s$ ". Amb aquesta simplificació s'elimina gran part del mallat del cas, i per tant es disminueix el temps necessari per a la resolució de la simulació.

També s'havia plantejat la possibilitat d'aplicar la condició de simetria tal i com s'ha fet amb anterioritat en l'anàlisi de la pantalla "M4" segons s'ha vist a la fig. 5.116, però s'ha descartat perquè els residuals de la simulació tendien a no convergir i després de diversos intents s'ha decidit avançar assajant la geometria sencera.

El disseny que es planteja en aquest apartat consisteix en inserir uns deflectors en l'espai que queda comprès entre la carcassa exterior de la pantalla i el caixó d'impulsió i d'aspiració de la pantalla, amb l'objectiu que aquests deflectors provoquin un canvi en la direcció del fluid i induir una circulació d'aquest aire de manera que ja tingui tendència a dirigir-se cap a la cambra d'aspiració.

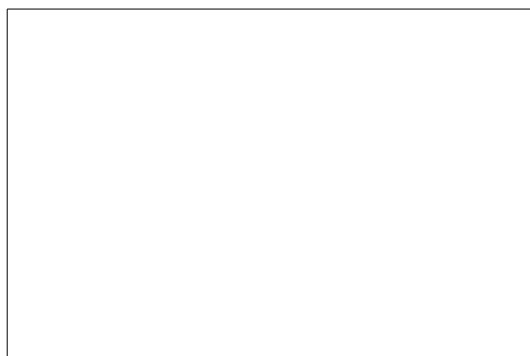


Figura 5.129.: Vista tridimensional del model assajat

La fig. 5.129 es correspon a la versió simplificada de la pantalla en la que s'ha eliminat la part corresponent a la impulsió, i s'imposa directament una velocitat al llavi igual a la desitjada.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

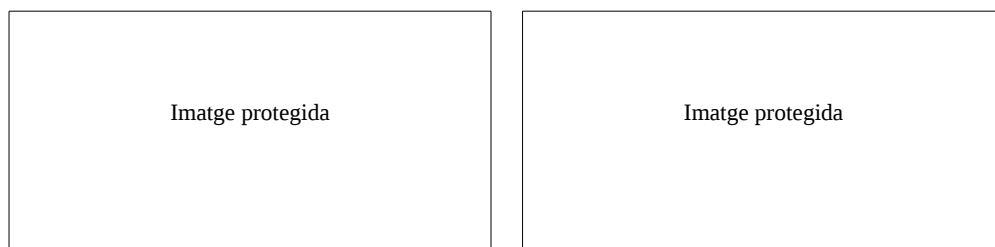
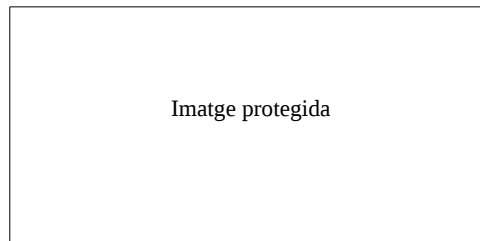


Figura 5.130.: Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)

El fet d'haver introduït la xapa arrodonida no ha suposat una millora respecte de la geometria número 1 que s'acaba d'estudiar. Al igual que en el cas anterior, l'aire té molta tendència a quedar adherit a la superfície arrodonida que simula la forma del tambor, i perquè l'aire quedés realment afectat i notés un canvi de direcció degut

a l'efecte d'aquests deflectors caldria apropar-los molt més al tambor, cosa que és desaconsellable per el perill de que aquests deflectors puguin entrar en contacte amb el tambor (a la figura anterior estan separats una distància de “*u mm*” respecte del tambor).

b) Geometria número 3

Es proposa de manera similar a la geometria número 2 instal·lar unes altres xapes arrodonides, però aquesta vegada de diàmetre major que en el cas anterior i que estiguin col·locades just després de quan s'acaba el passamà d'alumini que fa les funcions de llavi.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

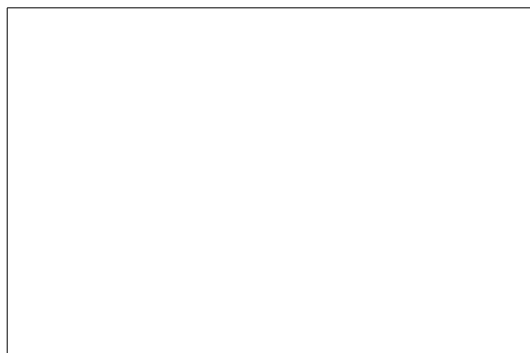


Figura 5.131.: Vista tridimensional del model assajat

La intenció d'aquests deflectors és que l'aire quan deixa d'estar en contacte amb l'espai que queda entre el tambor i el llavi, quan trobi aquests deflectors tingui una tendència a adherir-si i per tant indueixi un canvi de direcció al fluid tot desviant-lo cap a la part de l'aspiració de la pantalla.

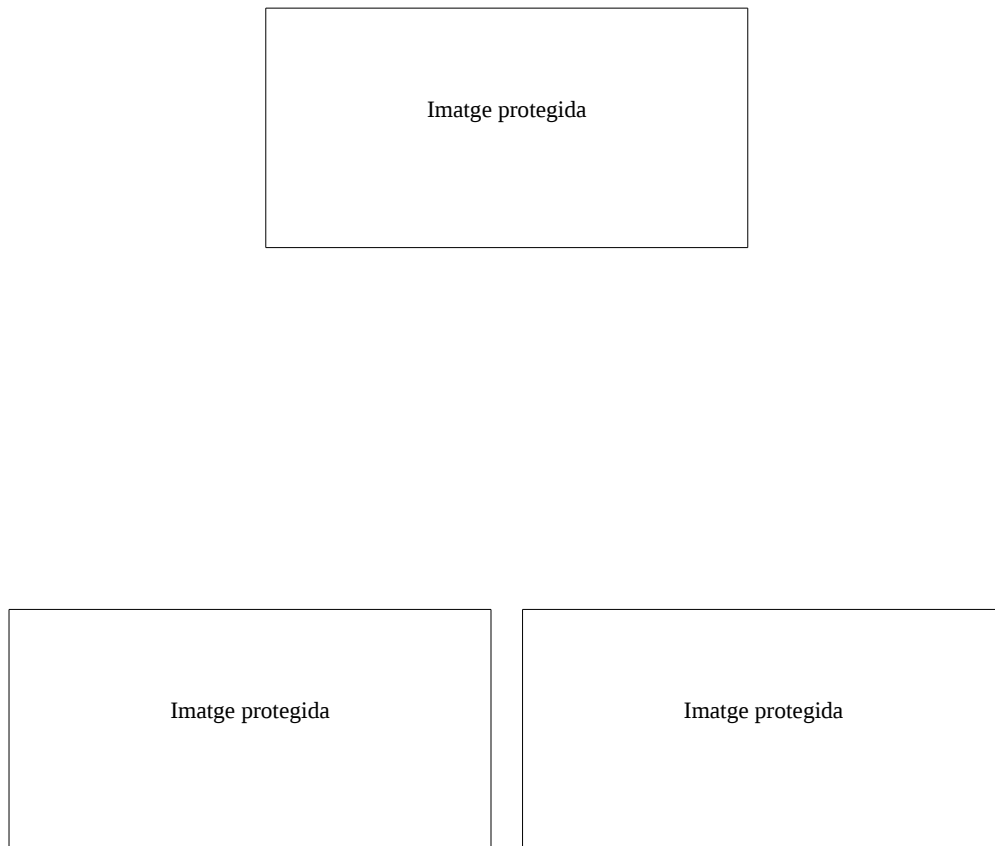


Figura 5.132.: Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)

La col·locació dels deflectors no té cap efecte en la zona que es pretén millorar, ja que la turbulència continua produint-se de manera semblant que en els altres casos.

b) Geometria número 4

En les simulacions anterior s'ha vist com la introducció de deflectors no tenia efecte en la direccionalitat de l'aire que cal reordenar per evitar el remolí. En aquest apartat es proposa estudiar l'efecte d'introduir una xapa perforada en l'espai que queda entre el caixó d'impulsió i la carcassa exterior de la pantalla. A aquesta xapa s'hi practiquen uns orificis més grans just en aquella zona on es desitja eliminar la pertorbació; es pretén que en aquesta zona on hi haurà un orifici de majors dimensions provoqui una pèrdua de càrrega menor, i que per tant just en aquella zona hi hagi una major aspiració.



Figura 5.133.: Vista tridimensional del model assajat

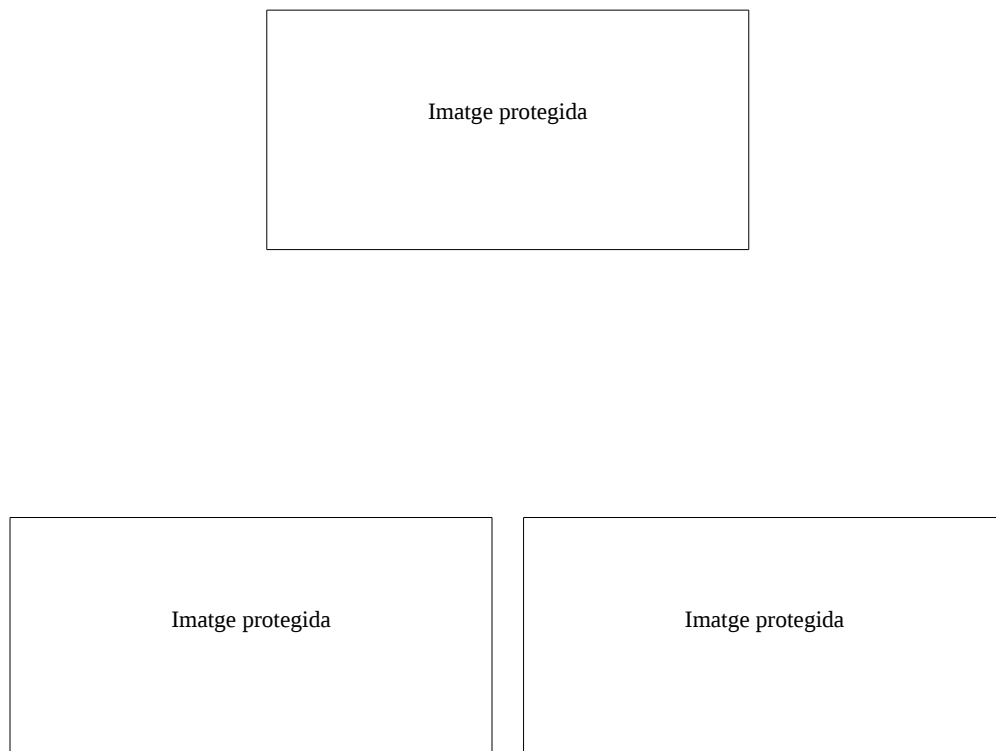


Figura 5.134.: Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)

Aquesta opció tampoc proporciona avantatges respecte de les altres que s'han estudiat, ja que les característiques del remolí són molt semblants a les anteriors.

b) Geometria número 5

En base als casos que s'han estudiat fins arribar a aquest punt, cal acceptar l'elevada dificultat que porta associat el canvi de direcció de l'aire una vegada ha sortit del llavi, ja que la tendència natural d'aquest és quedar adherit a la superfície que forma el tambor central de contrapressió de la impressora i seria molt elevada l'aspiració que s'hauria de provocar dintre de la carcassa externa de la pantalla com per arribar a provocar una depressió suficient propera a la superfície del tambor que fos capaç d'aixecar aquesta làmina que ha quedat adherida.

El pas que es porta a terme en aquest nou cas és modificar la geometria del llavi,

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

i veure si té algun efecte en la distribució de l'aire.

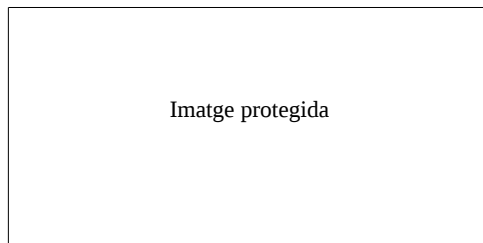


Figura 5.135.: Llavi pantalla “M4”

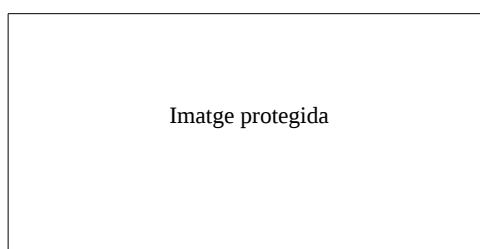
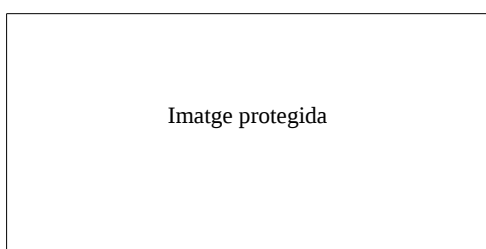
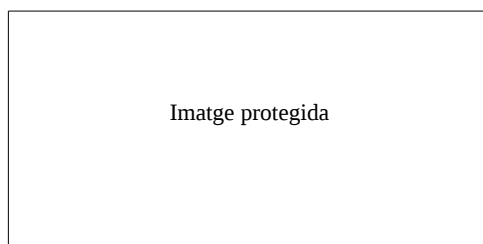


Figura 5.136.: Contorn de velocitat pel pla horitzontal que passa per la línia de color blau, vista general i detall d'un dels extrems (disseny de la part corresponent a la impulsió segons el prototip 2)

En aquest cas, sí que s'aconsegueix eliminar la turbulència que es produïa als extrems de la pantalla i això repercutirà de manera molt positiva a la hora de trobar el balanç adequat en el qual ha de treballar la pantalla per recollir tot l'aire que s'impulsa. Dels resultats que es mostren aquí, cal tenir en compte que s'ha simplificat el model sense simular la part corresponent al caixó d'impulsió de la pantalla, per tant tampoc apareix l'efecte que puguin provocar els deflectors que porta incorporats el llavi i que en certa manera contribueixen a què el comportament del fluid no sigui tan ordenat com el que es mostra a la fig. 5.136 (els resultats de la pantalla que s'ha assajat sencera i que es correspondria amb la geometria número 1 d'aquest apartat, mostren com l'efecte dels deflectors provoquen una certa turbulència en el comportament del fluid una vegada ha impactat contra la superfície del tambor).

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

5.5.3. Estudi de la nova versió del caixó d'aspiració per a poder ésser implementat a les pantalles tipus “M4”

5.5.3.1. Estudi per a determinar la geometria que ha de tenir el caixó d'aspiració de la pantalla, a través de simulació amb OpenFOAM

Una vegada resolt el problema del remolí que s'originava entre la impulsió del llavi i el tambor, es procedeix a dissenyar la part corresponent a l'aspiració de la pantalla. S'utilitza un principi de funcionament similar al que s'ha mostrat a la fig. 5.107.b, però canviat lleugerament, segons es mostra a la fig. 5.137. En aquest cas, els orificis que s'han realitzat en el caixó d'aspiració són molt més nombrosos que no pas els que es fan en l'actualitat en el disseny de les “M4”, i a més a més la seva secció és variable en funció de la distància d'allunyament respecte de la boca d'aspiració de la pantalla.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

La nova ubicació d'aquests orificis es deu a les limitacions d'espai que té la pantalla per les dimensions exteriors que vénen imposades per la carcassa exterior, i que no permeten poder créixer de dimensions exteriors per no crear interferències amb altres parts de la màquina.

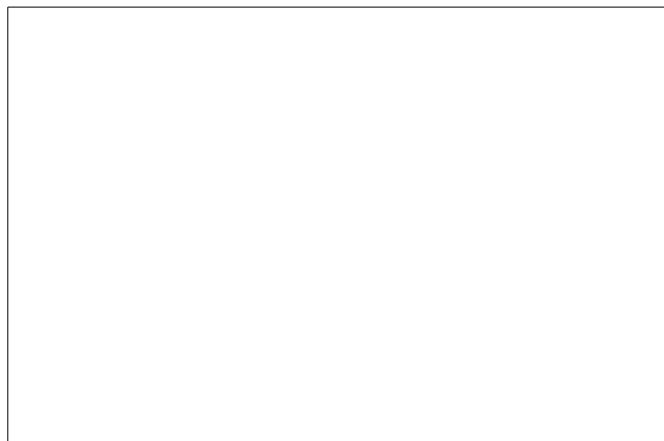


Figura 5.137.: Representació esquemàtica del recorregut de l'aire en una pantalla d'assecatge entre tinters (impulsió i aspiració) per el nou prototip

La solució constructiva que s'adopta per aquest nou prototip és la que es mostra a la fig. 5.137; només és necessari determinar la distribució d'orificis en el caixó d'aspiració que permet assolir un balanç el més baix possible.

Pel que fa a la distribució d'orificis ha calgut realitzar una nombrosa sèrie de simulacions fins arribar a la solució final, però amb l'objectiu de no fer massa feixuc el document es decideix presentar únicament els resultats corresponents a les dues simulacions que presenten un millor comportament d'entre el total que s'han realitzat; essent una d'elles el disseny que es correspon amb el prototip que s'ha fet construir de pantalla sencera.

a) Geometria 1

A mode de resum, aquesta geometria està formada per la part de la impulsió corresponent a la fig. 5.95,

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Pel que fa a la part corresponent a l'aspiració, no s'ha arribat a aquesta distribució d'orificis en una primera temptativa de disseny sinó que ha estat necessari realitzar diverses simulacions, un gran nombre d'elles s'ha realitzat de manera conjunta amb l'estudi que es feia per evitar el remolí que es produïa una vegada l'aire incidia contra el tambor de la màquina.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Pel que fa als diàmetres de les boques d'impulsió i d'aspiració s'han mantingut igual als diàmetres de partida de la pantalla “M4”, és a dir a “ $\varnothing_1 mm$ ” a la impulsió i “ $\varnothing_4 mm$ ” a l'aspiració.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

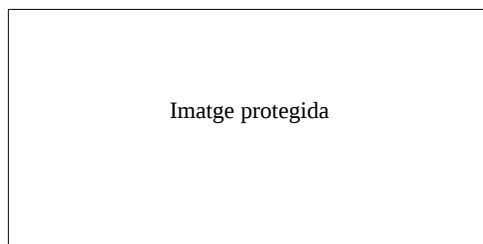


Figura 5.138.: Modelat tridimensional de la pantalla simètrica d'assecatge entre tinters (geometria prototip impulsió - aspiració)

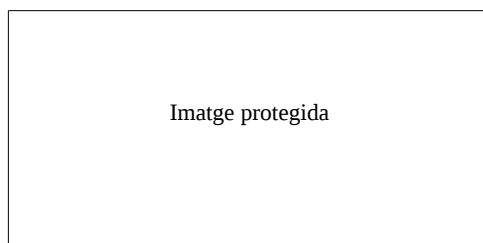


Figura 5.139.: Contorn de velocitats en un pla horitzontal de la pantalla, en l'espai que queda entre el tambor i el llavi (balanç 30%)

En el grup de simulacions que s'han portat a terme per estudiar la zona d'aspiració de la pantalla, en moltes d'elles, s'ha observat que al igual que succeeix en la figura immediatament superior a aquest paràgraf, els deflectors que es munten a sobre del llavi per dirigir perpendicularment l'aire que surt de la pantalla, provoquen una divisió del fluid en làmines contigües entre elles (una làmina per a l'espai que queda entre dos deflectors consecutius). Aquestes làmines a mesura que s'allunyen del punt d'impacte contra el tambor tendeixen a desordenar-se progressivament i a formar uns remolins just quan incideixen contra la banda interna de la carcassa exterior de la pantalla; aquests remolins provoquen que el cabal d'aire que ha d'aspirar el conducte d'aspiració de la pantalla hagi de ser més gran que el que s'obtidria si la distribució del fluid fos més uniforme amb una distribució similar a la que s'havia obtingut a la fig. 5.136 on s'havia negligit l'efecte dels deflectors en la simplificació que s'ha adoptat de no assajar sencera la part de la impulsio de la pantalla.

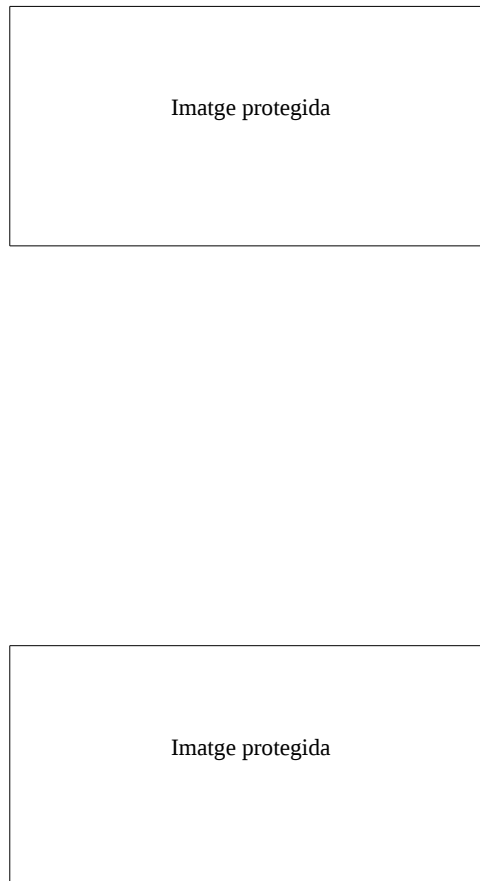


Figura 5.140.: Línies de corrent de la geometria analitzada, vista lateral i vista inferior (balanç 30%)

A la fig. 5.140 s'ha representat el recorregut que efectua l'aire al circular per dintre de la pantalla, amb una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ " i un balanç del 30%. No s'aprecien zones on hi hagi dèficit o manca de circulació d'aire, per tant el disseny es pot considerar com a correcte. Tot seguit es representa la velocitat de l'aire a l'obertura d'espai que queda entra l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor, per visualitzar si en alguna zona s'escapa aire de dintre la pantalla cap a l'exterior.

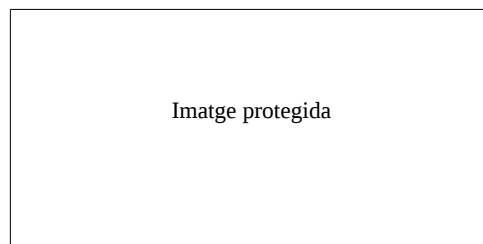


Figura 5.141.: Línies de corrent de la geometria analitzada, circulació de l'aire al sortir del llavi i impactar contra el tambor (balanç 30%)

A partir de la fig. 5.141 es pot veure com una vegada l'aire ha estat expulsat del llavi, aquest pateix un canvi en la seva direcció de 90° quan impacta contra el tambor. La disposició constructiva de l'aspiració provoca que l'aire aspirat tendeixi a acumular-se a la zona de tangència més propera a la cara interna de la carcassa exterior de la pantalla. Segons mostren les línies de corrent, el volum d'aire que queda entremig de la carcassa exterior de la pantalla d'una amplada de " $W_{carcassa}$ " i de la paret externa del caixó d'impulsió d'una amplada de " W_{llavi} " té una circulació d'aire baixa amb una poca densitat de línies de corrent en aquella zona; en vista d'aquests resultats, seria viable reduir l'amplada exterior de la carcassa de la pantalla i apropar-la més a les dimensions del caixó d'impulsió, però això aniria en detriment del balanç de la pantalla que s'ha aconseguit amb aquesta geometria ja que que a mesura que s'apropa la carcassa externa de la pantalla cap al caixó d'impulsió, augmenta progressivament la velocitat que té l'aire que cal aspirar i per tant cada vegada serà més difícil per a l'aspiració de la pantalla provocar un canvi de 90° en la direcció del fluid per evitar que s'escoli a través de l'obturador.

A la fig. 5.142 es mostra la distribució de velocitat de l'aire en l'espai que queda comprès entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor central de la màquina. Es pot veure com la distribució de velocitat no és totalment uniforme al llarg de tota l'amplada de la pantalla, sinó que presenta una forma de dents de serra provocada precisament per les turbulències que s'han comentat a la fig. 5.139.

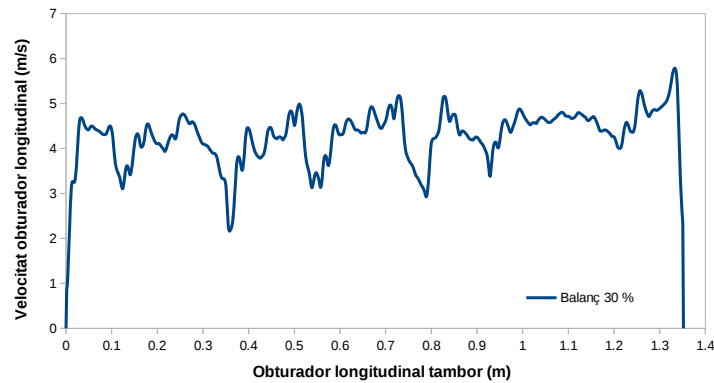


Figura 5.142.: Velocitat de l'aire a l'espai comprès entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor. Separació entre llavi i tambor de “ $b\text{ mm}$ ” i entre obturador longitudinal i tambor de “ $e\text{ mm}$ ”

b) Geometria 2

Aquest nou disseny que es proposa, varia respecte de la geometria anterior en el fet que s'han practicat uns orificis addicionals en el caixó d'aspiració just a les dues zones més extremes de la pantalla, per així corregir un possible defecte que es pugui produir en l'aspiració just en aquestes zones que són més inaccessibles i més properes a les tapes laterals anterior i posterior de la pantalla.

El disseny de la geometria 1 és el que es passa a fabricar per testejar-lo experimentalment, i en cas que calgui millorar-ne les prestacions una vegada fets assajos experimentals es recorreria a mecanitzar els orificis addicionals de la geometria 2 si es tornés a produir un rebuf tal com el que es visualitza en el disseny de la pantalla que es construeix actualment per a les “M4”.



Figura 5.143.: Modelat tridimensional de la pantalla simètrica d'assecatge entre tinters (geometria prototip impulsíó - aspiració, possible proposta de millora)

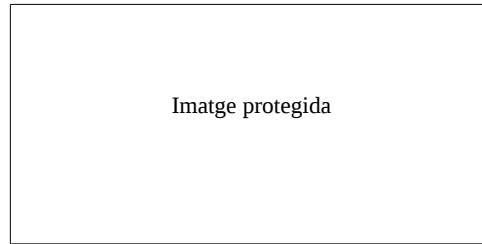


Figura 5.144.: Contorn de velocitats en un pla horitzontal de la pantalla, en l'espai que queda entre el tambor i el llavi (balanç 30%)

El contorn de velocitats en el pla horitzontal i paral·lel al llavi de la pantalla, continua mantenint una distribució similar a la que s'ha obtingut amb la geometria 1.

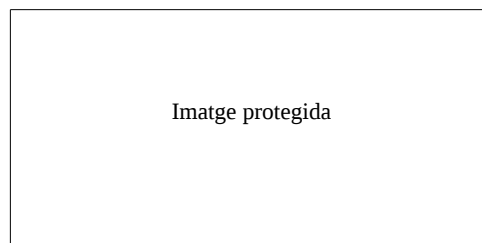


Figura 5.145.: Línies de corrent de la geometria analitzada, vista lateral (balanç 30%)

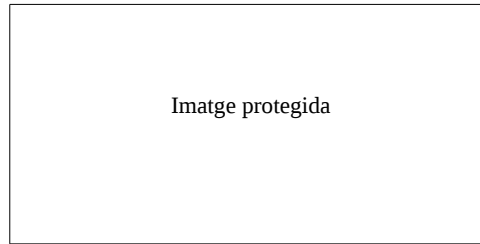


Figura 5.146.: Línies de corrent de la geometria analitzada, vista inferior (balanç 30%)

Les línies de corrent mostren un comportament molt semblant al que s'obtenia amb la primera geometria, ja que tampoc s'aprecien zones amb una circulació d'aire deficient.

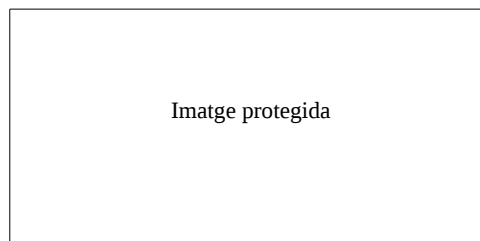


Figura 5.147.: Línies de corrent de la geometria analitzada, circulació de l'aire al sortir del llavi i impactar contra el tambor (balanç 30%)

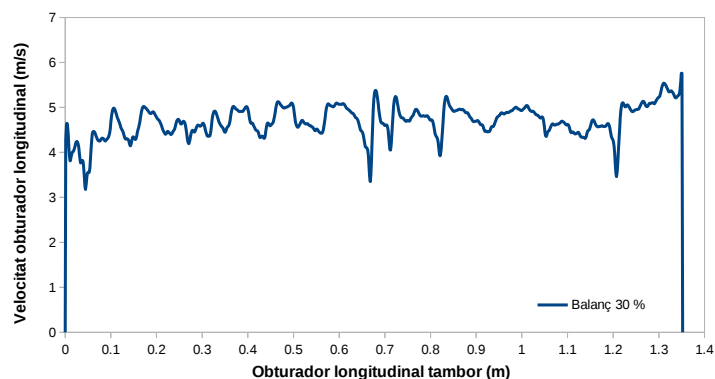


Figura 5.148.: Velocitat de l'aire a l'espai comprès entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor. Separació entre llavi i tambor de “ $b\text{ mm}$ ” i entre obturador longitudinal i tambor de “ $e\text{ mm}$ ”

La velocitat entre l'obturador i el tambor té una distribució lleugerament més uniforme que la que s'ha presentat a la fig. 5.142, la única diferència és que en els extrems ha augmentat sensiblement l'aspiració, però menys del que es desitjava. Com s'ha dit abans, aquesta solució es podria aplicar si el prototip corresponent a la geometria anterior presentés un comportament que calgués millorar de manera considerable just a la zona dels dos extrems de la pantalla.

5.5.3.2. Estudi de la pantalla prototip (impulsió i aspiració) amb el disseny corresponent a la geometria número 1, a través de mesures experimentals al banc de proves

Les fig. 5.149, fig. 5.150 i fig. 5.151 es corresponen als valors experimentals de velocitat mesurats en l'obturador longitudinal de la pantalla, per diverses separacions entre l'obturador i la pantalla al igual que s'ha fet amb el model de la “M4”.

A partir dels resultats analitzats, es pot veure com al igual que passava amb el model “M4” les zones de l'obturador que presenten un pitjor comportament (l'aire té tendència a escapar de dintre la pantalla cap a l'exterior d'aquesta) estan situades justament als extrems de l'obturador a tocar de les dues tapes laterals, però amb aquest nou disseny de l'aspiració es pot apreciar com la zona que presenta un rebuf en la zona de l'obturador té una longitud molt més petita que no pas la que tenia lloc amb el disseny original.

La diferència entre les distribucions de velocitat dels dos dissenys, s'accentua sobretot a la part més allunyada de la boca d'aspiració de la pantalla. Si per fer la comparativa entre els dos casos es prenen com a referència les mesures realitzades per una distància obturador - tambor de “ $u\text{ mm}$ ”, és a dir per tant la fig. 5.123 i la fig. 5.150, per un balanç semblant en els dos casos per exemple del 40%, el rebuf

d'aire en la part final de la pantalla en la "M4" té una longitud de 10cm aproximadament, mentre que per el prototip passa a tenir una llargada menor de 5cm. El disseny nou presenta l'avantatge que tendeix a reduir de manera més ràpida la zona en què es produeix un rebuf que no pas amb la pantalla actual, i per tant permet reduir el balanç de la pantalla de manera considerable tal i com es pot veure a la taula. 5.11. Si es comparen les distàncies de separació estàndard actuals de l'obturador i llavi que s'han esmentat fa unes línies, s'ha passat d'un balanç d'un " $B_{M4} \%$ " amb les pantalles actuals, a aproximadament un " $B_{prototip} \%$ " amb el nou prototip, per tant s'ha millorat en gairebé un 50% el desequilibri entre impulsió i aspiració de la pantalla.

Un altre punt que cal destacar és l'alta sensibilitat que presenten els resultats obtinguts a una variació en la distància de separació entre l'obturador i el tambor central.

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"

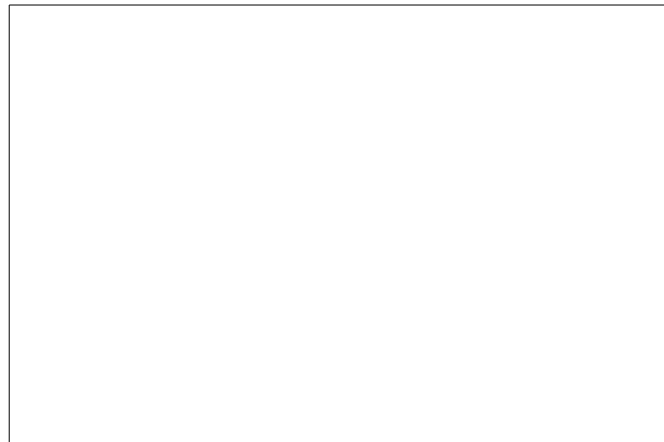


Figura 5.149.: Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " $b mm$ "; separació tambor - obturador, " $e mm$ " (pantalla prototip impulsió més aspiració)

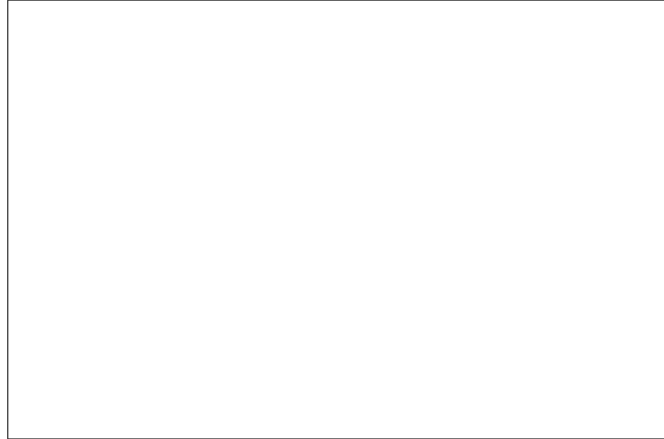


Figura 5.150.: Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " $b mm$ "; separació tambor - obturador, " $u mm$ " (pantalla prototip impulsió més aspiració)

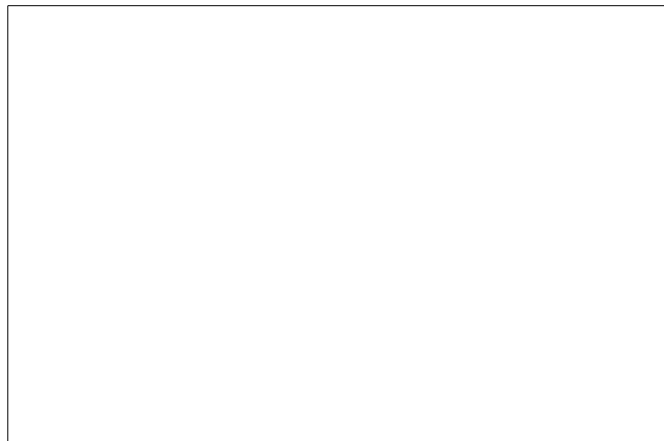
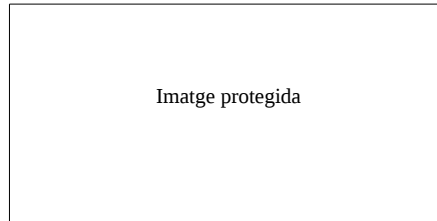


Figura 5.151.: Mesures experimentals de la velocitat de l'aire entre l'obturador longitudinal i el tambor, al banc de proves, per una velocitat mitjana al llavi de " $V_1 m/s$ ". Separació vertical llavi - tambor, " $b mm$ "; separació tambor - obturador, " $o mm$ " (pantalla prototip impulsió més aspiració)



Taula 5.11.: Balanços experimentals de la pantalla prototip per a diverses distàncies de separació entre l'obturador longitudinal i el tambor

5.6. Industrialització de la pantalla

Els objectius que calia assolir i que es varen marcar per part de l'empresa, eren bàsicament dos: el primer d'ells consistia en uniformitzar la velocitat de l'aire a la sortida del llavi, i el segon d'ells era reduir el balanç de la pantalla fins a un 30%. Tot i que amb el nou disseny s'ha assolit un balanç proper al " $B_{prototip} \%$ " (una mica per sobre dels objectius desitjats), per part de l'empresa s'accepta el disseny actual i es considera apte per a ésser implementat en mode de validació interna.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

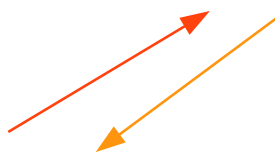
Si una vegada la màquina hagi entrat en producció amb les noves pantalles, aquestes aporten unes prestacions millors que les pantalles que es munten en l'actualitat, aleshores serà possible implementar la millora a les diverses màquines que es vagin expedint.

Fins ara, el prototip de pantalla completa que s'ha construït i validat experimentalment estava enfocat per a ésser instal·lat a un model de màquina (“M4”) diferent de la qual es pretén implementar la millora en tant que validació en producció real (“M3”). La redefinició del disseny de la pantalla per a adaptar-se constructivament al nou model de màquina on cal instal·lar-la és una oportunitat de millorar el disseny inicial que s'ha proposat i que s'ha analitzat unes línies més amunt.

Ha calgut adaptar la pantalla tenint en compte que les dimensions de l'envolupant exterior de la pantalla tipus “M3” és lleugerament diferent de la “M4”; a més a més ha estat necessari abaratir el cost constructiu del conjunt ja que el disseny proposat a la fig. 5.138 tenia un cost de mecanització tan elevat que feia perillar la viabilitat econòmica del projecte.

Després de consensuar diverses solucions constructives amb els proveïdors, que no afectessin negativament les prestacions assolides per la pantalla i que permetessin reduir costos de fabricació s'ha arribat a un disseny que satisfia tots els requisits, i que es mostra a continuació.

“Pàgina deixada intencionadament en blanc”



"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



Per el disseny de la pantalla es proposa instal·lar un obturador longitudinal de niló amb uns traus colissos que permetin ajustar la distància d'obertura entre el tambor central i la pantalla. La distància recomanada per abaixar al màxim possible el balanç de la pantalla, és de “*e mm*”.

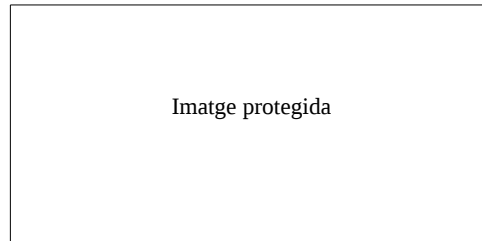


Figura 5.155.: Vista lateral de la pantalla, amb les respectives boques d'alimentació

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Figura 5.156.: Detall de la cambra d'impulsió (esquerra). Detall de cambra d'aspiració (dreta)

“Pàgina deixada intencionadament en blanc”

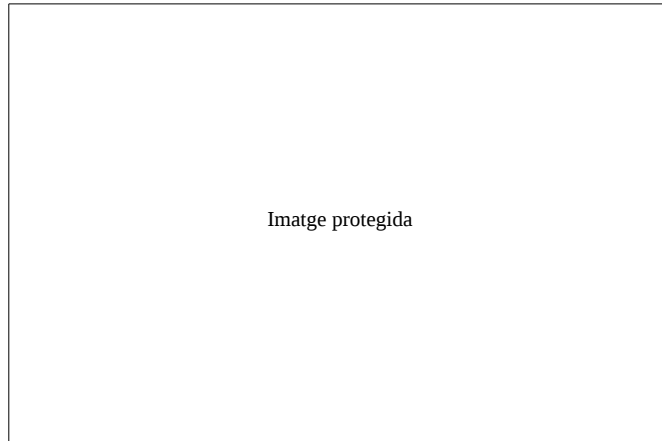


Figura 5.158.: Detall de la unió o posicionament entre els dos passamans d'alumini que formen el llavi, i la seva unió amb les tapes laterals i la carcassa externa de la pantalla

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

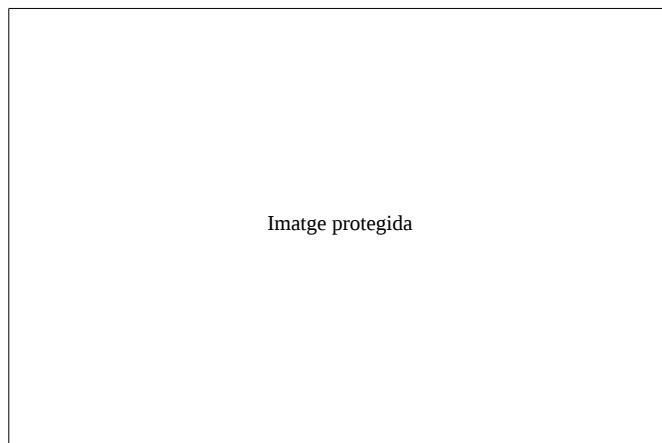


Figura 5.159.: Vista general del llavi de la pantalla

A diferència del llavi de la pantalla de la “M4”, s’ha optat per utilitzar dos passamans d’alumini independents, i que s’uneixen als seus extrems amb una xapa d’acer.

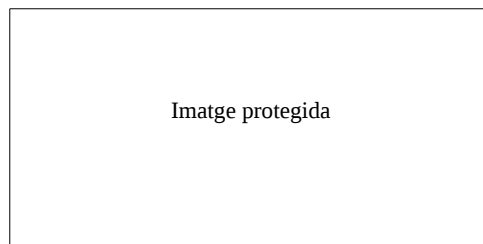


Figura 5.160.: Cara exterior del caixó d'aspiració, amb la corresponent porta de registre

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

6. Estudi de la transferència de calor per convecció d'un bufador

6.1. Descripció i plantejament de la problemàtica a resoldre

L'objectiu d'aquesta tesi consisteix en la optimització del sistema d'assecatge d'una impressora flexogràfica, centrant l'atenció principalment en les pantalles d'assecatge entre tinters.

En el cap. 5 s'ha millorat el comportament de la pantalla des del punt de vista d'uniformització de velocitats i temperatures al llarg de tot el llavi; això permet d'una banda assolir un assecat més uniforme en tota l'amplada d'impressió del material, i addicionalment permet abaixar el cabal d'aire que ha de moure la màquina en el circuit d'extracció. Malgrat s'ha optimitzat el comportament de l'aire a la sortida del llavi, en el cap. 5 no s'ha fet pròpiament un estudi de la capacitat d'assecatge de la pantalla en funció dels diversos paràmetres que defineixen el bufador, ja que la configuració del llavi en el disseny final s'ha mantingut igual al del disseny de partida.

En el cap. 9 es planteja un model matemàtic que permet evaluar la capacitat d'assecatge d'una pantalla situada entre tinters o bé en el túnel en funció dels diversos paràmetres que entren en joc en una pantalla d'assecat, com per exemple l'obertura del llavi, la separació entre el llavi i el substrat i les condicions de l'aire que s'utilitza per a l'assecat (velocitat, temperatura). Un dels paràmetres fonamentals per a poder fer el càlcul del poder d'assecat d'una pantalla, consisteix en determinar el coeficient de transferència de calor per convecció ' \bar{h} ' de la pantalla sota les condicions de treball desitjades. Una vegada feta la cerca corresponent a la bibliografia, s'ha constatat que per a la configuració actual de les pantalles d'assecatge utilitzades a Comexi, no es disposa del valor d'aquest coeficient sota aquestes condicions de treball (la configuració geomètrica del llavi i les condicions de treball del fluid utilitzat per a l'assecat no són les mateixes que les utilitzades en la bibliografia especialitzada).

Una vegada constatada la dificultat d'obtenir valors tabulats del coeficient de transferència de calor per convecció sota les condicions de treball de les màquines de comexi, es considera totalment necessari fer un estudi mitjançant simulació CFD per a determinar el valor d'aquest coeficient ' \bar{h} '. Les passes que s'han seguit per a l'estudi d'aquest paràmetre es defineixen a continuació:

- Fer una cerca a la bibliografia en revistes especialitzades, i buscar un cas de geometria de bufador similar al cas que es desitja estudiar, amb uns paràmetres de velocitat i de temperatura del fluid similars al del cas a resoldre, que disposi de dades experimentals que puguin ésser reproduïbles / verificades mitjançant simulació CFD
- Simular mitjançant el software OpenFOAM el comportament del bufador que s'ha escollit en el punt anterior, i ajustar el model fins aconseguir una bona correlació de resultats entre les dades experimentals recollides a la bibliografia i les dades obtingudes via simulació
- Una vegada es disposa d'un model CFD que és capaç de reproduir de manera fiable les dades experimentals, es procedeix a determinar el coeficient de transferència de calor per convecció de les pantalles actuals
- Es realitza un estudi paramètric de com varia el coeficient ' \bar{h} ' variant diversos paràmetres de les pantalles: separació entre el bufador i substrat, variació de la velocitat de sortida de l'aire del bufador, variant la velocitat de la superfície d'impacte (superfície que s'assimila al moviment del substrat), variant l'obertura del bufador, variant la temperatura de l'aire del bufador, considerant un jet amb confinament o sense confinament, pantalles amb dos bufadors i finalment pantalles amb tres bufadors

Una vegada realitzat aquest estudi és possible determinar quins són els paràmetres de disseny que permeten augmentar de manera més notable la capacitat d'assecatge de les pantalles, per així poder-los aplicar a l'hora de realitzar un nou disseny de la pantalla.

6.2. Introducció - Estudis previs recollits a la bibliografia

Syedain, Hasan i Mujumdar [7] realitzen un estudi mitjançant simulació numèrica bidimensional de la distribució del flux i de la transferència de calor d'un bufador de ranura confinat que impulsa aire contra una superfície a una temperatura constant. Modelitzen el comportament del fluid mitjançant models de turbulència de la família $k - \varepsilon$, amb les corresponents versions d'alts nombres de Reynolds així com per baixos nombres de Reynolds. Els paràmetres estudiats es corresponen per valors $5.000 < Re < 20.000$ i $2,5 < H/W < 7,5$. Del seu estudi es desprèn que la versió per alts nombres de Reynolds com per exemple el model estàndard $k - \varepsilon$ proporciona resultats molt més allunyats dels valors experimentals que no pas els valors recollits per les versions adaptades per baixos nombres de Reynolds com per exemple el model de Lam-Bremhorst "LB" i el de Launder-Sharma "LS" (ambdues versions disponibles amb OpenFOAM®). Per el cas de $2,5 = H/W$ recomanen la versió de Lam-Bremhorst i per a valors $7,5 = H/W$ aconsellen la versió adaptada per Launder-Sharma.

Sharif [34] aporta un estudi on analitza la distribució del número de Nusselt per un bufador confinat de doble ranura en règim laminar per analitzar si amb una configuració de doble llavi és possible assolir una distribució de transferència de calor més uniforme al llarg de la superfície d'impacte; l'estudi es porta a terme variant l'angle amb el que surt l'aire del bufador. Els resultats mostren que el fet de treballar amb inclinacions entre 60° i 90° no aporta una millora en la distribució del nombre de Nusselt, ni tampoc en el seu valor mitjà. Si l'angle passa a ser de 45° aleshores sí que s'aconsegueix una distribució més uniforme, però com a contrapartida el valor mitjà del coeficient queda reduït en un 36%.

Wienand, Riedelsheimer i Weigand [43] recullen els efectes de la utilització del limitador proposat per Kato-Launder aplicat al model de turbulència KWSST per distàncies $2 < H/D < 14$ per un nombre de Reynolds de 23.000, obtenint un bon ajust de resultats per distàncies $H/D = 2$ i $H/D = 6$. També s'aporta un estudi dels efectes del refinament del mallat per una distància $H/D = 6$ a la superfície d'impacte, en quant a afectació en la distribució del flux així com en la transferència de calor; conclouen que si bé la influència del valor de y^+ no té influència en la distribució del flux entre els valors estudiats $0,4 < y^+ < 4,3$, sí que és important treballar amb valors $y^+ < 1$ per modelar correctament la transferència de calor, essent molt recomanable inclús arribar a valors inferiors a la unitat.

Jaramillo, Pérez-Segarra, Oliva i Claramunt [4] mostren un estudi on s'analitzen diversos models de turbulència RANS. Es compara el comportament de diversos models de la família $k - \varepsilon$ i $k - \omega$ sota diverses geometries de les quals es disposa de dades recollides de simulacions DNS o resultats experimentals, essent un d'aquests casos l'estudi d'un bufador de ranura. S'analitza entre d'altres paràmetres el coeficient de transferència de calor per convecció. La modelització de turbulència de la família $k - \omega$ mostra una millor aproximació al valor real del nombre de Nusselt que els de la família $k - \varepsilon$ (que en aquest cas eren per alts nombres de Reynolds). Del seu anàlisi també es desprèn que els resultats obtinguts es veuen influenciats en funció de la distribució de velocitats a la sortida del bufador (segons si s'adopta per exemple una distribució uniforme de velocitats o bé una distribució corresponent a una flux totalment desenvolupat).

Dutta, Dewan i Srinivasan [44] presenten un estudi de diversos models de turbulència per a la modelització de la transferència de calor d'un bufador de ranura. S'analitzen models de la família $k - \varepsilon$ d'alts nombres de Reynolds així com d'altres per a baixos nombres de Reynolds; també s'analitzen els models de la família $k - \omega$ ja sigui en la seva versió estàndard o en la versió KWSST; i finalment també s'assaja el model $v^2 - f$. Els casos d'estudi es realitzen per relacions $H/W = 4$ i $H/W = 9,2$ per un número $Re = 20.000$. Dels seus resultats s'extreu que els models de la família $k - \omega$ amb modificacions fetes per a flux transicional són els que capturen millor el valor del nombre de Nusselt a la regió d'estancament. Pel que fa als models de la família $k - \varepsilon$, els adaptats per a baixos nombres de Reynolds no preveuen de manera correcta el segon màxim local en la distribució del nombre de Nusselt.

Behnia i Parneix [45] proposen una comparativa entre el model de turbulència $k - \varepsilon$ en la seva versió estàndard i el model de turbulència $v^2 - f$ per a les configuracions $H/D = 2$ i $H/D = 6$ per a un nombre de $Re = 23.000 - 50.000 - 70.000$. Per els diversos casos estudiats el model $v^2 - f$ presenta un comportament molt millor en tant que a la predicció del nombre de Nusselt que no pas la versió estàndard de $k - \varepsilon$. La correlació entre resultats experimentals i simulats és més acurada per a la relació $H/D = 2$ que en el cas de la relació $H/D = 6$. Pel que fa al model estàndard $k - \varepsilon$ proporciona valors exageradament alts a la zona d'impacte just a la zona d'estancament, i en fan desaconsellable el seu ús.

Malgrat el model de turbulència $v^2 - f$ està disponible en el software OpenFOAM® que s'ha utilitzat per a la redacció de la present tesi, no ha estat possible analitzar-ne la seva eficàcia en els casos que es presenten, ja que no ha estat possible convergir una solució amb aquest model de turbulència.

Narayanan, Seyed-Yagoobi i Page [46] aporten un estudi, on a partir de mesures experimentals de temperatura calculen el coeficient de transferència de calor per convecció d'un bufador de ranura a dues separacions entre bufador i superfície d'impacte de 3,5 i 0,5 vegades el diàmetre hidràulic, per a un nombre de $Re = 22.500$. Dels seus resultats es desprèn que per a la separació de 3,5 vegades el diàmetre hidràulic desapareix el segon pic o màxim local que sí que es mostra per a la separació corresponent a 0,5 vegades el diàmetre hidràulic. A mesura que el bufador s'apropa a la superfície d'impacte, apareix una distribució que presenta un màxim al punt d'estancament i alhora un altre màxim local a una certa distància del punt d'estancament. Per separacions grans, només apareix un màxim del coeficient de transferència a la zona d'estancament i aquest valor va disminuint progressivament a mesura que es produeix un allunyament respecte de la sortida del bufador.

Royne i Dey [47] fan un estudi de l'efecte que produeix en la quantitat de calor transferida el fet d'utilitzar orificis de secció constant de menor o major llargada, així com també la utilització d'orificis convergents o bé divergents. L'anàlisi que ells proposen es fa per un fluid de tipus líquid en comptes de tipus gasós, i estudien la pressió necessària que requereix el sistema per a cada tipus de geometria així com també la transferència de calor que proporciona. Extreuen com a conclusió que l'orifici amb una secció variable convergent és la configuració que aporta un coeficient de transferència de calor més elevat respecte dels estudiats, si bé la secció divergent també aporta una millora en el coeficient de transferència respecte de la opció amb la secció constant. Per un mateix coeficient de transferència de calor, el disseny amb l'orifici de secció convergent requereix d'un menor cabal d'impulsió, i en el cas del disseny divergent aquest aporta una menor pèrdua de càrrega.

Malgrat en la present tesi no ha estat possible comparar el comportament de les diverses geometries, sí que seria convenient en un futur comprovar si els resultats també es reproduïen en el cas de treballar amb un fluid de tipus gas enlloc de líquid.

Colucci i Viskanta [48] fan un anàlisi de l'efecte que s'obté en utilitzar un bufador de perfil hiperbòlic enlloc d'utilitzar-ne un amb un perfil de secció constant (contorn

divergent). Els resultats es porten a terme per el cas d'un bufador de secció circular, a diferència del que s'estudia en la present tesi. Les mesures experimentals que aporten són per a una relació $0,25 < H/D < 6,0$ i per $10.000 < Re < 50.000$. La utilització d'un perfil d'aquestes característiques enlloc d'un orifici de secció constant aporten valors del nombre de Nusselt més alts, i per tant una major transferència de calor. També recullen el fet de que a mesura que el bufador es va apropant a la superfície d'impacte (o s'augmenta la velocitat de sortida del fluid) apareix un màxim local diferent de l'assolit en el punt d'estancament, i que també a mesura que s'augmenta el nombre de Re o bé s'abaixa la relació H/D arriba un cert moment en què aquest segon màxim arriba a sobrepassar el valor del Nusselt en el punt d'estancament.

S'ha reproduït aquesta geometria mitjançant simulació, però no ha estat possible arribar als resultats presentats en l'article.

Benmouhoub i Mataoui [12] estudien l'afectació que produeix en el coeficient de transferència de calor, el fet de que el bufador impulsi un raig d'aire amb una certa inclinació sobre una superfície isotèrmica calenta que es trobi en moviment de translació. Les simulacions portades a terme representen la configuració $H/W = 8$, amb un valor de $10.000 < Re < 25.000$, amb una relació de velocitats entre la superfície en moviment i la velocitat de sortida del fluid del bufador $0 < R_{sj} < 1,75$, i amb un angle d'inclinació del bufador entre 0° i 25° . Per ràtios $R_{sj} < 1$ com en el cas d'aquesta tesi, s'observa que el jet d'aire té tendència a desplaçar-se en el mateix sentit que el del moviment de la superfície d'impacte; a més velocitat d'aquesta superfície, més desviació de l'aire a la sortida del bufador. Per valors petits del paràmetre R_{sj} les diferències obtingudes entre considerar o no el moviment de la superfície d'impacte, respecte del nombre de Nusselt, són molt baixes gairebé inapreciables.

Es decideix prendre com a documentació de referència per a la validació de la modelització feta amb OpenFOAM, l'estudi proporcionat per [4] on analitza diversos models de turbulència per tal de reproduir les dades experimentals recopilades per l'assaig realitzat per [6], on s'assaja un bufador de ranura amb la configuració $H/W = 2,6$ amb un valor de $Re = 10.400$.

Com a pas previ a la realització de les simulacions de validació, i una vegada vista la importància que juga el model de turbulència en l'obtenció de resultats ajustats a les dades reals segons es descriu a les diverses referències bibliogràfiques consultades, es considera necessari fer una introducció als diversos models de turbulència amb els quals es treballarà en aquesta tesi, i que s'exposa a sec. 6.3.

Una vegada aconseguit un bon ajust entre la simulació CFD i aquestes dades experimentals es procedeix a realitzar l'estudi paramètric del valor del coeficient de transferència de calor per convecció sota diferents configuracions del bufador.

6.3. Introducció de turbulència

En aquest apartat (sec. 6.3) es presenta una introducció al concepte de turbulència, així com una descripció dels diversos models que s'han utilitzat en la validació del coeficient de transferència de calor per convecció d'un bufador de ranura.

La informació present en aquest apartat (sec. 6.3) no és nou coneixement aportat per l'autor d'aquesta tesi, sinó que és un recull d'informació recopilada a partir de diverses referències bibliogràfiques, i que obeeix a la voluntat d'introduir i situar els diversos models de turbulència, la seva configuració i la seva implementació. En cadascun dels subapartats en què s'ha dividit aquest apartat, s'han mencionat les referències bibliogràfiques a partir de les quals s'ha recollit la informació presentada.

Conceptes fonamentals per a la modelització de la turbulència[9]

La diferència que hi ha entre un flux laminar i un de turbulent és que mentre el laminar es manté estable i ordenat, el flux turbulent és caòtic tot propiciant variacions en les variables fluidodinàmiques (com per exemple velocitat, pressió, temperatura, densitat, viscositat) a diferents escales temporals i dimensionals i que implica vorticitats que amplifiquen el transport de massa, quantitat de moviment i energia (difusivitat). A través d'aquesta turbulència el que es fa és dissipar energia del flux principal tot augmentant l'energia interna de les partícules de fluid; això implica que per mantenir aquesta turbulència és necessari una aportació d'energia constant per tal de contrarestar aquestes pèrdues que provoca la turbulència, així doncs si no hi ha una aportació d'energia constant aquesta turbulència tendeix a desaparèixer. La transició d'un règim laminar a un de turbulent es produeix quan es visualitzen certes inestabilitats en el flux inicialment laminar. Aquest canvi es produeix a un cert nombre de Reynolds, i és a partir d'aquest nombre crític, que alhora depèn de cada aplicació que s'està estudiant, que es pot dir que s'està en un règim turbulent.

Les teories que estudien la turbulència estan basades en el concepte de cascada d'energia desenvolupat per Kolmogorov, on afirma que la turbulència està formada per remolins de diverses dimensions i tots ells posseeixen una determinada quantitat d'energia que depèn de la seva dimensió. S'inicia un procés en què els remolins més grans es descomponen i transfereixen la seva energia a remolins més petits, de manera continuada fins que arriba un punt o una escala on la viscositat del propi fluid és capaç de dissipar l'energia cinètica turbulenta en forma de calor. Per tant en flux turbulent hi ha una coexistència de diverses longituds d'escala corresponents a les dimensions dels vòrtexs que es produeixen.

La micro escala definida per Kolmogorov dels remolins més petits possibles que es poden arribar a formar abans de dissipar la seva energia cinètica en forma de calor obeeixen a les equacions[9]:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad t_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

η longitud d'escala definida per Kolmogorov

t_η escala temporal definida per Kolmogorov

Modelització de la turbulència[9]

- Direct Numerical Simulation (*DNS*): no es tracta exactament d'un model de turbulència ja que la simulació *DNS* resol tot l'espectre d'escales temporals i de longituds d'escala. El seu ús és aplicable a un limitat nombre d'estudis degut al seu alt cost computacional i per aquest mateix motiu és poc aplicable a problemàtiques industrials amb geometries complexes. El fet d'haver de resoldre totes les escales del problema implica haver de treballar amb un mallat molt i molt fi fins arribar a un nivell de malla $\Delta x < \eta$ proporcional a Re^3 [9], i tanmateix treballar amb un nombre de Courant més petit que la unitat δt [49]:

$$Co = \frac{\delta t |U|}{\delta x} \quad (6.2)$$

on δt es l'espai temporal entre dues iteracions consecutives, $|U|$ és la velocitat del fluid que travessa la cel·la i δx és la dimensió de la cel·la en la direcció de la velocitat.

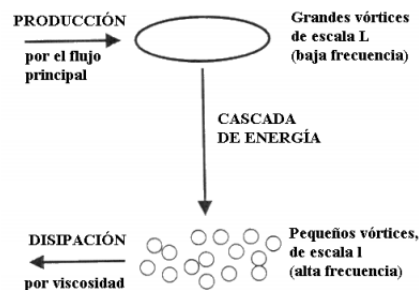


Figura 6.1.: Descripció del procés de turbulència, amb la simulació numèrica *DNS* [35]

- Large Eddy Simulation (*LES*): aquesta modelització neix amb l'objectiu de reduir el cost computacional que implica la simulació *DNS*, i proposa fer una simplificació del cas que consisteix en fer una anàlisi amb un enfoc estadístic. Amb aquest nou enfoc només es simulen les estructures que tenen una gran longitud d'escala turbulenta, i per altra banda es fa un modelat de les longituds d'escala turbulentes més petites. D'aquesta manera es fa un filtrat, on les estructures turbulents amb una longitud d'escala més gran i per tant que tenen un major contingut d'energia

es resolen directament, i per altra banda les longituds d'escala que no han passat el filtrat anterior es modelen.

- Reynolds Averaged Navier-Stokes (*RANS*): aquesta aproximació es basa en descompondre les variables del flux en dos components, un de mitjà i un altre fluctuant, substituint aquestes components a les equacions originals, i fent finalment una mitjana temporal de les equacions obtingudes. Amb aquesta metodologia es modelen totes les escales del flux turbulent, i la limitació en el mallat no és tant estricta com en les aproximacions *DNS* o *LES* fent la simulació molt més assequible computacionalment.

Modelització RANS (per a flux incompressible)[9]

Tal i com s'ha dit més amunt, la aproximació mitjançant la modelització *RANS* implica descompondre les variables fluidodinàmiques velocitat, pressió i temperatura en un valor mitjà $\bar{\phi}(x, t)$ i un valor fluctuant $\phi'(x, t)$ tot expressant el valor de la variable ϕ segons l'expressió:

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}(x, t) + \phi'(x, t) \quad (6.3)$$

Si es representa de manera gràfica la eq. 6.3, s'obté

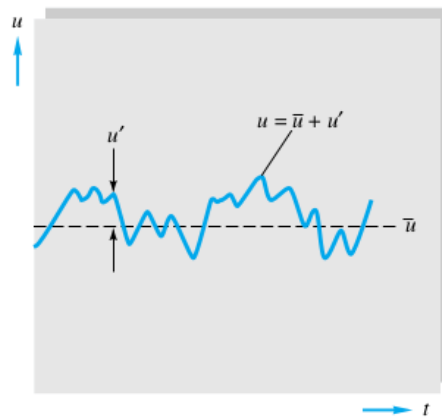


Figura 6.2.: Component mitjà i component fluctuant d'una variable[10]

que aplicat a les variables fluidodinàmiques de velocitat, pressió i temperatura es

pot expressar com segueix

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v} &= \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}' \\
 p &= \bar{p} + p' \\
 \mathbf{T} &= \bar{\mathbf{T}} + \mathbf{T}' \\
 \bar{\mathbf{v}} &= \bar{u}_i + \bar{v}_j + \bar{w}_k \\
 \mathbf{v}' &= u'_i + v'_j + w'_k
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

les expressions anteriors, substituïdes a les equacions Navier-Stokes de conservació de massa, conservació de moment i conservació d'energia per a un fluid incompressible i Newtonià, i fent la mitjana temporal queden transformades com [9]:

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot [\rho \mathbf{v}] &= 0 \\
 \overline{\nabla \cdot [\rho (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}')] } &= 0 \\
 \nabla \cdot [\rho \bar{\mathbf{v}}] &= 0
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} [\rho \mathbf{v}] + \nabla \cdot \{\rho \mathbf{v} \mathbf{v}\} &= -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu \left[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \right] \right\} + f_b \\
 \overline{\frac{\partial}{\partial t} [\rho (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}')] + \nabla \cdot \{\rho (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}') (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}')\}} &= -\nabla (\bar{p} + p') \\
 + \nabla \cdot \left\{ \mu \left[\nabla (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}') + (\nabla (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}'))^T \right] \right\} &+ f_b \\
 \frac{\partial}{\partial t} [\rho \bar{\mathbf{v}}] + \nabla \cdot \{\rho \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}\} &= -\nabla \bar{p} + \left[\nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}} - \rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'}) \right] + \bar{f}_b
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \nabla \cdot [\rho c_p \mathbf{v} T] &= \nabla \cdot [k \nabla T] + S^T \\
 \overline{\frac{\partial}{\partial t} [\rho c_p (\bar{T} + T')] + \nabla \cdot [\rho c_p (\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}') (\bar{T} + T')]} &= \nabla \cdot [k \nabla (\bar{T} + T')] + S^T \\
 \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p \bar{T}) + \nabla \cdot [\rho c_p \bar{\mathbf{v}} \bar{T}] &= \nabla \cdot [k \nabla \bar{T} - \rho c_p \overline{\mathbf{v}' T'}] + \bar{S}^T
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

Les equacions *RANS* són similars a les equacions de conservació inicials, a excepció dels termes relacionats amb les components fluctuants de les variables que s'han mencionat. Es formen nou noves incògnites, sis d'elles corresponents al tensor de tensions de Reynolds $\tau^R = -\rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'}$ a l'equació de conservació de moment, i les

tres altres restants corresponents al flux de calor turbulent $\dot{q}^R = -\rho c_p \overline{v'T'}$ que s'introdueixen a l'equació de conservació d'energia. Aquestes noves incògnites en la seva versió expandida es poden escriure com [9]:

$$\tau^R = -\rho \begin{pmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

$$\dot{q}^R = -\rho c_p \begin{bmatrix} \overline{u'T'} \\ \overline{v'T'} \\ \overline{w'T'} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

La modelització de la turbulència consisteix precisament en proporcionar equacions addicionals per resoldre les noves incògnites que s'han generat en la formulació *RANS* (tensor de tensions de Reynolds).

Aproximació Boussinesq [9]

Per tal de modelar el tensor de tensions de Reynolds es proposa utilitzar l'aproximació Boussinesq que assumeix que el tensor de Reynolds és una funció lineal dels gradients de la component mitjana de la velocitat. Per a un flux incompressible l'aproximació Boussinesq s'expressa com [9]:

$$\tau^R = -\rho \overline{v'v'} = \mu_t \left\{ \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \right\} - \frac{2}{3} \rho k I \quad (6.10)$$

on k és la energia cinètica turbulenta definida com

$$k = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{v}' \cdot \mathbf{v}'} \quad (6.11)$$

i μ_t és la viscositat turbulenta o de remolí. Llavors, amb aquesta aproximació, el càlcul del tensor de tensions de Reynolds es redueix al càlcul de l'energia cinètica turbulenta i de la viscositat turbulenta o de remolí.

Pel que fa al flux de calor turbulent es pot calcular com [9]:

$$\dot{q}^R = -\rho c_p \overline{v'T'} = k_t \nabla T \quad (6.12)$$

essent k_t la difusivitat tèrmica turbulenta.

Els diversos models de turbulència basats en l'aproximació Boussinesq es centren en definir equacions addicionals a les equacions *RANS* per poder fer el càlcul de μ_t i així tenir definit el tensor de Reynolds. Aquests models es poden classificar en quatre categories diferents [9], [50]:

- Zero-Equation Models: s'utilitza una equació algebraica per al càlcul de μ_t i no fa falta afegir cap equació diferencial a les equacions inicials.
- One-Equation Models: requereixen d'inserir en el sistema d'equacions una equació de transport diferencial per calcular μ_t .
- Two-Equation Models: fan falta dues equacions diferencials de transport addicionals per calcular μ_t . Aquests models de turbulència són els que en l'actualitat són més populars i per tant els més utilitzats en aplicacions industrials tot proporcionant solucions suficientment acurades. El primer de tots ells va ser el de $k - \varepsilon$ de Jones i Launder, i posteriorment va aparèixer el de $k - \omega$ desenvolupat per Wilcox. En tots dos casos s'han generat diverses versions i millores des de la versió inicial.
- Second-Order Closure Models: són els més costosos computacionalment, ja que introdueixen al model la resolució de cadascun dels components del tensor de Reynolds.

Tot seguit es mostren les equacions que s'han recopilat a la bibliografia, dels diversos models de turbulència que s'han utilitzat per als càlculs al llarg d'aquest capítol (tots ells són models de dues equacions).

Model de turbulència $k - \varepsilon$ estàndard [9]

Aquest model de turbulència es basa en l'aproximació Boussinesq, i defineix la viscositat turbulenta i la difusivitat tèrmica turbulenta com:

$$\begin{aligned}\mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ k_t &= \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}\end{aligned}\tag{6.13}$$

on ε és la taxa de dissipació d'energia cinètica turbulenta per unitat de massa definida com

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\mu}{\rho} \overline{\left\{ \nabla v' + (\nabla v')^T \right\} : \left\{ \nabla v' + (\nabla v')^T \right\}}$$

les dues equacions diferencials que proposa aquest model de turbulència són

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot (\mu_{eff,k} \nabla k) + P_k - \rho \varepsilon\tag{6.14}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho v \varepsilon) = \nabla \cdot (\mu_{eff,\varepsilon} \nabla \varepsilon) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}\tag{6.15}$$

$$\mu_{eff,k} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad \mu_{eff,\varepsilon} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad P_k = \tau^R : \nabla v \quad (6.16)$$

i les diverses constants per aquest model $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ i $Pr_t = 0.9$.

Modelització de la turbulència prop de les parets [9]

Quan un flux turbulent s'apropa a una paret, i per tant la velocitat del fluid s'aproxima a zero (degut a la consideració que la paret es comporta com a una paret no lliscant), les components mitjana i fluctuant de la velocitat disminueixen de manera molt ràpida tot provocant gradients molt grans de velocitat. A més a més, si es té en compte el que s'ha comentat unes línies més amunt sobre el concepte de cascada d'energia desenvolupat per Kolmogorov, arriba un punt on les tensions provocades per la turbulència s'esvaeixen degut a que la pròpia viscositat del fluid és capaç de dissipar aquesta energia cinètica turbulenta en forma de calor. Tenint això en ment, es desprèn que si es desitja resoldre el comportament de les capes de fluid més properes a la paret serà necessari utilitzar un mallat molt intensiu amb un gran nombre de cel·les.

Si es vol conèixer de manera acurada el comportament del fluid en la subcapa viscosa, es pot fer mitjançant la modelització que proporcionen els models de turbulència adaptats per a baixos nombres de Reynolds. Si per altra banda no és necessari el càlcul amb precisió del que succeeix a la zona més propera a la paret es pot utilitzar la modelització per a elevats nombres de Reynolds, com seria el cas del model de turbulència $k - \varepsilon$ que s'ha exposat unes línies més amunt. Aquest enfocament utilitzant la formulació estàndard té l'avantatge que el seu cost computacional és més baix que si s'utilitzen formulacions adaptades a baixos nombres de Reynolds, però per contra els seus resultats són menys precisos.

La distribució de velocitats de la capa límit al llarg d'una paret es pot expressar a partir de la velocitat adimensional u^+ i la distància adimensional respecte de la paret y^+ . Si es representa en una gràfica el valor de y^+ a les abscisses i u^+ a les ordenades s'obté una distribució de velocitats que es pot dividir en tres zones [30]

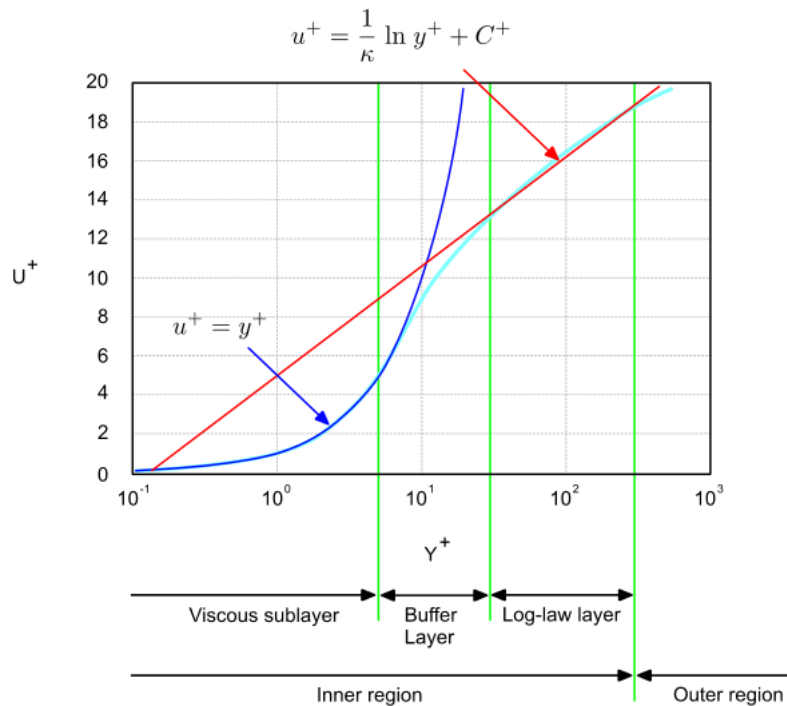


Figura 6.3.: Distribució de la velocitat adimensional u^+ en funció de la distància adimensional respecte de la paret y^+ [30]

A partir de la figura anterior es poden diferenciar tres zones en funció de la velocitat adimensional u^+ : subcapa viscosa ($0 < y^+ < 5$) on en aquesta regió la turbulència és negligible, subcapa inercial ($30 < y^+ < 200$) on els efectes de la viscositat són petits, i una capa intermèdia ($5 < y^+ < 30$) on cap dels dos efectes anteriors és negligible i tanmateix es produeix un punt de màxima producció de turbulència al voltant del punt $y^+ = 12$, essent aquesta última zona una regió on la modelització de la turbulència és molt difícil. El valor de y^+ es pot calcular com

$$y^+ = \frac{d_{\perp} u_{\tau}}{\nu} \tag{6.17}$$

d_{\perp} és la distància perpendicular a la paret

u_{τ} és la velocitat de fricció definida en funció de la tensió tallant a la paret τ_w segons l'expressió $u_{\tau} = \sqrt{\frac{|\tau_w|}{\rho}}$

ν és la viscositat cinemàtica $\nu = \mu/\rho$

A partir d'aquesta informació, segons el model de turbulència escollit per a fer les simulacions serà necessari ubicar el centre de la primera cel·la que conforma el

mallat del cas a la subcapa viscosa (models de turbulència amb baixos nombres de Reynolds), o bé ubicant el centre de la primera cel·la a la subcapa inercial per models de turbulència per alts nombres de Reynolds.

Per la zona compresa dintre de la subcapa viscosa, es pren el valor de $u^+ = y^+$, mentre que per a la subcapa inercial $u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + C^+$ on k és la constant de von Karman i pren el valor $k = 0.41$ i $C^+ = 5.25$ [9].

Si el primer punt del mallat està situat dintre de la subcapa viscosa, tal i com s'ha dit abans la turbulència en aquesta regió és negligible, el flux s'assumeix que té un comportament laminar i tanmateix que la viscositat en aquest punt pren el valor de la viscositat laminar μ , així doncs l'esforç tallant es calcula com per a un flux laminar. Les condicions de contorn que cal especificar per a la paret en el terme de producció d'energia turbulenta és $k = 0$.

De manera esquemàtica, a continuació s'aporten dues imatges on es pot veure el tractament prop de la paret segons si es fa una modelització amb models d'alts nombres de Reynolds (utilitzant funcions de paret o en anglès wall-functions) o bé resolent la subcapa viscosa:

a) Models adaptats per a baixos nombres de Reynolds: cal resoldre la capa viscosa i això implica resultats acurats, però per fer-ho cal respectar els requeriments marcats de y^+ portant associat un major cost computacional ja que el cas té més cel·les que cal analitzar.

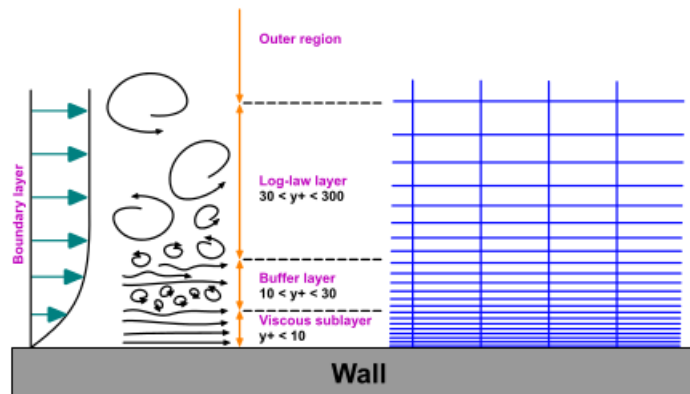


Figura 6.4.: Modelització prop de la paret, resolent la subcapa viscosa[30]

b) Models adaptats per a alts nombres de Reynolds: a l'utilitzar funcions de paret no cal fer com en el cas anterior que es resol tot el problema fins arribar a la subcapa viscosa; en aquest cas les funcions de parets fan una modelització per les cel·les que es troben dintre de la capa intermèdia i la subcapa viscosa. Aquesta simplificació o modelització implica obtenir resultats menys acurats en algunes aplicacions, com per exemple per el càlcul de transferència de calor. Així doncs, per al càlcul de la

capacitat d'assecatge d'un bufador és recomanable utilitzar la modelització de la paret adaptada per a baixos nombres de Reynolds.

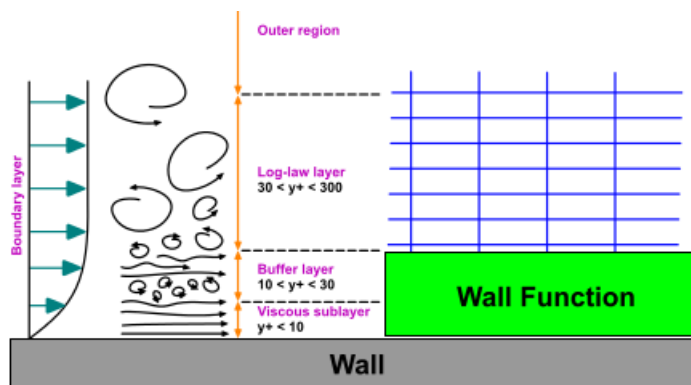


Figura 6.5.: Modelització prop de la paret, modelant la capa intermèdia i la subcapa viscosa[30]

Model de turbulència $k - \varepsilon$ adaptats a baixos nombres de Reynolds

Aquests models són un reajustament per corregir el comportament del model estàndard de $k - \varepsilon$ que s'ha vist que té un comportament dolent prop de les parets predient valors erronis de k i ε segons mesures experimentals i simulacions DNS. L'aportació d'aquests models és incorporar uns factors d'esmoreïment a diversos termes de les equacions diferencials que descriuen el comportament de les variables k i ε així com també afegint alguns termes addicionals.

Les equacions eq. 6.14, eq. 6.15 i eq. 6.16 queden afectades de la següent manera[7] i [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot (\mu_{eff,k} \nabla k) + P_k - \rho (\varepsilon + D) \quad (6.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho v \varepsilon) = \nabla \cdot (\mu_{eff,\varepsilon} \nabla \varepsilon) + f_1 C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - f_2 C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + E \quad (6.19)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6.20)$$

- Coeficients a partir de les modificacions proposades per **Launder-Sharma** [7] i [8]:

$$f_{\mu} = e^{\frac{-3.4}{\left(1 + \frac{Re_T}{50}\right)^2}} \quad (6.21)$$

$$Re_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (6.22)$$

$$f_2 = 1 - 0.3e^{-Re_T^2} \quad (6.23)$$

$$D = 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2 \quad (6.24)$$

$$E = 2\nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 \quad (6.25)$$

i la resta de coeficients $f_1 = 1$, $C_{\mu} = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$. El valor f_1 multiplica el coeficient $C_{\varepsilon 1}$ de la eq. 6.15 i el valor f_2 multiplica el coeficient $C_{\varepsilon 2}$ de la eq. 6.15.

- Coeficients a partir de les modificacions proposades per **Lam-Bremhorst** [7] i [8]:

$$f_{\mu} = \left(1 - e^{-0.0165 Re_y}\right)^2 \left(1 + \frac{20.5}{Re_T}\right) \quad (6.26)$$

$$Re_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (6.27)$$

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_{\mu}}\right)^3 \quad (6.28)$$

$$f_2 = 1 - e^{-Re_T^2} \quad (6.29)$$

$$D = 0 \quad (6.30)$$

$$E = 0 \quad (6.31)$$

i la resta de coeficients $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$. El valor f_1 multiplica el coeficient C_{ε_1} de la eq. 6.15i el valor f_2 multiplica el coeficient C_{ε_2} de la eq. 6.15.

Model de turbulència $k - \omega$ [9]

Tal com s'ha comentat abans, el model de turbulència $k - \varepsilon$ estàndard no és la opció més adequada quan en la simulació apareixen gradients adversos de pressió (augment de pressió estàtica en la direcció que té el flux) que és precisament el cas que es desitja simular (un bufador fent impactar aire a alta velocitat contra una superfície). Aquest model de turbulència és més robust en les zones properes a les parets gràcies a la seva formulació, que no pas els models $k - \varepsilon$ estàndard.

En els models de la família $k - \omega$ el que es proposa és canviar la variable ε per la variable ω (essent ω la taxa en què l'energia cinètica turbulenta es converteix en energia interna de tipus tèrmica). Aquest model va ser desenvolupat per Wilcox [51] i també consta de dues equacions diferencials que cal introduir al sistema d'equacions.

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (6.32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot (\mu_{eff,k} \nabla k) + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (6.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho v \omega) = \nabla \cdot (\mu_{eff,\omega} \nabla \omega) + C_{\alpha 1} \frac{\omega}{k} P_k - C_{\beta 1} \rho \omega^2 \quad (6.34)$$

aquest model porta associades les constants $C_{\alpha 1} = \frac{5}{9}$, $C_{\beta 1} = 0.075$, $\beta^* = 0.09$, $\sigma_{k1} = 2$, $\sigma_{\omega 1} = 2$, $Pr_t = 0.9$

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad k_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (6.35)$$

$$\mu_{eff,k} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}} \quad \mu_{eff,\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}}$$

Model de turbulència $k - \omega$, SST [9]

Aquesta adaptació feta al model més bàsic $k - \omega$ té l'avantatge que té un millor comportament a l'hora d'analitzar els efectes de fluxos amb gradients adversos de pressió.

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{Max(a_1 \omega, \sqrt{2} S_t F_2)} \quad (6.36)$$

$$a_1 = 0.31 \quad S_t = \sqrt{\left(\frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)\right) \cdot \left(\frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)\right)} \quad (6.37)$$

$$F_2 = \tanh(\gamma_2^2) \quad \gamma_2 = Max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega (d_\perp)}, \frac{500\nu}{(d_\perp)^2 \omega}\right) \quad (6.38)$$

i les modificacions fetes a les equacions eq. 6.33 i eq. 6.34 diferencials segons

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} k) = \nabla \cdot (\mu_{eff,k} \nabla k) + \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega \quad (6.39)$$

$$\tilde{P}_k = Min(P_k, c_1 \varepsilon) \quad (6.40)$$

on el paràmetre ε es calcula com s'ha expressat en la fórmula eq. 6.32

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \omega) = \nabla \cdot (\mu_{eff,\omega} \nabla \omega) + \tilde{C}_\alpha \frac{\omega}{k} P_k - \tilde{C}_\beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{\rho}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (6.41)$$

on

$$\tilde{C}_\alpha = F_1 C_{\alpha 1} + (1 - F_1) C_{\alpha 2} \quad \tilde{C}_\beta = F_1 C_{\beta 1} + (1 - F_1) C_{\beta 2} \quad (6.42)$$

$$F_1 = \tanh(\gamma_1^4) \quad \gamma_1 = Min\left(Max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega (d_\perp)}, \frac{500\nu}{(d_\perp)^2 \omega}\right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} (d_\perp)^2}\right) \quad (6.43)$$

$$CD_{k\omega} = Max\left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10}\right) \quad (6.44)$$

les constants per aquest model són $C_{\alpha 1} = 0.5532$, $C_{\beta 1} = 0.075$, $\beta^* = 0.09$, $\sigma_{k1} = 2$, $\sigma_{\omega 1} = 2$, $C_1 = 10$, $C_{\alpha 2} = 0.4403$, $C_{\beta 2} = 0.0828$, $\sigma_{k2} = 1.0$, $\sigma_{\omega 2} = 1.186$ i $Pr_t = 0.9$.

$$k_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (6.45)$$

$$\mu_{eff,k} = \mu + \frac{\mu_t}{\tilde{\sigma}_k} \quad (6.46)$$

$$\mu_{eff,\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\tilde{\sigma}_\omega}$$

$$\tilde{\sigma}_k = F_1 \sigma_{k1} + (1 - F_1) \sigma_{k2} \quad (6.47)$$

$$\tilde{\sigma}_\omega = F_1 \sigma_{\omega 1} + (1 - F_1) \sigma_{\omega 2}$$

Resum de les limitacions i característiques més destacables dels models de turbulència esmentats [13]

- Modelització utilitzant models adaptats per baixos nombres de Reynolds ($k - \varepsilon$): a l'hora de modelar la turbulència en la zona propera a una paret, i a mesura que ens anem aproximant a la subcapa viscosa, ja no és suficientment precisa l'aproximació que porta implícita la utilització de funcions de paret, tot fent necessari resoldre la subcapa viscosa. Per tal de resoldre aquesta subcapa viscosa és necessari introduir coeficients no lineals al model estàndard de turbulència a les variables k i ε per tenir en compte que en aquesta zona predomina els efectes de la viscositat. Aquests canvis en les equacions provoquen més dificultat a l'hora de resoldre les equacions que defineixen el cas, per tant més temps de càlcul, i per altra banda poden sorgir majors dificultats a l'hora de convergir resultats.

- El model estàndard $k - \varepsilon$ tendeix a proporcionar resultats amb valors més alts que els reals en zones on es produeixen importants gradients adversos de pressió, degut a que prediu valors més elevats de tensions tallants que els reals.

- El model de turbulència $k - \omega$, i en concret la variant del model anomenada $k - \omega SST$, és la que presenta un millor comportament a l'hora d'analitzar casos on es produeixin gradients adversos de pressió.

6.3.1. Determinació del valor de y^+

Una vegada vista la importància de definir fins a quin punt de refinament de malla cal arribar per obtenir resultats acurats i fiables, és necessari definir un procediment

per determinar el valor de y^+ i així saber si la dimensió de malla és adequada per el model de turbulència que s'utilitza a la simulació.

Tot i que *OpenFOAM*® disposa d'una eina per al càlcul directe del valor de y^+ , anomenada *yPlusRas*, a continuació es presenta el procediment per fer el càlcul de manera manual pas a pas, ja que en algunes simulacions tot i que teòricament s'havia de poder calcular de manera directa el valor de y^+ no ha estat possible fer-ho d'aquesta manera i ha calgut fer-ho manualment:

1. A partir d'una utilitat proporcionada per el propi software OpenFOAM® anomenada foamCalc és possible separar els vectors de velocitat del fluid de tot el domini, en les seves components u_x , u_y i u_z .
2. Dintre del post-procés realitzat amb el software Paraview es calcula la viscositat dinàmica de l'aire amb l'expressió de Sutherland [52] i [53]

$$\mu = \frac{1,458 \cdot 10^{-6} \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + 110,4} \quad (6.48)$$

3. a) La densitat del fluid per l'aproximació *Boussinesq* (és a dir per al solver *buoyantBoussinesqSimpleFoam*) es pot calcular seguint el procediment que segueix:

- Introduir al diccionari que controla l'execució del cas i que s'anomena *controlDict* les següents línies per tal de que retorni el valor de la densitat cinemàtica efectiva *rhok* (la variació en la densitat del fluid vindrà governada per canvis en la temperatura) [31]:

```
functions
{
    rhofunc
    {
        type                writeRegisteredObject;
        functionObjectLibs  ("libIOFunctionObjects.so");
        outputControl       outputTime;
        outputinterval      1;
        objectNames
        (
            "rhok"
        );
    }
}
```

Segons s'ha recollit a la bibliografia [32], en l'aproximació *Boussinesq* es considera que les variacions en la densitat del fluid són molt petites, i el que es fa és aproximar la densitat com a constant, excepte en el terme gravitatori de l'equació de conservació de la quantitat de moviment, on s'aproxima que la densitat del fluid varia segons l'expressió

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta (T - T_0)) \quad (6.49)$$

on ρ_0 i T_0 son la densitat i la temperatura de referència, i β és el coeficient d'expansió tèrmica.

El valor que retorna el text que s'ha escrit unes línies més amunt es correspon a $\rho_k = 1 - \beta (T - T_0)$ [31], tal i com es pot llegir en el diccionari *createFields.H* dintre del grup de solucionaris de la família de transferència de calor del propi software. A partir d'aquí es pot concloure que la densitat es pot calcular com $\rho = \rho_0 \rho_k$.

b) Si no es fa servir l'aproximació de *Boussinesq*, aleshores correspon introduir al diccionari *controlDict* les següents línies:

```
functions
{
    rhofunc
    {
        type                writeRegisteredObject;
        functionObjectLibs  ("libIOFunctionObjects.so");
        outputControl       outputTime;
        outputinterval      1;
        objectNames
        (
            "rho"
        );
    }
}
```

En aquest cas, el valor de *rho* ja és la densitat ρ del fluid.

4. L'esforç tallant del fluid, a la paret on es vol calcular el valor de y^+ es calcula (les coordenades de les simulacions es considera la direcció vertical com la coordenada y i la direcció horitzontal com la coordenada x): [52]

$$\tau_{paret} = \tau_{(y=0)} = \mu \cdot \left. \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (6.50)$$

5. La velocitat de fricció a la paret: [9] i [30]

$$u_\tau = \sqrt{\frac{|\tau_{paret}|}{\rho}} \quad (6.51)$$

6. Finalment el valor de y^+ s'extreu a partir de: [9] i [30]

$$y^+ = \frac{\rho \cdot u_\tau \cdot y_\perp}{\mu} \quad (6.52)$$

Per tal de mostrar els resultats del valor de y^+ , si s'empra la funció *yPlusRas* ja integrada dintre de OpenFOAM® cal representar el valor d'aquesta variable que crea el propi software just a la paret (cota $y = 0$); si per altra banda s'opta per utilitzar el procediment manual, aleshores s'ha de representar el resultat de la variable calculada manualment y^+ en el centre de la primera cel·la més propera a la paret on es vol calcular el coeficient de transferència de calor per convecció.

6.3.2. Definició dels paràmetres de turbulència a les diverses condicions de contorn

En aquest apartat s'explica quines són les condicions de contorn que s'han aplicat per estudiar la transferència de calor per convecció d'un bufador de ranura. Tot mirant a la fig. 6.7, es pot veure com en el cas que és objecte d'estudi hi ha bàsicament una entrada al domini que és la ranura del bufador que impulsa aire a velocitats elevades *inlet*; les parets ja siguin d'impacte o bé de confinament *wall*; i finalment la sortida del fluid del domini *outlet*.

6.3.2.1. Entrada al domini (inlet)

Energia cinètica turbulenta

L'energia cinètica turbulenta que entra en el domini es pot calcular segons l'expressió [49]

$$k = \frac{1}{2} (u_i'^2 + v_j'^2 + w_k'^2) \quad (6.53)$$

Pel que fa a la component fluctuant de la velocitat $v' = u_i' + v_j' + w_k'$, es pot estimar a partir de la velocitat mitjana d'entrada al domini i de la intensitat de turbulència que pot prendre els valors de la taula. 6.1.

	Baixa	Mitjana	Alta
I (%)	1	5	10

Taula 6.1.: Intensitat de turbulència [30]

El recull de valors d'intensitat de turbulència per un bufador d'aire que s'ha recollit a la bibliografia [4], [11], [12], [8] coincideixen amb el fet de prendre una intensitat igual a un 2%.

A partir de eq. 6.53 i de la intensitat de turbulència recollida a les fonts citades, es pot imposar el valor que proporciona l'equació que segueix, o bé imposant directament la intensitat de turbulència igual al valor escollit.

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} \cdot I)^2 = \frac{3}{2} (U_{ref} \cdot 0.02)^2 \quad (6.54)$$

Implementació amb OpenFOAM®:

```
type      turbulentIntensityKineticEnergyInlet
intensity  2%
```

Taxa de dissipació d'energia turbulenta

En funció de si el model de turbulència seleccionat per a la simulació està basat en la família $k - \varepsilon$ o bé $k - \omega$, farà falta calcular la variable ε (taxa de dissipació de turbulència) o bé ω (freqüència de turbulència).

- Models de la família $k - \varepsilon$ [49]

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{l} \quad (6.55)$$

C_μ és un paràmetre que depèn del model de turbulència escollit

k és l'energia cinètica turbulent calculada segons eq. 6.53

l és la longitud d'escala

Implementació amb OpenFOAM®:

```
type      turbulentMixingLengthDissipationRateInlet
mixingLength  0.09W
```

- Models de la família $k - \omega$ [49]

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} l} \quad (6.56)$$

El software OpenFOAM® està basat en longitud de mescla, a diferència d'altres softwares que utilitzen la longitud d'escala. A partir de la bibliografia [14], aquesta variable es pot calcular com segueix

Tipus de bufador	de ranura (plane jet)	circular (round jet)
l/W	0.09	0.075

Taula 6.2.: Longitud de mescla l

on W és l'amplada del bufador, i que es mostra a la fig. 6.7

Implementació amb OpenFOAM®:

```
type      turbulentMixingLengthFrequencyInlet
mixingLength  0.09W
```

6.3.2.2. Sortida del domini (outlet) [9]

El valor que pren la variable depèn del valor que té la mateixa variable aigües amunt, així que la informació en aquesta condició de contorn de sortida depèn de la informació continguda en els nodes situats en el seu voltant. S'aplica la condició de que el gradient perpendicular a la condició de contorn sigui igual a zero $\partial\phi/\partial n = 0$.

Implementació amb OpenFOAM®:

```
type zeroGradient
```

6.3.2.3. Cara anterior i posterior del domini (empty)

Amb la intenció de reduir el temps de càlcul necessari per resoldre les simulacions que incorporen transferència de calor associada a un bufador de ranura, s'opta per fer una simulació en dues dimensions del model que es vol estudiar. Tot i que la geometria que s'introdueix al programa és un dibuix en 3 dimensions, es configuren les superfícies anterior i posterior del bufador amb la tipologia 'empty'. D'aquesta manera, tot i que s'hagi donat gruix a la geometria, l'anàlisi que es fa és un 2D.

Implementació amb OpenFOAM®:

```
type empty
```

6.3.2.4. Parets

Tal com s'ha dit més amunt, per resoldre el cas de manera més acurada és millor utilitzar les formulacions dels models de turbulència adaptats per a baixos nombres de Reynolds tot resolent la subcapa viscosa. Tot seguit es mostren les diverses opcions disponibles i com definir les condicions de contorn.

Modelització utilitzant funcions de paret adaptades a baixos nombres de Reynolds [9]

- Models de la família $k - \varepsilon$

L'energia cinètica turbulenta a la paret k_w :

$$k_w = 0 \tag{6.57}$$

Taxa de dissipació d'energia turbulenta a la paret ε_w :

$$\varepsilon_w = 2 \frac{\nu k}{(d_\perp)_c^2} \tag{6.58}$$

Implementació amb OpenFOAM®:

Terme k_w :

```
type kLowReWallFunction
```

Terme ε_w :

```
type epsilonLowReWallFunction
```

- Models de la família $k - \omega$

L'energia cinètica turbulent a la paret k_w :

$$k_w = 0 \tag{6.59}$$

Taxa de dissipació d'energia turbulenta a la paret ω_w :

$$\omega_w = 10 \frac{6\nu}{C_{\beta 1} (d_{\perp})_c^2} \tag{6.60}$$

Implementació amb OpenFOAM®:

Terme k_w :

```
type kLowReWallFunction
```

Terme ω_w :

```
type omegaWallFunction
```

Modelització sense utilitzar funcions de paret, i amb l'adaptació per a baixos nombres de Reynolds

- Models de la família $k - \varepsilon$ [7] i [13]

L'energia cinètica turbulent a la paret k_w :

$$k_w = 0 \tag{6.61}$$

Taxa de dissipació d'energia turbulenta a la paret ε_w (per l'adaptació del model $k-\varepsilon$ feta per Lam-Bremhorst):

$$\varepsilon_w = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 \quad (6.62)$$

Taxa de dissipació d'energia turbulenta a la paret ε_w (per l'adaptació del model $k-\varepsilon$ feta per Launder-Sharma):

$$\varepsilon_w = 0 \quad (6.63)$$

Implementació amb OpenFOAM®:

Terme k_w :

```
type    fixedValue
value   uniform 0
```

Terme ε_w (Lam-Bremhorst):

```
type    zeroGradient
```

Terme ε_w (Launder-Sharma):

```
type    fixedValue
value   uniform 0
```

- Models de la família $k-\omega$ [9] i [30]

L'energia cinètica turbulenta a la paret k_w :

$$k_w = 0 \quad (6.64)$$

Taxa de dissipació d'energia turbulenta a la paret ω_w :

$$\omega_w = 0 \quad (6.65)$$

Implementació amb OpenFOAM®:

Terme k_w :

```
type    fixedValue
value   uniform 0
```

Terme ω_w :

```
type    fixedValue
value   uniform 0
```

6.4. Escollir el solucionador adequat per a l'estudi

Dintre del llistat de famílies de solucionadors que ofereix OpenFOAM® hi ha una família que està especialment indicada per a casos on es produeixi transferència de calor i on també hi hagi moviment del fluid degut a la seva pròpia diferència de densitat “heat transfer and buoyancy-driven flows”.

Dintre d'aquest grup, distingeix entre els solucionadors on s'analitza exclusivament la part corresponent al fluid (únicament dominis de tipus fluid) i entre els que és possible simular a més a més la transferència de calor entre un fluid i un sòlid (combinació de dominis de tipus fluid i de tipus sòlid). Aquest últim grup és el que més s'adapta als objectius especificats anteriorment, ja que es vol analitzar quin és el coeficient de transferència de calor per convecció entre un fluid i un sòlid.

Les possibilitats que hi ha disponibles es llisten a continuació:

- *buoyantBoussinesqPimpleFoam*: simulació en estat transitori per fluids turbulents, incompressibles i té en compte l'efecte de l'estratificació tèrmica del fluid.
- *buoyantBoussinesqSimpleFoam*: simulació en estat estacionari per fluids turbulents, incompressibles i té en compte l'efecte de l'estratificació tèrmica del fluid.
- *buoyantPimpleFoam*: simulació en estat transitori per fluids turbulents, compressibles i que té en compte l'efecte d'estratificació tèrmica del fluid, especialment indicat per casos de ventilació i transferència de calor.
- *buoyantSimpleFoam*: simulació en estat estacionari per fluids turbulents, compressibles i que té en compte l'efecte d'estratificació tèrmica del fluid.
- *chtMultiRegionFoam*: simulació en estat transitori de la transferència de calor que es produeix entre una regió sòlida i una regió fluídica.
- *chtMultiRegionSimpleFoam*: versió en estat estacionari del “*chtMultiRegionFoam*”.

Els bufadors més comuns a les màquines que són objecte d'aquest estudi consisteixen en bufadors de ranura d'un sol llavi amb un gruix de “ a mm”, amb una velocitat de l'aire que oscil·la entre “ V_1 m/s” i “ V_2 m/s”.

Les temperatures estàndard màximes de disseny són de “ T_1 °C” per l'assecatge entre tinters i “ T_2 °C” per l'assecatge al túnel.

Sota aquestes condicions més típiques de treball el fluid a la sortida del llavi estarà en règim turbulent, per tant cal activar un model de turbulència a l'hora de configurar les simulacions.

Més endavant es comprovarà la diferència en els resultats (valor del coeficient de transferència de calor) si es té en compte o no la compressibilitat del fluid; és a dir, usant el solucionador *buoyantSimpleFoam* o bé *buoyantBoussinesqSimpleFoam* respectivament.

S'inicien les simulacions considerant que el flux és incompressible (número de Mach < 0.3) i que el fluid també és incompressible (variació negligible de la densitat del fluid, degut als canvis en la pressió) a partir de la aproximació Boussinesq on es fa la simplificació aplicada a la densitat del fluid que ja s'ha explicat en l'apartat anteriorment on es definia com fer el càlcul de y^+ .

6.5. Plantejament de les simulacions amb OpenFOAM

Tota la informació referent a la configuració de les simulacions amb OpenFOAM per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció d'un bufador de ranura, s'ha adjuntat a l'annex annex. E.

En l'annex mencionat, es fa un recorregut a través de les condicions de contorn que s'han utilitzat a l'hora de definir el cas, s'explica com s'han definit les propietats el fluid de treball i com s'han seleccionat els models de turbulència (la modelització de turbulència que es mostra a l'annex es correspon al model Lam Bremhorst $k - \varepsilon$ ja que és la que ha proporcionat els resultats més ajustats en relació al coeficient de transferència de calor per convecció), la discretització de les equacions diferencials, els paràmetres de control per a l'execució de la simulació, i finalment també es fa una descripció del mallat.

6.6. Introducció a la transferència de calor per convecció, mitjançant convecció forçada

El fet d'utilitzar bufadors de gas que impulsen aire a alta velocitat i en direcció perpendicular contra una superfície amb l'objectiu d'afavorir la transferència de calor entre aquest aire que impulsa el bufador i la pròpia superfície d'impacte és una tècnica molt utilitzada en la indústria per a processos d'escalfament, refredament o d'assecatge.

Aquests bufadors consisteixen típicament en un sol orifici (no té per què ser necessàriament circular) o bé una ranura, tot i que també és possible realitzar agrupaments d'aquestes disposicions elementals formant una estructura repetitiva. En el cas objecte d'estudi d'aquesta tesi, s'estudia la capacitat d'assecatge dels bufadors de ranura que porten incorporats les màquines impressores flexogràfiques; de manera general, una pantalla d'assecatge consisteix en un bufador de ranura de pocs mil·límetres d'amplada i d'aproximadament un metre de llargada (aquesta llargada depèn de l'amplada del material que el client utilitza per a la impressió); aquestes pantalles es col·loquen separades entre elles de manera consecutiva en el sentit d'avanç del material que s'està imprimint. El fluid que s'utilitza en aquestes màquines és aire impulsat a alta temperatura (" T_1 °C" a tinters, i " T_2 °C" al túnel) i a alta

velocitat (típicament de " $V_1 m/s$ "), a través d'una sola ranura de " $a mm$ " o bé de dues ranures de " $\frac{a}{2} mm$ " cadascuna. La separació vertical que hi ha entre el substrat i la superfície que es desitja assecar (evaporar el solvent contingut en la tinta) és de " $b mm$ " entre tinters i de " $b' mm$ " al túnel d'assecatge. La velocitat del material que cal tractar pot assolir velocitats de fins a $500m/min$.

Segons s'ha recollit de la bibliografia [3] es pot dividir la regió del fluid procedent d'un bufador en diverses subregions:

- Sortida del bufador: la sortida de l'aire del bufador d'amplada W es considera que té un comportament turbulent, però que el gas surt a una velocitat uniforme al llarg de tota l'amplada de la ranura.
- Nucli potencial: és la zona en què la velocitat del raig d'aire es manté igual a la velocitat que tenia l'aire en el moment de sortir del bufador. A mesura que ens allunyem de la boca de sortida, aquesta zona de velocitat uniforme tendeix a reduir-se.
- Zona de jet lliure: Una part de l'aire que ha sortit del jet tendeix a interaccionar amb l'ambient que l'envolta i això provoca que l'amplada del raig augmenti a mesura que aquest s'allunya de la zona de sortida. Aquesta expansió comporta una disminució de la velocitat de l'aire, i també que aquesta no es mantingui uniforme, a diferència del que passa a la zona del nucli potencial. En aquesta regió la velocitat màxima del fluid està situada just al centre del jet, i a mesura que ens allunyem d'aquest punt la velocitat va disminuint.
- Zona d'estancament o d'incidència: Aquesta regió es veu influenciada per la interacció del fluid amb la superfície d'incidència. Degut a aquest xoc el fluid desaccelera en la direcció normal (z) i conseqüentment s'accelera en la direcció perpendicular a aquesta (r en cas de tractar-se un bufador amb sortida circular, o bé x en cas de tractar-se d'un bufador de ranura). En aquesta regió el flux produeix un augment de la pressió estàtica sobre la superfície d'incidència i aquest efecte es trasllada aigües amunt del fluid. El punt d'estancament està situat just al centre del punt d'impacte del jet.
- Zona de raig de paret: El flux una vegada ha xocat contra la superfície d'incidència, pren la direcció transversal i tendeix a desaccelerar-se a mesura que s'allunya de la zona d'incidència o estancament. La component de velocitat en aquesta nova direcció passa per un valor on assoleix el seu màxim i posteriorment va disminuint de manera progressiva.

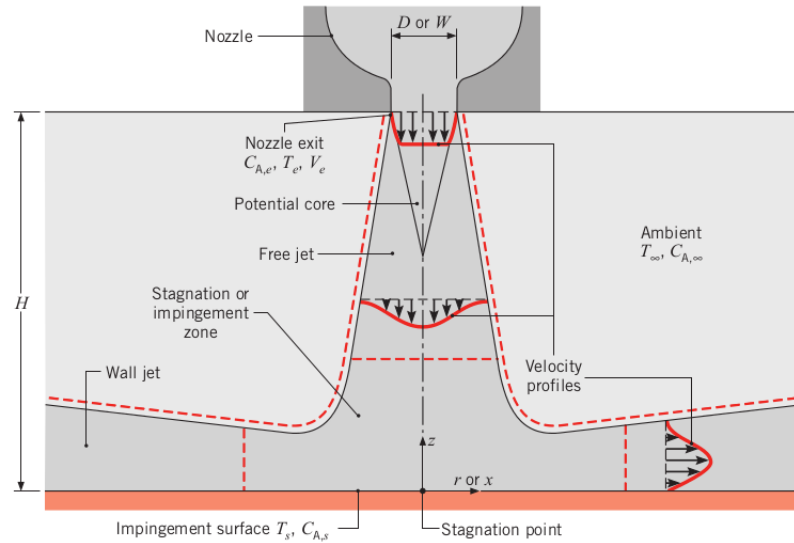


Figura 6.6.: Diferenciació de les diverses regions que apareixen en un bufador [3]. H , és la separació vertical entre el substrat i el bufador. W , és l'amplada del bufador.

6.7. Bufadors d'una sola ranura

6.7.1. Dades experimentals recopilades a partir de la bibliografia, validació del cas $Re=10.400$ i $H/W=2,6$ amb confinament

A partir de la recerca que s'ha fet a la bibliografia especialitzada s'ha comprovat que, tot i que hi ha un alt nombre d'estudis que centren la seva atenció en la caracterització de la transferència de calor d'un bufador de ranura que impulsa aire a una velocitat elevada i que es fa impactar aquest aire contra una superfície que es desitja escalfar o bé refredar, són poques les dades experimentals que hi ha disponibles per poder-les prendre com a referència amb l'objectiu de correlacionar els resultats extrets mitjançant simulació amb els obtinguts experimentalment.

Uns resultats que són citats de manera molt recurrent en diverses revistes especialitzades, són els que aporta Heiningen [6] en la seva tesi doctoral. Tot i que els resultats recopilats de manera experimental per aquest autor s'han obtingut sota unes condicions de treball lleugerament diferents de les que es produeixen en les impressores flexogràfiques en condicions normals de servei, serviran per tenir-les com a referència a l'hora d'ajustar els paràmetres dels models emprats mitjançant simulació computacional.

Per tal de reproduir els valors experimentals proporcionats per [6], es prepara una simulació en base al mateix disseny proposat per [4] on estudia l'ajust entre dades experimentals i dades obtingudes per simulació tot utilitzant diversos models de turbulència.

El cas que s'estudia és el d'una geometria de bufador de ranura amb confinament, on el fluid queda delimitat per una paret inferior que es troba a temperatura constant (que és sobre la qual es fa incidir l'aire provinent del bufador) i una paret paral·lela a la inferior situada a una alçada igual a la distància vertical a la que es troba el bufador (aquesta paret també es considera a una temperatura constant).

Descripció geomètrica del cas que es simula:

L'estudi consisteix en simular quina és la transferència de calor per convecció que proporciona un bufador de ranura amb una amplada W , del qual surt aire a una temperatura constant de $300K$ i a una velocitat a la que li correspon un nombre associat de Reynolds $Re = 10400$, i que impacta contra una superfície isoterma que està a una temperatura de $310K$, i que es troba separada a una distància vertical H respecte del bufador.

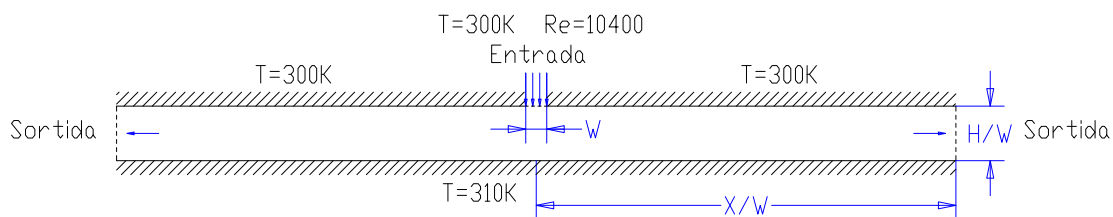


Figura 6.7.: Geometria del cas analitzat, per validar les dades experimentals aportades experimentalment per [6] i recopilades per [4]

Les dimensions de la geometria del cas que es mostra a la fig. 6.7 són: $W = 3mm$, $H/W = 2,6 \rightarrow H = 7,8mm$ i $X/W = 50 \rightarrow X = 150mm$. Les mides s'han normalitzat a partir de la dimensió del llavi W (la distància horitzontal i la separació vertical del domini que s'estudia estan referenciats segons l'amplada del llavi).

Segons es comenta en l'anàlisi de [7], a partir de l'estudi fet per [6] la longitud X/W del domini que es té en compte a la simulació no té una influència de caràcter rellevant en l'anàlisi de la transferència de calor en la zona d'impacte de l'aire que surt del bufador ni en les seves regions més properes. En el seu estudi, es porta a terme la simulació amb una longitud del domini $X/W = 25$.

A partir del nombre de Reynolds que s'imposa a l'entrada es calcula la velocitat de l'aire quan surt del bufador; en aquest cas es considera que la velocitat de sortida només té component vertical, i que aquesta està uniformement distribuïda al llarg

de tota l'amplada del llavi (s'adopta aquesta distribució de velocitats amb l'objectiu d'evitar haver de definir una nova condició de contorn amb un perfil de velocitats parabòlic, ja que aquesta opció no ve implementada per defecte en el programari de simulació). El valor de Re per un bufador de ranura es pot calcular a partir de l'expressió $Re = \frac{VW}{\nu}$, on V és la velocitat de sortida de l'aire a la ranura, W és l'amplada de la ranura, i ν és la viscositat cinemàtica del fluid. Per el càlcul de ν es pren el valor corresponent a la temperatura mitjana entre la paret superior del domini (que té la mateixa temperatura que l'aire que surt del bufador) i la paret inferior contra la qual impacta l'aire del bufador; per una temperatura mitjana de $305K$ li correspon $\nu = 1,6224 \cdot 10^{-5} m^2/s$, i fent el càlcul corresponent s'obté que la velocitat de l'aire a la sortida del bufador és de $V = 56,24 m/s$.

Mallat de la geometria:

Per a la resolució del cas és necessari dividir el volum total que es vol analitzar en petits volums o cel·les on el programari de simulació porta a terme els càlculs (aquest procediment es coneix com a mallat).

És necessari poder controlar de manera molt precisa aquest mallat, tot variant el nombre de cel·les que defineixen el cas, per poder arribar a un nivell de precisió suficient com per a considerar que els resultats són acurats; així doncs cal considerar parametritzar el mallat de manera que sigui fàcil i ràpid canviar-lo i ajustar-lo convenientment i aconseguir així un refinament o mallat més dens en aquelles zones on sigui necessari per capturar de manera acurada el comportament del fluid. Tot seguit es mostra com s'ha dividit el cas en diverses regions, per poder controlar el mallat:

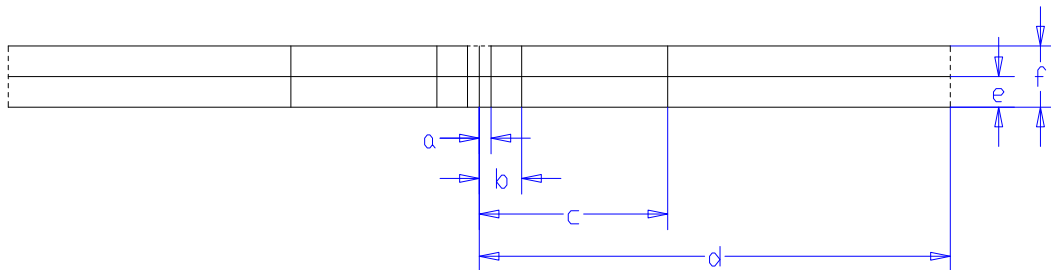


Figura 6.8.: Divisió del domini general en diverses zones per a la generació del mallat per un bufador d'una sola ranura

De la fig. 6.8 la cota $2a$ es correspon amb l'obertura del llavi W , i la cota f és la separació vertical H que hi ha entre la sortida del llavi i la superfície d'impacte. Les dimensions de les altres cotes, així com el nombre de divisions per a cada cota, s'especifiquen a la taula. 6.6.

Càlcul del nombre de Nusselt en les simulacions:

Per al càlcul de valor del nombre de Nusselt (valor adimensional) a la superfície d'impacte, es parteix de la formulació proposada per [4]

$$Nu = \frac{[\partial T / \partial y]_w}{(T_w - T_{in}) / W} \quad (6.66)$$

on $[\partial T / \partial y]_w$ és el gradient de temperatura que experimenta el fluid en direcció perpendicular a la paret contra la qual impacta el raig d'aire provinent del bufador (coordenada y en les simulacions que s'han realitzat).

T_w és la temperatura de la superfície d'impacte del jet d'aire

T_{in} és la temperatura de l'aire quan surt del bufador

W ja s'ha definit anteriorment i és l'amplada del bufador

Càlcul del coeficient de transferència de calor per convecció en les simulacions:

Una vegada calculat el nombre de Nusselt, és possible calcular el valor del coeficient de transferència de calor per convecció segons la fórmula que segueix

$$h = \frac{Nu \cdot k}{W} \quad (6.67)$$

essent k la conductivitat tèrmica del fluid

El coeficient h s'expressa en les unitats $[W/m^2K]$

Dades experimentals recopilades a la bibliografia:

És necessari obtenir una equació que relacioni el valor experimental del nombre de Nusselt amb la distància horitzontal respecte de la zona central del bufador, per així poder valorar l'error que es comet mitjançant simulació quan s'utilitza un o altre model de turbulència, respecte dels resultats aportats per Heiningen.

S'opta per realitzar un ajustament polinòmic d'aquestes dades, i s'arriba a un ajust que representa fidelment les dades experimentals tot utilitzant una expressió polinòmica. Els valors dels coeficients es mostren a la taula que segueix:

$$Nu_{\left(\frac{x}{W}\right)} = \sum_{i=0}^{i=14} C_i \cdot \left(\frac{x}{W}\right)^i \quad (6.68)$$

C_0	$4,568521 \cdot 10^1$	C_5	$-6,460949$	C_{10}	$1,948958 \cdot 10^{-4}$
C_1	$-5,300161$	C_6	$1,793885$	C_{11}	$-7,919153 \cdot 10^{-6}$
C_2	$-5,506740$	C_7	$-3,200337 \cdot 10^{-1}$	C_{12}	$2,105824 \cdot 10^{-7}$
C_3	$-9,470577$	C_8	$3.886465 \cdot 10^{-2}$	C_{13}	$-3,301876 \cdot 10^{-9}$
C_4	$1,308486 \cdot 10^1$	C_9	$-3,291633 \cdot 10^{-3}$	C_{14}	$2,315023 \cdot 10^{-11}$

Taula 6.3.: Coeficients del polinomi de grau 14, per als resultats experimentals del número de Nu , $Re = 10.400$, $H/W = 2,6$ per el rang de distàncies normalitzades ($\frac{X}{W} \leq 20$)

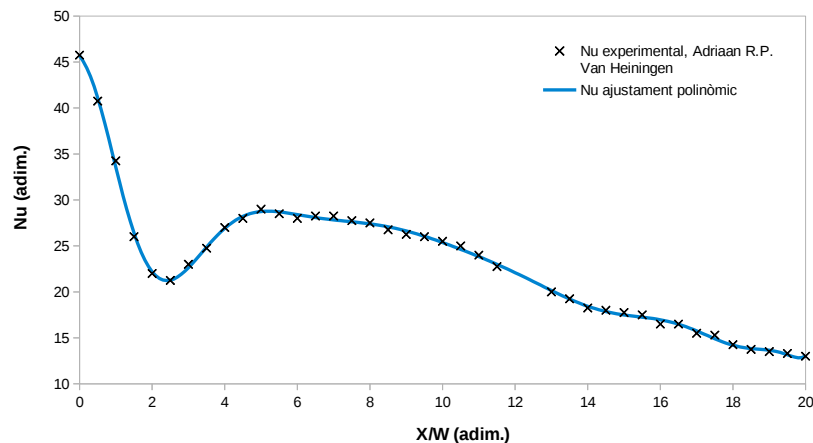


Figura 6.9.: Ajustament entre dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] resumides per A. Oliva i altres [4], i l'expressió polinòmica ajustada a les dades.

Si es comprova l'error mitjançant la desviació quadràtica mitjana o *RMSE* expressada segons la eq. 6.69, s'obté un valor de 0,266 (quan més proper a zero sigui aquest valor, millor ajust entre les dues sèries de dades). A partir d'aquest resultat, es pren el valor ajustat via equació polinòmica com a referència per comprovar l'ajust entre els resultats experimentals i els resultats que s'obtenen mitjançant simulació amb *OpenFoam*®.

6.7.1.1. Estudi dels resultats obtinguts utilitzant els diversos models de turbulència ($H/W=2.6$, $Re=10400$, amb el solucionador *buoyantBoussinesqSimpleFoam*)

En aquest apartat es comprova d'entre els diversos models de turbulència que hi ha disponibles a *OpenFoam*®, quin d'ells s'ajusta millor (en tant que presenta una

menor desviació) respecte de l'equació polinòmica amb coeficients que s'ha aportat en l'apartat anterior. Això permet validar el model utilitzat en la simulació, de manera que més tard aquest model pugui ésser utilitzat per a l'estudi d'altres condicions de treball diferents de les dades experimentals tabulades.

L'anàlisi es porta a terme tot utilitzant un mateix mallat per a tots els casos amb l'objectiu que d'aquesta manera tots es resultats siguin comparables entre ells. Això comporta realitzar un mallat del cas suficientment fi com per què sigui apte per poder poder ésser analitzat amb models de turbulència adaptats a baixos nombres de Reynolds, fet que comportarà que en les simulacions que s'utilitzen els models de turbulència $k - \varepsilon$ i $k - \omega$ que no han estat ideats per a resoldre la subcapa viscosa i que per els quals s'utilitzen funcions de paret, el mallat serà més refinat del que seria necessari tot comportant un major temps de càlcul per a la resolució dels casos.

Les dades utilitzades per el mallat dels diversos casos analitzats en aquest apartat es corresponen amb el mallat n^o 6 de la taula. 6.6.

Ajust entre simulació i resultats experimentals

L'indicador utilitzat per valorar l'error obtingut entre les dades experimentals disponibles i els resultats obtinguts per simulació, és la desviació quadràtica mitjana *RMSE*

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs,i} - x_{model,i})^2}{n}} \quad (6.69)$$

on $x_{obs,i}$ són els valors observats experimentalment i $x_{model,i}$ són els valors obtinguts via simulació, per a cada parella de valors continguda dintre l'interval de distància considerada $X/W = 20$ respecte del centre del bufador.

Tot seguit es comparen els resultats del nombre de Nusselt obtinguts per a diversos models de turbulència, amb les dades aportades per Van Heiningen, i d'entre tots ells s'escull aquell model que presenta un menor error entre experiments i simulacions.

- Model de turbulència $k - \varepsilon$

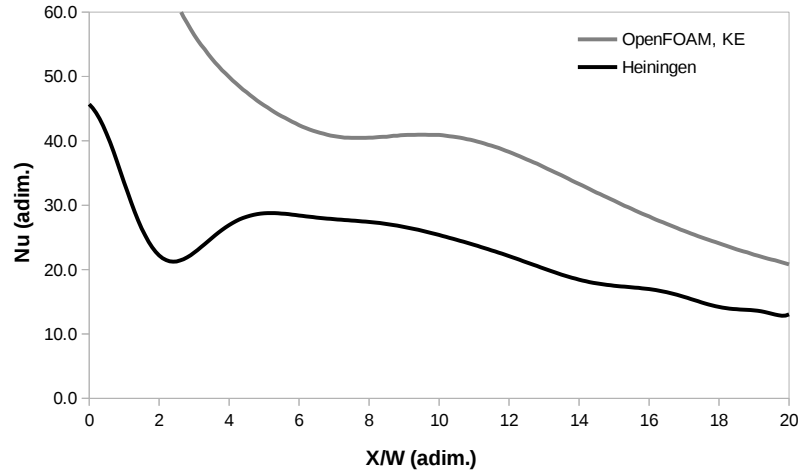


Figura 6.10.: Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k - \varepsilon$

Aquest model de turbulència pensat per a alts nombres de Reynolds, és el que proporciona valors de Nusselt més distants respecte dels valors experimentals de què es disposa a la bibliografia. Aquesta divergència és molt accentuada sobretot a la zona on hi ha un gradient advers de pressió més gran, que correspon amb la zona on el raig d'aire incideix perpendicularment contra la superfície d'impacte contra la que es produeix l'intercanvi de calor on arriba a triplicar el valor experimental (en aquest cas, el resultat extret via simulació arriba a un màxim de 144 a aquesta zona, mentre que el resultat experimental és 45.7).

Tal i com es cita a la bibliografia [3] per distàncies H/W més petites que 5 apareix un segon pic, que amb el model $k - \varepsilon$ es deixa intuir però de manera molt sensible, i que està molt desplaçat (situat a $9,5W$) horitzontalment respecte del segon pic experimental (situat a $5,2W$).

-Model de turbulència $k - \varepsilon$, adaptació per a baixos nombres de Reynolds, Launder Sharma

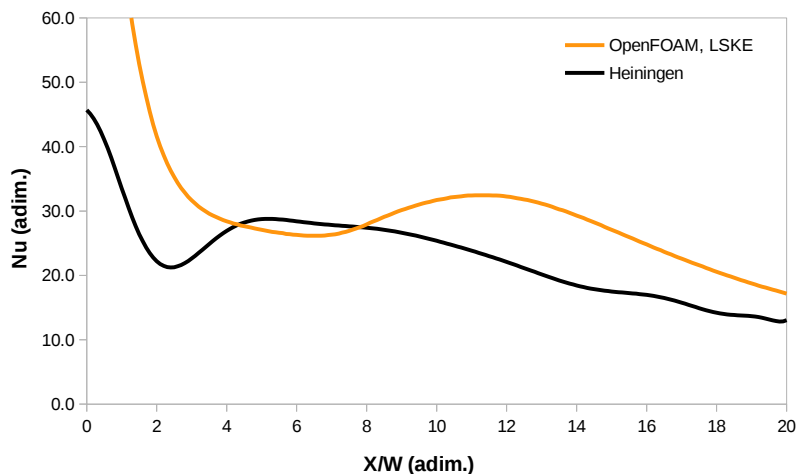


Figura 6.11.: Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k - \varepsilon$, LS

El comportament amb aquest model és molt similar a l'anterior tot proporcionant en general valors més elevats del número de Nusselt en tota la regió analitzada, però presenta dues lleugeres diferències: en primer lloc, el valor del coeficient Nusselt a la zona d'impacte és encara més alt que el proporcionat per el model $k - \varepsilon$ estàndard (amb aquest model adaptat per a baixos nombres de Reynolds pren el valor de 220). Per altra banda, el segon màxim local apareix de manera més destacada i a una distància horitzontal encara una mica més allunyada de la zona d'impacte que en el cas anterior, i igual a $11,3W$, tot i que aquest segon pic té un valor més baix i més pròxim al valor real experimental.

-Model de turbulència $k - \varepsilon$, adaptació per a baixos nombres de Reynolds, Lam-Bremhorst

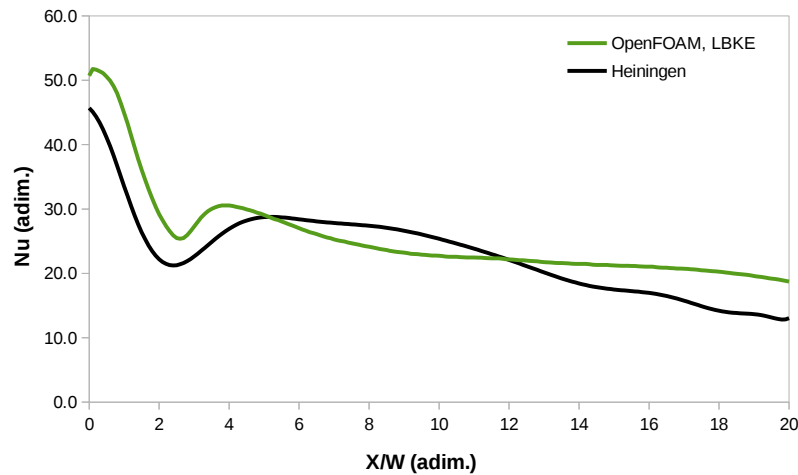


Figura 6.12.: Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k - \varepsilon$, *LB*

D'entre tots els models de turbulència que s'han utilitzat per aquestes simulacions, aquest és el que presenta un millor comportament en general. La simulació proporciona dos pics, el de la zona d'impacte i el de la zona local; en primer lloc el pic de la zona d'impacte és molt pròxim al valor mesurat essent el valor obtingut mitjançant simulació de 50,69 (enfrent dels 45,7 reals), i el màxim local és de 30,6 a una distància $x/W = 3.9$ en contraposició del valor experimental 28,8 a una distància $x/W = 5.2$. Pel que fa al mínim local, tant el seu valor com la seva posició són molt propers als valors reals 25,38 a una distància $x/W = 2,6$ en comparació al valor de la bibliografia 21,2 a una distància $x/W = 2,4$.

- Model de turbulència $k - \omega$, SST

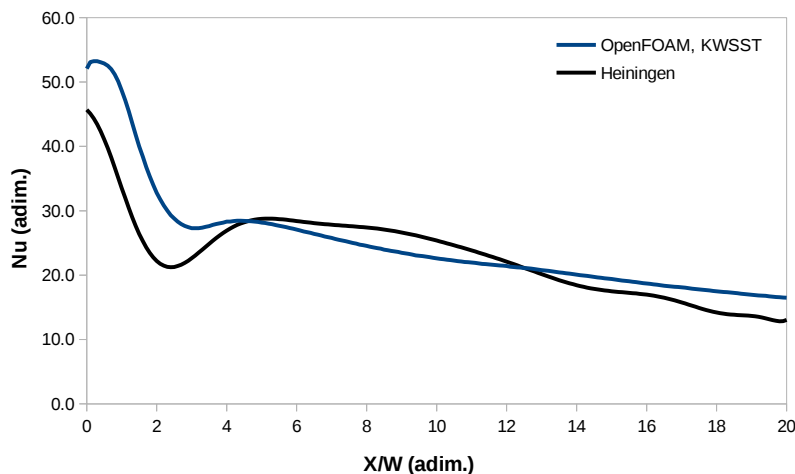


Figura 6.13.: Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k\omega$, SST

Es pot veure com els resultats recollits utilitzant aquest model de turbulència presenten el comportament que s'havia introduït a la teoria; el fet de treballar amb el model $k - \omega$ aporta una gran millora respecte del model $k - \varepsilon$ a l'hora d'avaluar correctament el número de Nusselt a la zona d'impacte del jet d'aire, ja que el valor predit per aquest model és molt més pròxim al valor experimental (52,1 enfront a 45,7). En aquest cas, el màxim local també apareix però de manera menys marcada, i a diferència del model $k - \varepsilon$ amb l'adaptació per a baixos Reynolds de Lam-Bremhorst, la utilització del model $k - \omega$ proporciona un valor més ajustat de la posició i del valor d'aquest pic; el màxim local és de 28,4 a una distància $x/W = 4,4$.

Recull i anàlisi de resultats dels diversos models de turbulència:

	$k - \omega$, SST	$k - \varepsilon$, LB	$k - \varepsilon$, LS	$k - \varepsilon$	Van Heiningen [4]
y^+	0.0047	0.218	0.229	0.204	----
RMSE	4.86	4.64	21.22	26.84	----
Nu_{mig}	25.0	25.5	33.3	43.9	23.1

Taula 6.4.: Comparativa de resultats entre els diversos models de turbulència assaats, $H/W = 2, 6$, $Re = 10.400$ (valor de y^+ proporcionat per la funció *yPlusRas*)

Després d'analitzar els quatre models de turbulència es pot comprovar com el model de turbulència $k - \varepsilon$ per a alts nombres de Reynolds és el que presenta un comportament més distant respecte dels valors experimentals disponibles del nombre de Nusselt tot proporcionant uns valor més alts sobretot a la zona on hi ha un gradient advers de pressió màxim, que coincideix amb la zona on es produeix l'impacte del jet d'aire amb la superfície que es desitja refredar; així doncs, la utilització d'aquest model de turbulència estàndard queda descartat des d'un primer moment.

D'entre els dos models de turbulència que presenten un millor comportament, és a dir el $k - \omega$, SST i el $k - \varepsilon$, LB s'escull com a millor opció per a la realització de les simulacions el model $k - \varepsilon$, LB ja que aquest detecta de manera més accentuada el segon pic corresponent al màxim local.

6.7.1.2. Comparativa de resultats considerant fluid-compressible o fluid-incompressible

En aquest punt es realitza una comparativa del valor del nombre de Nusselt obtingut per a la mateixa configuració del bufador considerant en aquest cas el fluid com a compressible, a diferència dels apartats anteriors en què s'ha considerat com a incompressible.

No ha estat possible realitzar la comparativa compressible / incompressible utilitzant el mateix model de turbulència que s'ha escollit en l'apartat anterior, és a dir, el model de turbulència $k - \varepsilon$, LB , ja que per a fluid compressible el software OpenFOAM® no disposa de la implementació d'aquest model. Degut a això, la comparativa es porta a terme mitjançant la modelització $k - \omega$, SST , ja que és el segon model que més s'aproxima a les dades experimentals disponibles.

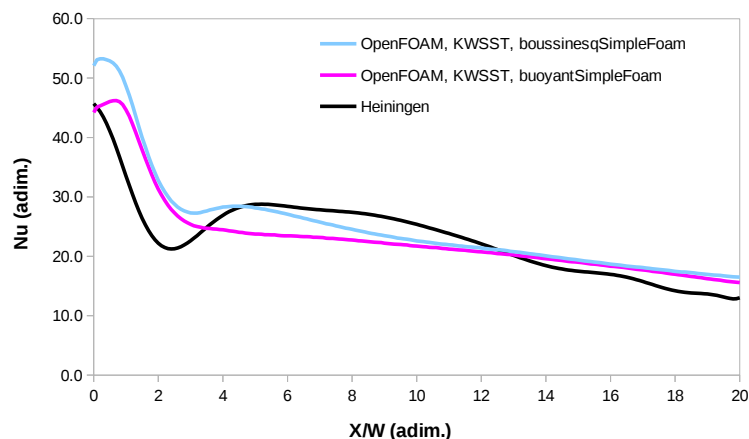


Figura 6.14.: Comparativa entre l'expressió polinòmica ajustada a les dades experimentals recollides per Adriaan R.P. van Heiningen [6] i el model de turbulència $k\omega$, SST (modelització compressible / incompressible)

	boussinesq	buoyant	Van Heiningen [4]
RMSE	4.86	4.3	-----
Nu_{mig}	25.0	23.2	23.1

Taula 6.5.: Comparativa de resultats entre els diversos models de turbulència assajats, $H/W = 2.6$, $Re = 10400$

Es pot veure una certa diferència entre el fet de considerar o no la compressibilitat del fluid, ja que en el cas de fluid compressible s'obtenen valors del nombre de Nusselt lleugerament inferiors. També cal notar que el segon pic o màxim local tendeix a desaparèixer respecte dels resultats que s'han obtingut considerant el fluid com a incompressible, cosa que s'allunya del comportament real. A més a més, cal notar que el temps necessari per a convergir la solució ha estat més elevat utilitzant el solucionador `buoyantSimpleFoam`, i els resultats no són més bons que els que s'han obtingut amb la versió simplificada `boussinesq`.

És per aquests motius que en l'estudi que es realitza en aquesta tesi es considera adient realitzar l'estudi de la transferència de calor del bufador, adoptant la simplificació de fluid incompressible.

6.7.1.3. Estudi de refinament del mallat

Una vegada escollit el model de turbulència que més s'adapta a les característiques del cas que es vol estudiar, es considera necessari realitzar un estudi del mallat per valorar fins a quin punt de refinament de malla cal arribar per a obtenir resultats el més ajustats possible als valors experimentals.

L'estudi s'ha portat a terme en dues etapes diferenciades: la primera d'elles s'ha fet variant el gradient del gruix de les cel·les en la direcció perpendicular a la paret sobre la qual impacta l'aire provinent del bufador (terme *grad_e* de la taula. 6.6), de manera que cada vegada s'ha anat augmentant progressivament la densitat del nombre de cel·les situades més properes a aquesta paret, fins que ha aparegut el segon pic del màxim local en la distribució de Nusselt (aquest màxim ha aparegut quan s'ha assolit un valor de y^+ aproximat a 1). Una vegada s'ha obtingut el gradient correcte, s'ha procedit a fer un refinament de la primera fila de cel·les més properes a la superfície d'estancament; en cada iteració s'ha reduït a la meitat el gruix de la primera cel·la adjacent a aquesta superfície, fins que s'ha observat que incrementar la densitat de malla ja no aportava una diferència notable en els resultats del cas (el valor de y^+ que s'ha assolit mitjançant aquest procés és d'aproximadament 0,22 amb dos refinaments de malla a la superfície d'impacte; s'ha comprovat que fer un tercer refinament addicional no aportava una variació significativa en els resultats).

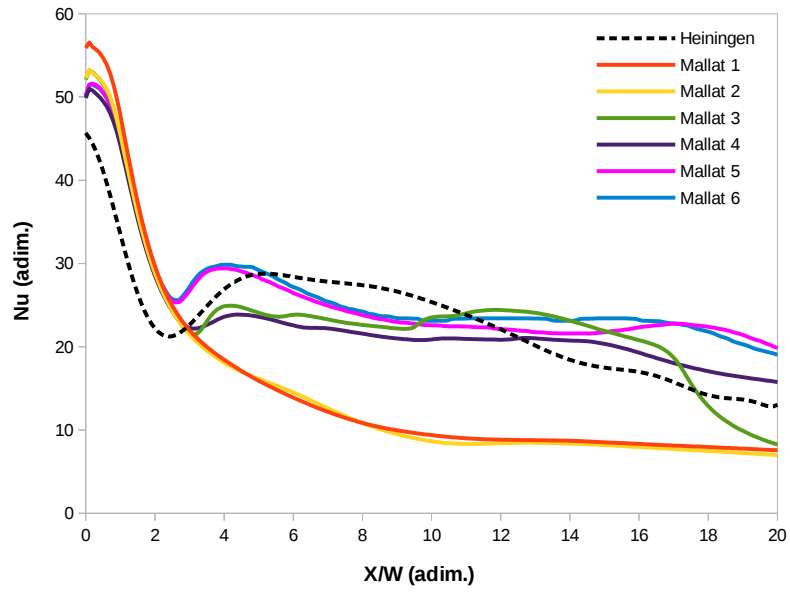


Figura 6.15.: Evolució del nombre de Nu en funció dels diversos mallats, $H/W = 2.6$, $Re = 10400$

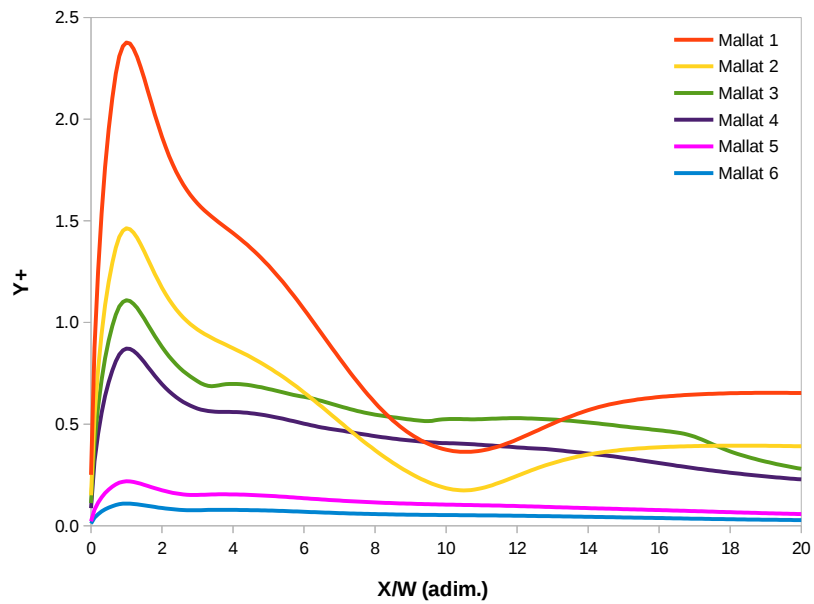


Figura 6.16.: Valor de $y+$ en funció dels diversos mallats, $H/W = 2.6$, $Re = 10400$

Mallat	1	2	3	4	5	6	7
a (m)	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015
b (m)	0.0135	0.0135	0.0135	0.0135	0.0135	0.0135	0.0135
c (m)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
d (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
e (m)	0.0039	0.0039	0.0039	0.0039	0.0039	0.0039	0.0039
f (m)	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078

div_a	24	24	24	24	24	24	24
div_ab	100	100	100	100	100	100	100
div_bc	175	175	175	175	175	175	175
div_cd	175	175	175	175	175	175	175
div_e	60	60	60	60	60	60	60
div_f	60	60	60	60	60	60	60

grad_a	1	1	1	1	1	1	1
grad_b	3	3	3	3	3	3	3
grad_c	2	2	2	2	2	2	2
grad_d	1	1	1	1	1	1	1
grad_e	10	20	30	40	40	40	40
grad_f	0.1	0.05	0.033	0.025	0.025	0.025	0.025
refinement	0	0	0	0	1	2	3

Taula 6.6.: Paràmetres de control del mallat per a l'estudi de refinament

La configuració que s'ha escollit per a la realització de les simulacions en l'estudi paramètric és la corresponent al mallat núm. 6 de la taula. 6.6. Un doble refinament a la superfície d'impacte és suficient, ja que tal i com s'ha dit unes línies més amunt, un refinament addicional no aporta millores apreciables en els resultats obtinguts.

6.7.2. Estudi paramètric d'un bufador d'una sola ranura (pantalla assecatge tinters)

6.7.2.1. Variació de la distància vertical de separació entre el bufador i el substrat

Els paràmetres de la simulació són els següents:

La velocitat de l'aire a la sortida del llavi és uniforme amb un valor de " $V_1 m/s$ " i surt a una temperatura de " $T_1 ^\circ C$ ", el llavi té una amplada de " $a mm$ " i la separació vertical entre el llavi i la superfície d'impacte va augmentant gradualment

des de " $b_1 \text{ mm}$ " fins a uns " $b_2 \text{ mm}$ " en increments de 1 mm entre ells. La superfície d'impacte, que en aquest cas reproduirà el tambor de la impressora, es manté a una temperatura constant de " $T_{\text{tambor}} \text{ }^\circ\text{C}$ " (el tambor central està refrigerant internament amb una temperatura de consigna de " $T_{\text{tambor}} \text{ }^\circ\text{C}$ "). La paret superior, que seria assimilable al llavi de la pantalla, se li ha imposat una temperatura constant igual a la temperatura del fluid que s'impulsa, és a dir, " $T_1 \text{ }^\circ\text{C}$ ". Tot i que el domini analitzat en la simulació té una amplada més gran, els resultats s'analitzen per a l'amplada del llavi de la pantalla, que és de " $W_{\text{llavi}} \text{ mm}$ ".

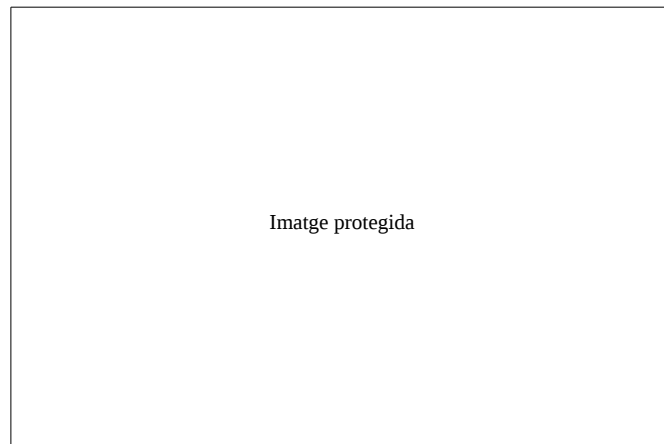
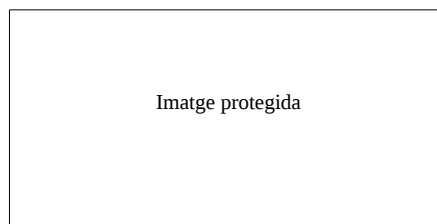


Figura 6.17.: Distribució del número de Nusselt per un bufador d'una sola ranura de " $a \text{ mm}$ " d'amplada, $Re = 6500$, i diferents relacions H/W des de 1 fins 3



Taula 6.7.: Coeficient de transferència de calor per convecció d'un llavi de " $a \text{ mm}$ " d'amplada, a diverses separacions respecte del substrat per un nombre de $Re = 6500$ (resultats calculats per a una amplada de " $W_{\text{llavi}} \text{ mm}$ ", és a dir, $x/W = 20$ a cada costat respecte de la part central del bufador)

Nu_1 és el valor del nombre de Nusselt corresponent a la zona central del jet d'aire quan impacta contra la superfície que simula el tambor. En aquest punt, que es sol anomenar punt d'estancament és on s'assoleix la pressió màxima del fluid. Aquest valor del Nusselt es correspon amb el valor més alt obtingut a la simulació.

Nu_2 és un mínim local del número de Nusselt, $(x/W)_2$ és la posició on es produeix aquest mínim local

Nu_3 és el màxim local del número de Nusselt, $(x/W)_3$ és la posició on es produeix aquest màxim local

\overline{Nu} és el valor del número de Nusselt mitjà en la regió considerada, que s'ha considerat igual a l'amplada del passamà que dona forma al llavi, i que és de " $W_{llavi} mm$ " en total (" $\frac{W_{llavi}}{2} mm$ " a banda i banda respecte del centre del bufador).

\bar{h} és el valor del coeficient de transferència de calor per convecció mitjà, obtingut a partir de \overline{Nu} , considerant la mateixa regió que té una amplada de " $W_{llavi} mm$ ".

Conclusions:

Implicacions associades a una disminució de la ràtio H/W :

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Efecte de la longitud del nucli potencial en el coeficient de Nu :

Seguint l'exemple plantejat en la bibliografia [7], és interessant realitzar la gràfica de la velocitat normalitzada al centre de la sortida del bufador enfront la distància adimensional de separació vertical entre el bufador i la superfície d'impacte.

La velocitat normalitzada al centre del bufador s'ha calculat com:

$$V_{norm} = \frac{V_y}{V_{jet}} \tag{6.70}$$

V_y és la component de la velocitat en la direcció vertical que té el fluid (a les simulacions, la direcció y és la direcció vertical de separació entre el substrat i el bufador), en la línia vertical situada al centre del bufador en què es representen els resultats.

V_{jet} és la velocitat del fluid just a la sortida del bufador. Per les simulacions que s'analitzen en aquest apartat s'ha imposat una velocitat constant al llarg de tot el gruix del llavi (“ $a\ mm$ ”), i que només té component en la direcció y .

La distància adimensional Y_{adim} entre el bufador i la superfície d'impacte s'expressa a partir de la relació:

$$Y_{adim} = \frac{y}{H} \quad (6.71)$$

y és la coordenada vertical de la línia en què es representen els resultats. Es pren com a coordenada 0 el punt situat just sobre la superfície d'impacte.

H és el valor de la separació vertical entre el substrat i el bufador.

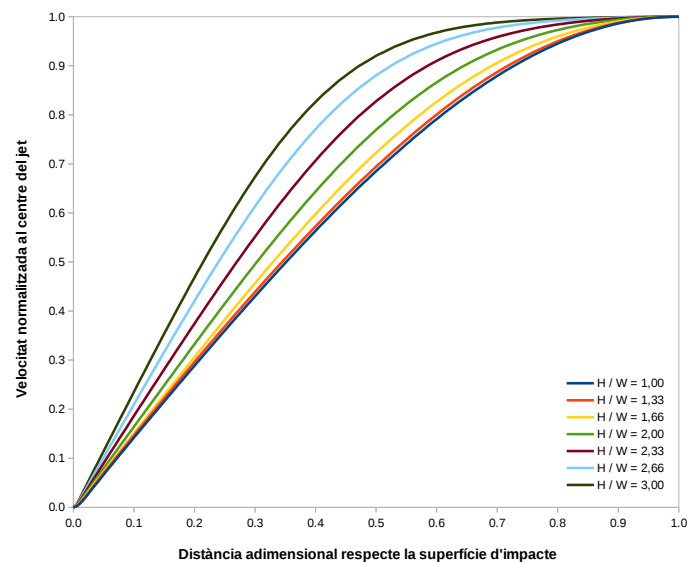


Figura 6.18.: Efecte de la separació entre el bufador i la superfície d'impacte, en la component vertical de velocitat, representada just al centre del bufador

Si prenem com a regió corresponent al nucli potencial aquella regió en què la velocitat del fluid assoleix un valor que està comprès entre un 95% i un 100% de la velocitat inicial de l'aire a la sortida del bufador, es pot veure que a mesura que augmenta la separació entre el bufador i la superfície d'impacte la longitud del nucli potencial tendeix a augmentar.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Una explicació de que la longitud del nucli potencial disminueixi per menors ràtios H/W , és que a mesura que la boca de sortida del bufador s'apropa més a la superfície d'impacte, aquest raig d'aire es troba cada vegada més proper a la zona de més alta pressió deguda al canvi que es produeix d'energia cinètica del fluid cap a energia en forma de pressió al trobar-se la superfície d'impacte (el fluid assoleix una velocitat igual a 0 a la zona d'estancament, i en aquest mateix punt la pressió estàtica assoleix el seu valor màxim); degut a aquest fet es produeix una sobrepressió que es transmet aigües amunt del fluid i que tendeix a frenar-lo, d'aquesta manera quan més petita sigui la relació H/W més ràpid es produeix aquest decreixement en la velocitat experimentada pel fluid des de que surt de la boca d'impulsió del bufador.

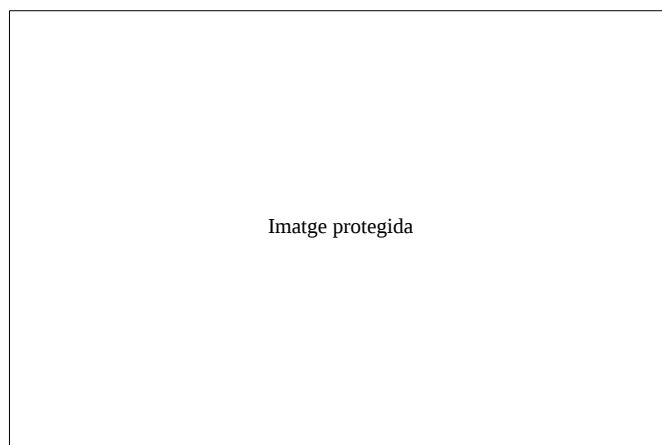


Figura 6.19.: Distribució de velocitats d'un bufador de ranura, $Re = 6500$, $W = 10 \text{ mm}$, $H/W = 1$ (a la imatge superior) i $H/W = 3$ (a la imatge inferior)

De les imatges representades a la fig. 6.19 es desprèn que a mesura que disminueix la relació H/W , la velocitat que assoleix el fluid després d'haver col·lisionat contra la superfície d'impacte tendeix a augmentar, ja que la secció de pas disponible per al fluid també va disminuint.

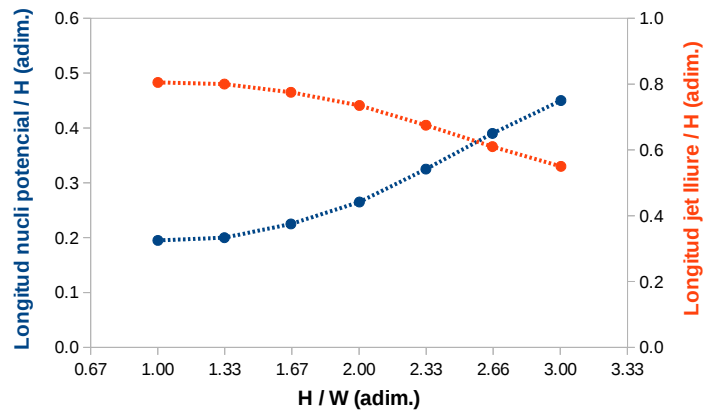


Figura 6.20.: Longitud adimensional del nucli potencial, i del jet lliure, per a diverses relacions H/W

La longitud adimensional del nucli potencial tendeix a establir-se per relacions H/W situades entre els valors de 1 i 1,33, assolint un valor que tendeix a establir-se aproximadament a un total de 0,2.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Figura 6.21.: Longitud real del nucli potencial, i del jet lliure, per a diverses separacions entre el bufador i el substrat

6.7.2.2. Variació de la velocitat de sortida de l'aire del bufador (variació del nombre de Reynolds)

Tot seguit es presenta la distribució del valor del número de Nu i el valor del coeficient de transferència de calor per convecció \bar{h} per un llavi d'amplada constant situat a una distància vertical també constant respecte de la superfície on es desitja que es porti a terme l'intercanvi de calor. El paràmetre que es varia en aquesta sèrie de simulacions és la velocitat en què surt l'aire a través del bufador (la distribució de velocitat de l'aire al llarg de tota l'amplada del llavi W es considera uniforme).

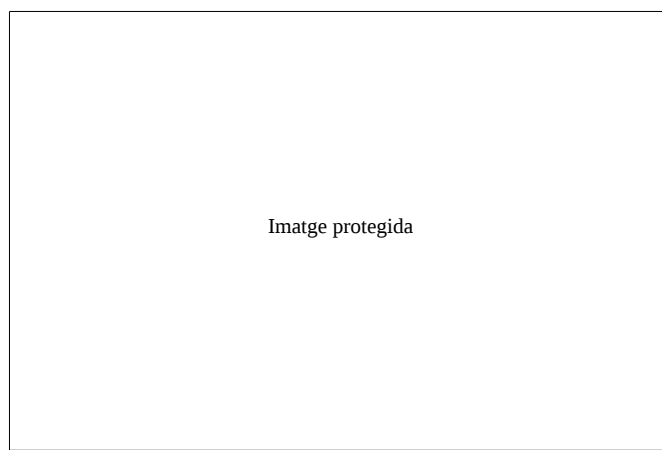


Figura 6.22.: Distribució Nu per diverses velocitats al llavi $30m/s \leq V_{jet} \leq 60m/s$, $W = "a mm"$, $H = "b mm"$

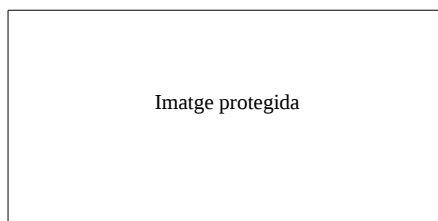


Figura 6.23.: Valor del coeficient h per diverses velocitats al llavi $30m/s \leq V \leq 60m/s$, $W = "a mm"$, $H = "b mm"$

Conclusions:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Pel que fa a la dependència del coeficient \bar{h} amb la velocitat del fluid a la sortida del llavi, i per a la disposició constructiva analitzada, la relació entre aquests dos paràmetres té un comportament que es pot aproximar com a lineal dintre del rang de velocitats considerat segons es pot veure a la fig. 6.23.

6.7.2.3. Velocitat de la superfície d'impacte

Fins aquest punt, el conjunt de simulacions que s'han portat a terme en aquest capítol per a determinar el coeficient de transferència de calor per convecció d'un bufador, totes elles s'han realitzat sense considerar el moviment relatiu que existeix entre el material que s'imprimeix i el bufador o pantalla d'assecatge que impulsa l'aire contra el substrat.

A partir de les referències bibliogràfiques consultades [12] i [36], es proposa un paràmetre anomenat R_{sj} que relaciona la velocitat d'avang del substrat amb la velocitat del fluid que surt del bufador segons l'expressió:

$$R_{sj} = \frac{V_{material}}{V_{jet}} \quad (6.72)$$

$V_{material}$, és la velocitat d'impressió del material

V_{jet} , és la velocitat en què surt l'aire del bufador

A ambdues fonts, si bé les condicions que defineixen el cas són diferents com per exemple la velocitat al llavi i la separació llavi-bufador, conclouen que per valors

baixos del paràmetre R_{sj} (més petits que 0, 25) és poca la diferència en la distribució en el nombre de Nu que es produeix entre el cas en què es considera el substrat com a estàtic, o bé en el cas que es considera el moviment relatiu del substrat envers el bufador. A mesura que augmenta la relació R_{sj} , la distribució de Nu tendeix a perdre la perfecta simetria que es dona per el cas en concret de $R_{sj} = 0$.

En aquest punt, el que es fa és comprovar si per a la configuració del cas que s'està estudiant de la pantalla d'assecatge entre tinters aquesta simplificació és adequada. Els resultats es mostren a continuació:

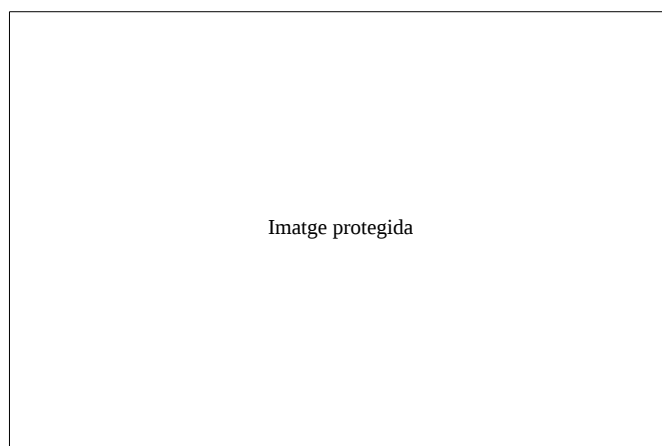


Figura 6.24.: Distribució Nu per diverses velocitats d'avanç del substrat $0m/min \leq V_{material} \leq 400m/min$, $H = "b mm"$, $W = "a mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $T_{jet} = "T_1 ^\circ C"$, $T_{base} = "T_{tambor} ^\circ C"$

A la fig. 6.24 es mostra la variació en la distribució del nombre de Nu per un mateix bufador, sota diverses velocitats d'avanç de la superfície d'impacte (el sentit del moviment del substrat és d'esquerra a dreta).

La gràfica corresponent a una velocitat d'impressió nul·la mostra una distribució del Nu totalment simètrica respecte del punt d'estancament o d'impacte del fluid contra el substrat. Per contra, a mesura que augmenta la velocitat d'impressió, la gràfica presenta un biaix que augmenta sensiblement a mesura que augmenta la velocitat del material; la part de la gràfica situada a l'esquerra de la zona d'estancament tendeix a disminuir la seva àrea respecte del cas en què s'analitzava el procés des d'un punt de vista estàtic $R_{sj} = 0$, i en canvi la part dreta de la gràfica augmenta lleugerament la seva àrea respecte del cas estàtic.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Taula 6.8.: Coeficient \bar{h} per diverses velocitats d'avanç del substrat, $0m/min \leq V_{material} \leq 400m/min$, $H = "b mm"$, $W = "a mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $T_{jet} = "T_1 ^\circ C"$, $T_{base} = "T_{tambor} ^\circ C"$

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Conclusions:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

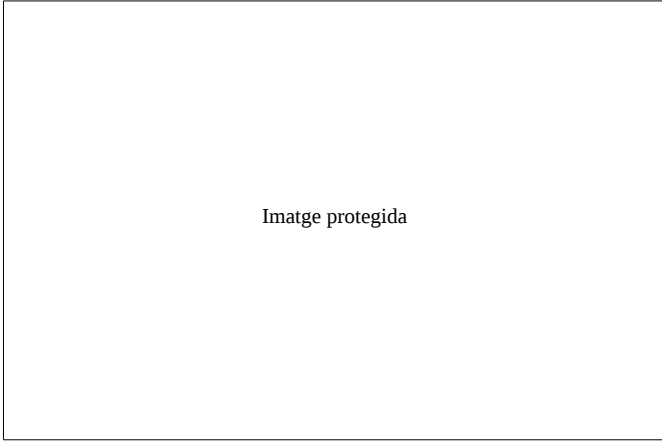
6.7.2.4. Variant l'amplada del bufador " $a_1 \leq W \leq a_2$ " i mantenint fix el nombre de Reynolds ($Re = 6.500$, $H = "b mm"$, $X = "W_{llavi}/2 mm"$)

Un objectiu molt important que cal assolir en la optimització del sistema d'assecatge de les impressores flexogràfiques, és reduir el màxim possible la quantitat d'aire que circula en el circuit d'assecatge de la màquina, sense perdre capacitat d'evaporació respecte del punt de partida actual. A dia d'avui, la configuració que s'entén com a estàndard dintre de les màquines impressores que fabrica Comexi, consisteix en un llavi amb una obertura o amplada d'uns " $a mm$ " pel qual surt aire calent a unes condicions de temperatura de com a màxim " $T_1 ^\circ C$ " i a una velocitat de " $V_1 m/s$ ", i estant separats el bufador i el material a una distància vertical que està estipulada en " $b mm$ ".

Per a la configuració estàndard actual que s'acaba de definir, s'obté que el llavi de la pantalla està impulsant aire amb un nombre de Reynolds que pren el valor de 6.500 i que ja s'havia comentat en anterioritat.

Aquest nombre de Reynolds es pot aconseguir sota diverses configuracions de treball variant l'amplada del llavi del bufador W i la corresponent velocitat en què surt l'aire V_{jet} . Si es manté el mateix nombre de Re (sota unes mateixes condicions de temperatura de treball del bufador) en tots els casos pels quals es varia l'amplada del bufador, voldrà dir que també es manté constant el cabal que s'està impulsant a través del bufador de la pantalla.

L'objectiu d'aquest punt és valorar si per un mateix cabal i per una mateixa distància de separació vertical entre llavi i bufador, és possible augmentar el coeficient de transferència de calor que aporta el bufador respecte del punt actual situat en " $\bar{h}_1 W/m^2K$ ". En aquest punt, però, no es valora quines conseqüències es derivarien d'aquestes modificacions en el balanç de la pantalla i en el canvi del punt de treball que suposaria en els ventiladors de la màquina per a poder fer circular el fluid.



Imatge protegida

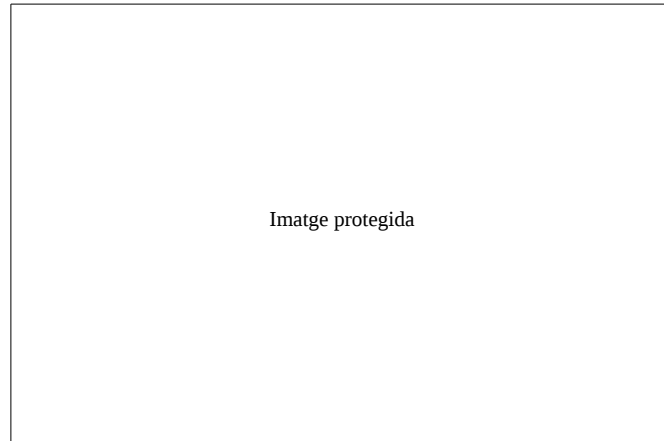


Figura 6.25.: Distribució Nu per $Re = 6.500$, $H = "b\text{ mm}"$ i W entre " a_1 " i " $a_2\text{ mm}"$

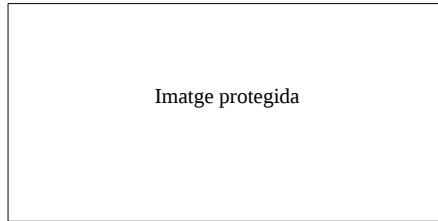
La distribució del nombre de Nusselt de les gràfiques superiors, és totalment simètrica al no haver-hi moviment respecte del bufador, de la superfície d'impacte. Així doncs, el valor de Nu en la llargada representada de " $W_{llavi}/2\text{ mm}"$ és el mateix que el que s'obtingria si es considerés l'amplada total de " $W_{llavi}\text{ mm}"$. Aquesta longitud que es pren com a referència de " $W_{llavi}\text{ mm}"$ es correspon amb l'amplada total que té el passamà d'alumini sobre el qual s'ha mecanitzat el llavi o bufador.

Si s'analitza la fig. 6.25, es pot veure que el resultat que s'ha obtingut amb la configuració que s'ha comentat en aquest apartat que s'està analitzant, té un comportament molt similar al que s'ha mostrat en l'anàlisi on es manté constant l'amplada W així com la velocitat de sortida de l'aire del bufador V_{jet} (cosa que fa que també es mantingui constant el valor de Re) i es varia la distància de separació vertical que hi ha entre el bufador i la superfície d'incidència H .

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"

En aquest apartat, es varia el paràmetre H/W a base de canviar l'obertura del llavi del bufador W tot mantenint fixa la distància vertical de separació entre llavi i el substrat H , i en l'apartat anterior es feia just el contrari variant l'alçada o distància de separació entre ells tot mantenint l'amplada del llavi a un valor constant.

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"



Taula 6.9.: Resum de casos estudiats per a un mateix nombre de Re , separació entre llavi i tambor de " $b\text{ mm}$ ", T^a bufador " $T_1\text{ }^\circ\text{C}$ " i T^a tambor $T_{tambor}\text{ }^\circ\text{C}$

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"



Figura 6.26.: Distribució \bar{h} per $Re = 6.509$, $H = "b\text{ mm}"$ i W entre " a_1 " i " $a_2\text{ mm}$ "

Conclusions:

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"

6.7.2.5. Variant l'amplada del bufador " a_1 " $\leq W \leq 2,5 \cdot a_1$ i el nombre de Reynolds $5.000 \leq Re \leq 9.000$, ($H = "b mm"$, $X = "W_{llavi}/2 mm"$)

En aquest apartat es caracteritza per a cadascuna de les obertures del llavi compreses entre " $a_1 mm$ " i " $2,5 \cdot a_1 mm$ " quin és el valor \bar{h} que s'assoleix per a diverses velocitats de sortida de l'aire del llavi. L'objectiu de les simulacions és determinar si és possible assolir la mateixa transferència de calor que la configuració estàndard de les impressores flexogràfiques, però impulsant un volum d'aire menor a través de la pantalla.

a) $W = "a_1 mm"$, $H = "b mm"$, $4.339 \leq Re \leq 6.509$

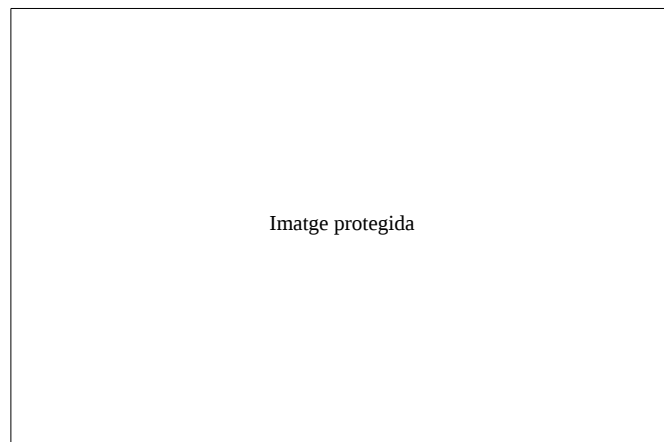


Figura 6.27.: Distribució Nu , $4.339 \leq Re \leq 6.509$, $W = "a_1 mm"$ i $H = "b mm"$

b) $W = "1,5 \cdot a_1 \text{ mm}"$, $H = "b \text{ mm}"$, $4.881 \leq Re \leq 9.763$

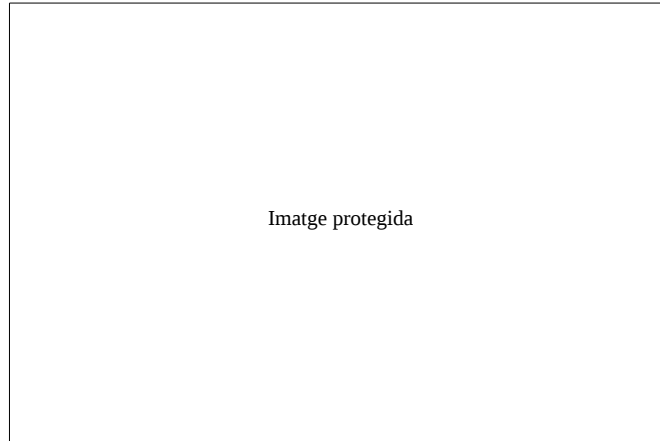


Figura 6.28.: Distribució Nu , $4.881 \leq Re \leq 9.763$, $W = "1,5 \cdot a_1 \text{ mm}"$ i $H = "b \text{ mm}"$

c) $W = "2 \cdot a_1 \text{ mm}"$, $H = "b \text{ mm}"$, $5.207 \leq Re \leq 9.763$

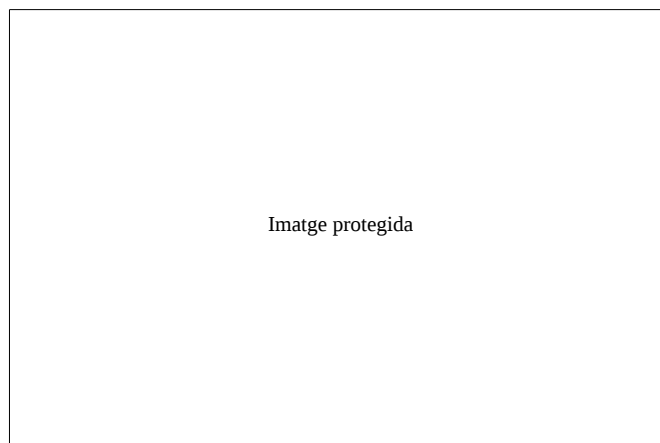


Figura 6.29.: Distribució Nu , $5.207 \leq Re \leq 9.763$, $W = "2 \cdot a_1 \text{ mm}"$ i $H = "b \text{ mm}"$

d) $W = "2,5 \cdot a_1 \text{ mm}"$, $H = "b \text{ mm}"$, $6.509 \leq Re \leq 9.492$

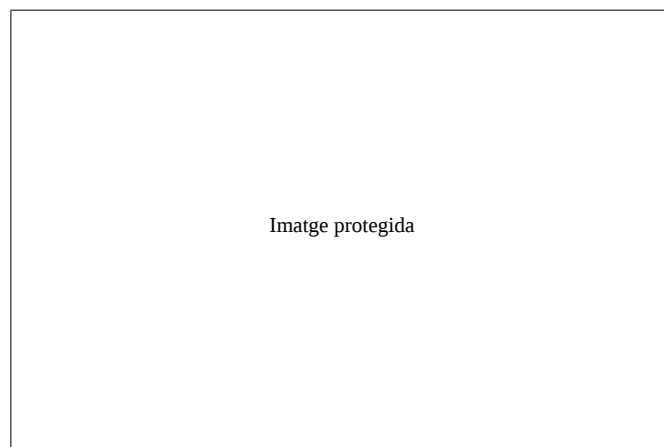


Figura 6.30.: Distribució Nu , $6.509 \leq Re \leq 9.492$, $W = "2,5 \cdot a_1 \text{ mm}"$ i $H = "b \text{ mm}"$

Resum de resultats obtinguts mitjançant simulació OpenFOAM®

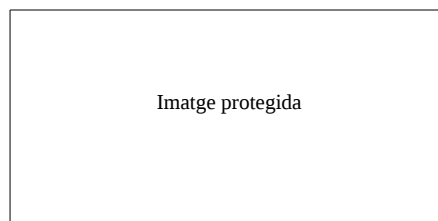
A la gràfica que segueix s'ha representat el coeficient de transferència de calor per convecció per diferents obertures del llavi de la pantalla i per diverses velocitats de sortida de l'aire del bufador. Les línies en traç negre discontinu representen tots aquells punts que comparteixen un mateix nombre de Reynolds, i que per tant comparteixen un mateix cabal d'impulsió de la pantalla.



Figura 6.31.: Distribució \bar{h} , $5.000 \leq Re \leq 9.000$, " $a_1 mm$ " $\leq W \leq$ " $2,5 \cdot a_1 mm$ " i $H =$ " $b mm$ "

La configuració actual d'una pantalla d'assecatge entre tinters, per una amplada $W =$ " $a mm$ ", una separació $H =$ " $b mm$ " i una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ " ($Re = 6.509$) a una temperatura d'impulsió de l'aire de " T_1 °C" i a una temperatura constant de la superfície d'impacte de " T_{tambor} °C" li correspon un coeficient de transferència de calor per convecció " $\bar{h}_1 W/m^2 K$ " (per una amplada considerada de " $W_{llavi}/2 mm$ ").

En aquest punt es valora, si es mantenen les temperatures que s'acaben d'esmentar com a constants així com també la distància de separació $H =$ " $b mm$ ", quina seria la velocitat que hauria de tenir l'aire a la sortida del llavi, per a les diverses amplades del bufador que s'han considerat entre " $a_1 mm$ " i " $2,5 \cdot a_1 mm$ ", per tal de mantenir constant el valor del coeficient \bar{h} en qualsevol d'aquestes configuracions.



Taula 6.10.: Resum de casos estudiats per a un mateix valor de " $\bar{h}_1 W/m^2 K$ ", mantenint la separació entre llavi i tambor de $H =$ " $b mm$ ", T^a bufador " T_1 °C" i T^a tambor " T_{tambor} °C", i variant l'amplada del bufador W

Segons els resultats de la taula precedent, i tal i com s'havia comentat en l'apartat anterior on s'analitzava el valor de Nu per un nombre de Reynolds fixat a $Re = 6.509$ tot variant l'amplada del bufador mantenint la separació $H = "b\text{ mm}"$, és possible assolir el mateix coeficient de transferència de calor per convecció que es disposa en l'actualitat (" $\bar{h}_1\text{ W/m}^2\text{K}$ ") amb un bufador d'amplada igual a " $a_1\text{ mm}$ " i apujant la velocitat de l'aire passant de " $V_1\text{ m/s}$ " a " $V'_1\text{ m/s}$ ". Si es porta a terme aquesta modificació, el cabal d'impulsió de la pantalla es pot reduir en aproximadament un 25% respecte del que es té en l'actualitat, i quedaria pendent d'anàlisi l'afectació que produeix aquesta modificació en tant que balanç de la pantalla i dimensionament de ventiladors del sistema.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Conclusions:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

6.7.2.6. Variació de la temperatura del bufador

Per aquestes simulacions s'ha considerat que la velocitat de l'aire a la sortida del llavi es manté en tots els casos igual i constant a " $V_1\text{ m/s}$ ", sigui quina sigui la temperatura a la qual surti l'aire del bufador; no obstant, com que les propietats de l'aire varien en funció de la temperatura (es produeix un canvi en la viscositat cinemàtica del fluid), aquesta variació en la viscositat comportarà una disminució del nombre de Reynolds ja que per el rang de temperatures considerat comprès entre " $T_2\text{ °C}$ " i " $T_3\text{ °C}$ " la viscositat cinemàtica ν de l'aire augmenta a mesura que augmenta la temperatura $Re = \frac{V \cdot W}{\nu}$.



Taula 6.11.: Variació del nombre de Reynolds del bufador, en funció de la temperatura, tot mantenint una mateixa velocitat de l'aire en el llavi V_{jet}

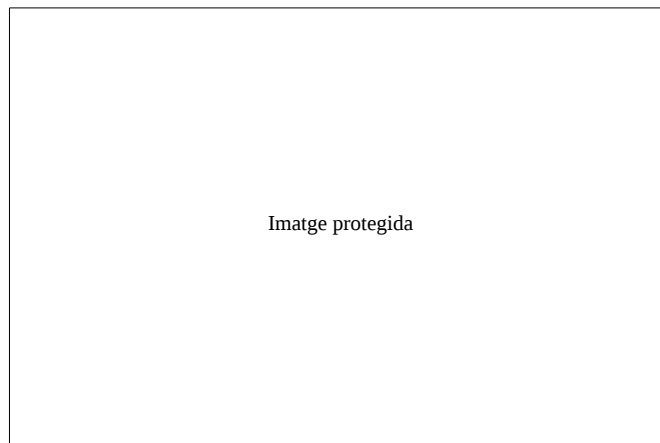
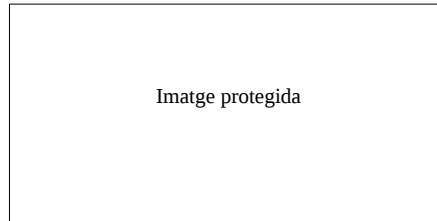


Figura 6.32.: Variació del nombre de Nusselt en funció de la temperatura

Dintre de la regió estudiada $X/W \leq 20$, s'han obtingut els següents resultats en tant que número de Nusselt, i coeficient de transferència de calor per convecció:



Taula 6.12.: Variació del coeficient de transferència de calor per convecció en funció de la temperatura

Per tant, per una mateixa velocitat del fluid a la sortida del bufador, un augment de la temperatura d'aquest aire implica una disminució en el coeficient de transferència de calor per convecció, tot i que gairebé inapreciable. El fet de que varii tant poc el coeficient h no significa que els watts que pot transmetre el jet d'aire ja sigui treballant a " T_2 °C" o bé treballant a " T_3 °C" siguin els mateixos; de fet, el càlcul de la quantitat de calor intercanviat entre el jet d'aire i la superfície d'impacte depèn del coeficient \bar{h} i a més a més de la diferència de temperatura que hi ha entre l'aire que surt del bufador i la temperatura de la superfície del material contra el qual col·lisió l'aire que s'ha impulsat.

$$q_{conv.} = \bar{h} \cdot A \cdot (T_s - T_{jet}) \quad (6.73)$$

$q_{conv.}$ és la quantitat de calor transmesa per convecció [W]

A és la superfície que es considera a l'anàlisi [m^2]

T_s és la temperatura de la superfície [K]

T_{jet} és la temperatura de l'aire que impulsa el bufador [K]

De l'eq. 6.73 cal notar que tot i que el coeficient \bar{h} es mantingui pràcticament igual per a les diverses temperatures d'impulsió, si es considera que la temperatura de la superfície d'impacte es manté constant, aleshores a mesura que augmenta la temperatura de l'aire que surt de bufador augmenta també la calor transmesa entre aquesta superfície que s'està estudiant i el fluid (el factor $T_s - T_{jet}$ és cada vegada més gran).

Conclusions:

Un augment de la temperatura del bufador fa disminuir sensiblement el coeficient de transferència de calor per convecció que proporciona el jet d'aire, però augmenta la quantitat de calor intercanviada entre el fluid i la superfície d'impacte.

6.7.2.7. Transmissió de calor d'un jet amb confinament / sense confinament

El disseny de les pantalles d'assecatge entre tinters que es munten en l'actualitat a les impressores flexogràfiques, és molt diferent del que s'utilitzava fa uns anys enrere. Si es centra l'atenció només a la zona del llavi de la pantalla, el disseny actual està format per un passamà d'alumini al qual se li ha mecanitzat una ranura d'amplada constant a la seva part central segons es veu a la fig. 6.33, i que té una amplada estipulada en “ a mm”. Aquest disseny presenta la particularitat de que l'aire que s'ha expulsat a través del llavi, una vegada ha incidit contra el tambor central de la màquina, queda confinat en l'espai que queda entremig d'aquestes dues superfícies tal i com es veu a la fig. 6.33. Aquest disseny és molt diferent del que s'utilitzava en models anteriors de màquines on el llavi es construïa a partir de xapa plegada, i l'espai que quedava lliure entre la base del llavi i el tambor central era més gran, segons s'aprecia a la fig. 6.35.

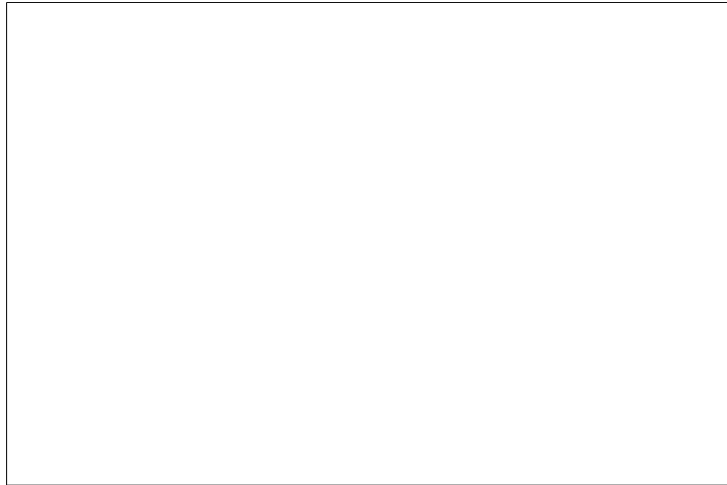


Figura 6.33.: Esquema bàsic de funcionament d'una pantalla d'assecatge entre tinters (tipus “M2”)

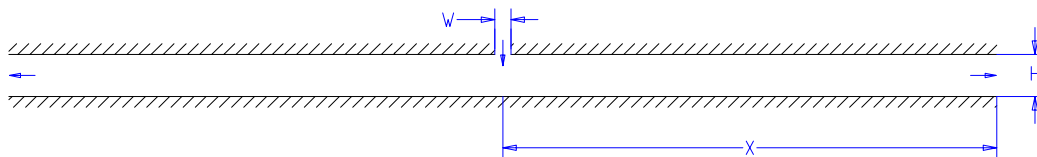


Figura 6.34.: Esquema de la geometria d'un llavi amb confinament

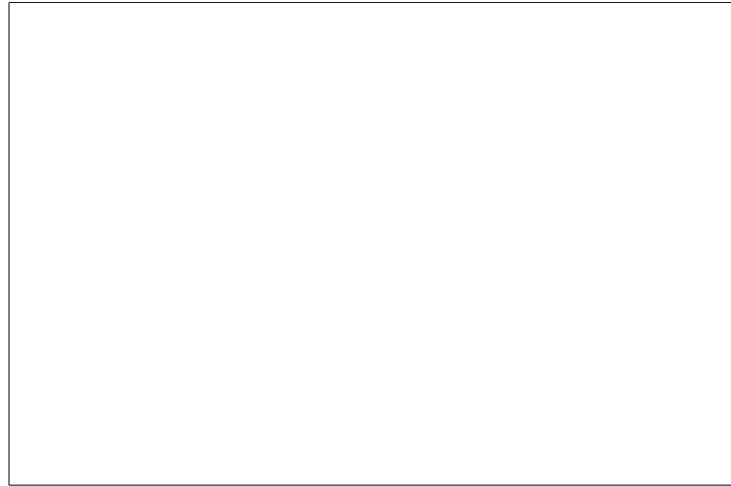


Figura 6.35.: Esquema bàsic de funcionament d'una pantalla d'assecatge entre tinters (disseny antic tipus "M7")

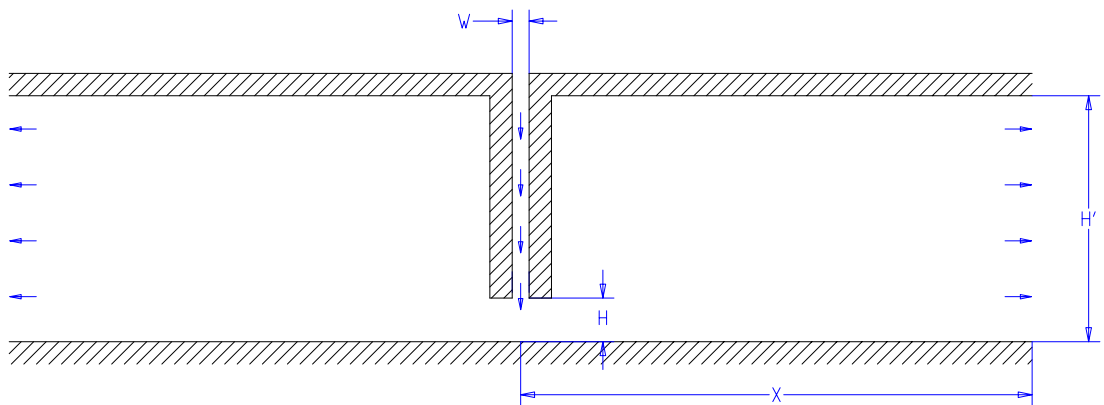


Figura 6.36.: Esquema de la geometria d'un llavi sense confinament

En aquest apartat s'estudia quina és la diferència que resulta en el coeficient de transferència de calor per convecció segons si s'utilitza el model de llavi actual creat

a partir d'un passamà d'alumini mecanitzat, o bé si es fabriqués un llavi amb la mateixa obertura de " $a\text{ mm}$ " però en aquest cas fet a partir de xapa plegada amb una solució constructiva que fóra similar a la que s'ha fet a la fig. 6.35 (espai entre tambor i la base del llavi més gran).



Figura 6.37.: Distribució Nu , $Re = 6.509$ i $Re = 8.136$, $W = "a\text{ mm}"$, $H = "b\text{ mm}"$ i $H' = "m\text{ mm}"$, amb confinament i sense confinament

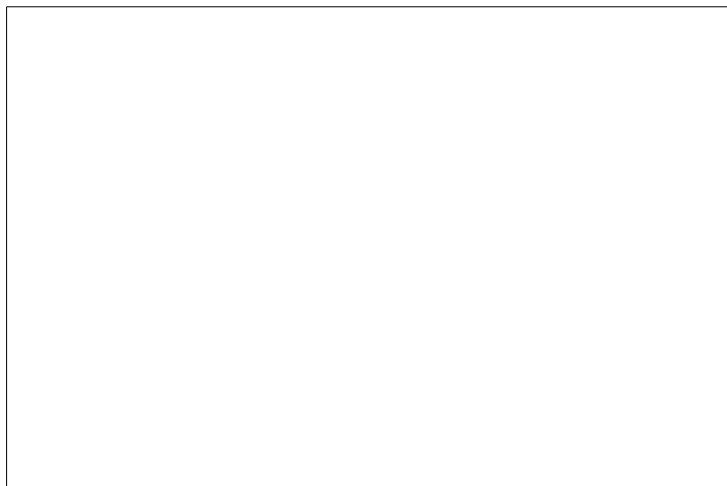
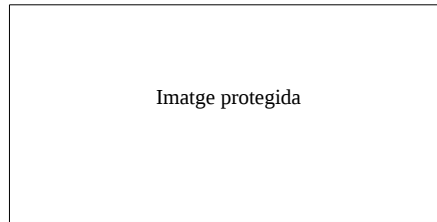


Figura 6.38.: Distribució Nu , $Re = 6.509$, $W = "a_1\text{ mm}"$, $H = "b\text{ mm}"$ i $H' = "m\text{ mm}"$, amb confinament i sense confinament



Taula 6.13.: Comparativa valors del coeficient \bar{h} , amb confinament i sense confinament

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

6.7.2.8. Balanç de la pantalla

Tal i com s’ha explicat, per tal d’assecar la tinta que s’ha aplicat sobre el substrat és necessari fer incidir aire calent a alta velocitat directament contra la part impresa amb l’objectiu d’evaporar la quantitat de solvent continguda en la tinta que s’ha utilitzat per a la impressió. Una vegada aquest aire calent ($Q_{impulsió}$) ja ha incidit contra el substrat, i per tant ha evaporat una certa quantitat de tinta de la mostra impresa, cal evitar que aquest aire amb un cert contingut de solvents s’escapi cap a l’exterior de la pantalla i per tant cal que sigui aspirat ($Q_{aspiració}$) i vehiculat de nou cap al sistema d’assecatge de la màquina (posteriorment, aquest aire aspirat pot ésser recirculat de nou, o bé extret cap a l’exterior).

En el procés d’aspiració de l’aire que s’ha utilitzat per a la impressió, és inevitable

degut al propi disseny de la pantalla aspirar una certa part d'aire fresc variable en funció del tipus de pantalla (a temperatura ambient i sense contingut en solvents) degut a la pròpia depressió que es produeix dintre de la pantalla; degut a aquest fet, el cabal d'aspiració és sempre més gran que el cabal d'impulsió, i per tant el balanç de la pantalla és sempre més gran que zero.

El balanç d'una pantalla es pot definir a partir de la fig. 6.39 segons la següent expressió:

$$\text{Balanç} = \frac{(Q_{\text{aspiració}} - Q_{\text{impulsió}})}{Q_{\text{impulsió}}} \cdot 100 \quad (6.74)$$

$Q_{\text{impulsió}}$ és l'aire calent que s'utilitza per a assecar la quantitat de solvents continguts en la tinta

Q_{fals} és l'aire addicional que aspira la pantalla, i que es troba en condicions ambientals

$Q_{\text{aspiració}}$ és l'aire total que ha d'aspirar la pantalla $Q_{\text{aspiració}} = Q_{\text{impulsió}} + Q_{\text{fals}}$, per evitar que s'escapi aire amb contingut de solvent a l'exterior de la pantalla

El fet de treballar amb un disseny de pantalla que permeti assolir un balanç el més proper a zero possible, porta associades una sèrie d'implicacions:

1. El cabal d'aire que ha de vehicular la màquina és menor (els ventiladors de la màquina podrien ser de dimensions més reduïdes).
2. Derivat del punt anterior, si el cabal que cal fer circular per la màquina és menor, això implica que el volum d'aire que es dirigeix a l'extracció de la màquina també és menor, per tant l'element RTO que tracta els gasos provinents de la màquina podrà ser de un volum més petit (l'RTO és un dispositiu que s'encarrega de tractar els gasos provinents de les màquines, tot cremant els solvents residuals continguts en l'aire d'assecatge fins a quedar a unes concentracions aptes per a la seva expulsió a l'atmosfera i que vénen marcades per les regulacions mediambientals de cada regió).
3. L'aire que s'ha utilitzat per a la impressió assolirà una major concentració de solvents, i per tant al ser més alta aquesta concentració afavorirà que el consum de gas de l'element RTO per a cremar els solvents continguts en l'aire sigui menor. Una vegada iniciat el procés de combustió dintre de l'incinerador o RTO, el procés de combustió es manté per si mateix sense la necessitat d'haver d'aportar gas combustible com a suport per a mantenir actiu el procés de combustió.
4. És possible augmentar la recirculació del circuit d'assecatge entre tinters, per tant es dirigeix menys aire cap a l'extracció de la màquina.

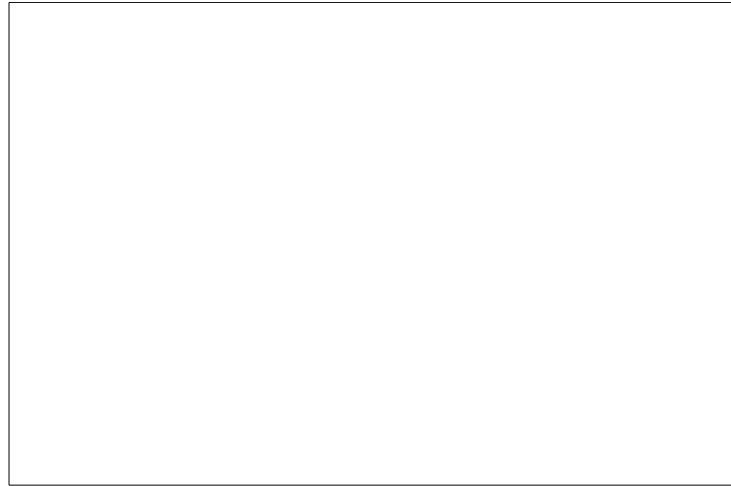


Figura 6.39.: Balanç pantalla d'assecatge entre tinters

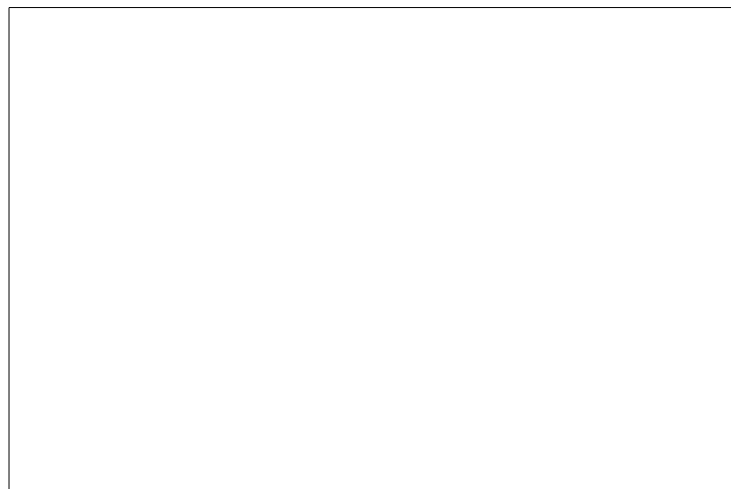


Figura 6.40.: Variació de paràmetres per al càlcul del balanç de la pantalla

Per dur a terme aquest estudi s'han variant els paràmetres A , B i \emptyset tambor per veure l'afectació que provoca la variació en cadascun d'ells en el balanç final de la pantalla (la resta de dimensions de la pantalla s'han mantingut com a fixes i no s'han alterat). Per realitzar aquest anàlisi s'ha fet un tall transversal a la pantalla i s'han plantejat diverses simulacions simplificant el model general a un anàlisi bidimensional. Els resultats, en quant a balanç, obtinguts amb la simulació simplificada en dues dimensions, presenten valors més favorables que no pas els resultats experimentals mesurats en el banc de proves o bé a màquina, això és degut a què la longitud total de la pantalla és un factor que té un efecte important a l'hora de calcular-ne el balanç; no obstant això, l'estudi en 2D és útil per veure quins paràmetres dels que es poden variar a la pantalla, permeten obtenir un cabal d'aspiració més baix possible, i per tant un balanç més favorable, de manera qualitativa.

A és la distància de separació entre el llavi de la pantalla i el tambor del cos impressor
 B és la distància que hi ha entre l'obturador longitudinal de la pantalla i el tambor
 \emptyset tambor és el diàmetre del cos impressor (pren un valor diferent segons cada màquina)

Les cotes A i B es considera que no es poden abaixar per sota de " $y\text{ mm}$ " ja que si s'abaixés aquest valor es podrien provocar interferències mecàniques indesitjades entre el material i la pantalla. Cal esmentar que tot i que el material que s'acostuma a imprimir més habitualment té un gruix de l'ordre de micres, es poden donar casos on s'imprimeixi cartró essent en aquest cas gruixos que poden arribar a varis mil·límetres.

Per tots els casos s'ha pres una velocitat de sortida del llavi de " $V_1\text{ m/s}$ ".

Pel que fa a les simulacions, es considera que la pantalla no rebufo quan no s'escapa aire cap a l'exterior de la pantalla a través de l'obertura B . El procediment seguit a les simulacions consisteix en imposar un cabal d'entrada en el llavi equivalent a una velocitat de " $V_1\text{ m/s}$ " i es va augmentant el cabal d'aspiració fins que la pantalla deixi de rebufo; una vegada s'ha arribat en aquest punt es deixa d'iterar. Es considera que la pantalla no rebufo quan la velocitat que s'assoleix a l'espai que queda entre l'obturador longitudinal i la pantalla és pròxima als 4 m/s .

Variació del diàmetre del tambor central del cos impressor (\emptyset tambor)

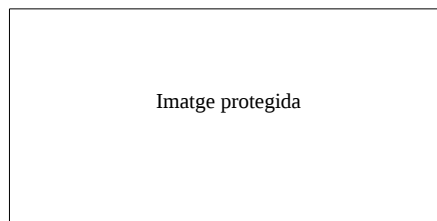
El diàmetre del tambor central de la impressora, pot prendre diversos valors en funció del model de màquina amb el qual s'estigui treballant. L'estudi es realitza per els valors de " $\emptyset_{M8}\text{ mm}$ " corresponent a la "M8" (màquina per a proves situada al Research Center de Comexi, amb la qual és possible realitzar proves experimentals), " $\emptyset_{BP}\text{ mm}$ " corresponent a la xapa corbada del banc de proves, també disponible al Research Center, que simula el diàmetre d'un cos impressor i és on s'han portat a terme gran part de les mesures experimentals incloses en aquest document, i finalment " $\emptyset_{M3}\text{ mm}$ " corresponent al diàmetre d'una màquina "M3" on s'està treballant per instal·lar-hi el nou model de pantalles i simular-ne el seu comportament en plena producció.



Taula 6.14.: Balanç de la pantalla en funció del diàmetre del tambor

Variació de la distància vertical entre l'obturador longitudinal i el tambor central (B)

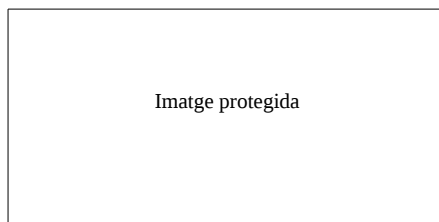
Es realitza un treball variant aquesta separació entre " $e\text{ mm}$ ", " $u\text{ mm}$ ", i " $o\text{ mm}$ "; actualment aquesta distància està fixada en " $u\text{ mm}$ ".



Taula 6.15.: Balanç de la pantalla en funció de la distància vertical de separació entre l'obturador longitudinal i el tambor central

Variació de la distància de separació entre el llavi de la pantalla i el substrat (A)

Es realitza un estudi variant aquesta separació entre " $b_1\text{ mm}$ ", i " $b_2\text{ mm}$ " augmentant paulatinament de mm en mm; actualment aquesta distància està fixada en " $b\text{ mm}$ ".



Taula 6.16.: Balanç de la pantalla en funció de la distància vertical de separació entre el llavi de la pantalla i el tambor central

Conclusions de les anàlisis anteriors

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Com a punt final, cal notar que els resultats obtinguts amb aquest anàlisi bidimensional presenten un balanç més baix que el que s’ha pogut mesurar experimentalment, això és degut a que la longitud de la pantalla, i el disseny fet a la zona d’aspiració juga un paper important a l’hora de calcular la quantitat d’aire que cal que la pantalla aspiri per evitar el rebuf. Per tant el resultat del modelat bidimensional cal agafar-lo només com a qualitatiu ja que la tercera dimensió que no s’ha tingut en compte en la simulació juga un paper molt important.

6.8. Bufador de doble ranura

Les pantalles d’assecatge que s’utilitzen en el cos impressor de les impressores flexogràfiques tenen una sola ranura a partir de la qual s’impulsa aire calent contra el

substrat per assecar la imatge que s'ha imprès prèviament. En aquest apartat es planteja analitzar si el fet d'impulsar el mateix cabal d'aire, però enlloc d'una ranura, impulsar-lo amb dues ranures representa algun avantatge respecte la utilització del disseny actual, és a dir, si el coeficient de transferència de calor dels dos llavis i per un mateix cabal supera el coeficient de transferència de calor per un sol llavi i el mateix cabal.

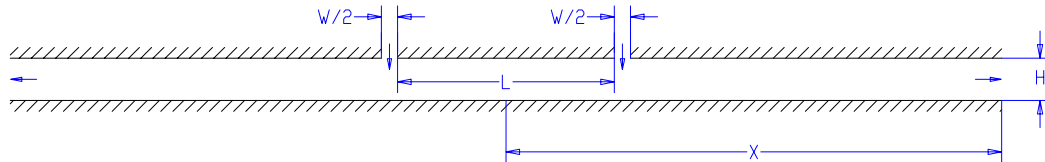


Figura 6.41.: Paràmetres definitoris de la geometria analitzada per a l'estudi d'un bufador de doble ranura

Per a tots els casos que s'han estudiat, s'han imposat les mateixes condicions que per el cas de un sol llavi, és a dir, una temperatura de les parets de confinament superior i del bufador d'aire de " T_1 °C", la temperatura de la base que simula el comportament del tambor, es troba a una temperatura de " T_{tambor} °C", la separació entre les dues superfícies és de $H = "b \text{ mm}"$, la distància en què es recopilen els resultats és de $X = "W_{llavi}/2 \text{ mm}"$, i l'amplada del bufador és $W/2 = "a/2 \text{ mm}"$. El paràmetre L defineix la separació horitzontal entre les dues ranures del llavi.

Per calcular el nombre de Nusselt per aquest cas, s'usa la fórmula que proporciona la referència bibliogràfica [33]

$$Nu = \frac{[\partial T / \partial y]_w}{(T_w - T_{in}) / (2 \cdot W/2)} = \frac{[\partial T / \partial y]_w}{(T_w - T_{in}) / W} \quad (6.75)$$

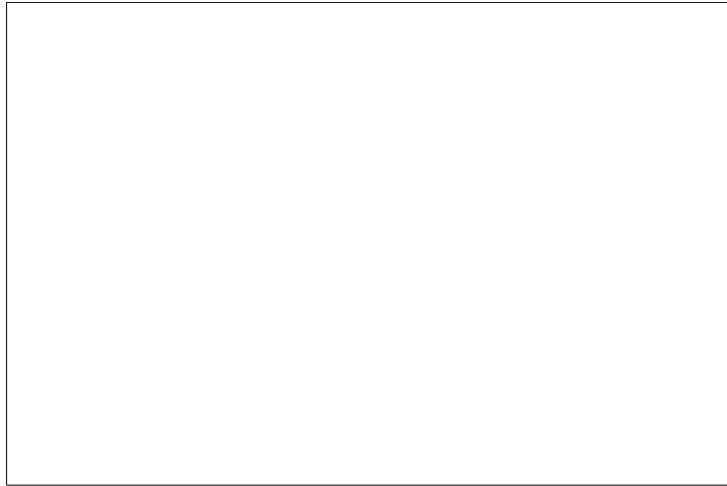


Figura 6.42.: Distribució del nombre de Nusselt, per un bufador de doble ranura, per diverses separacions entre les dues ranures, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/2 = "a/2 mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $0mm \leq L \leq 9mm$

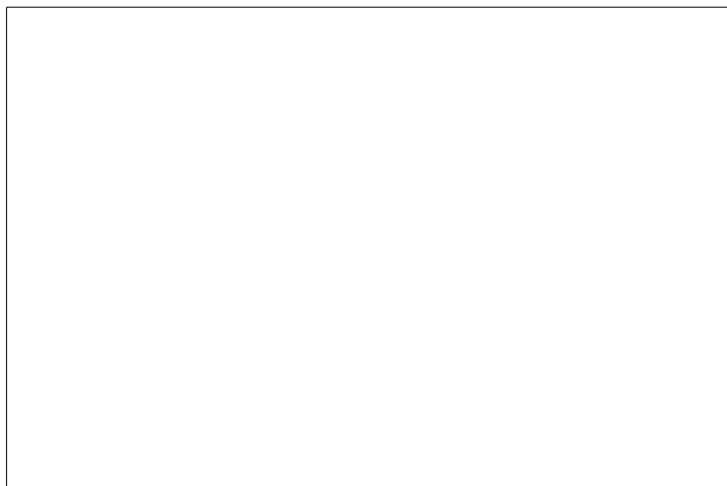


Figura 6.43.: Detall de distribució del nombre de Nusselt, per un bufador de doble ranura, per diverses separacions entre les dues ranures (detall), $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/2 = "a/2 mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $0mm \leq L \leq 9mm$

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

No obstant això, sí que canvia la distribució del nombre de Nusselt, ja que amb la nova geometria passa de tenir un valor màxim situat zona d'estancament del bufador d'una única ranura a tenir dos màxims (cadascun d'ells situat a la zona d'estancament relativa a cada ranura del bufador).

A la zona central situada just a la meitat de la distància entre les dues ranures, hi apareix un màxim local (just al centre) i dos mínims locals. Aquesta diferència de distribució del valor del Nu es produeix per la diferent distribució de velocitats que experimenta el fluid, i que es mostra a la fig. 6.44:

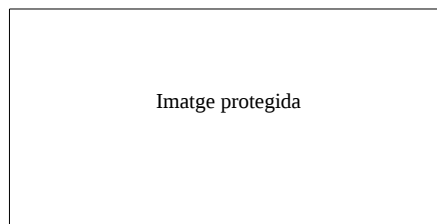


Figura 6.44.: Contorn de velocitat del bufador de doble ranura, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/2 = "a/2 mm"$, $L = "b mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$

La interacció entre els dos bufadors produeix dues recirculacions a la zona central en l'espai comprès entre els dos jets d'aire, i aquestes recirculacions alhora provoquen que els fluxos d'aire provinents de cada bufador no incideixin de manera vertical contra el substrat sinó que hi incideixin amb una certa inclinació deguda justament a la sobrepressió que s'experimenta a la zona central compresa entre aquestes dues ranures.

6.9. Bufador de triple ranura

Es comprova si el fet d'introduir una tercera ranura en el disseny comporta alguna millora respecte del cas de dues ranures.

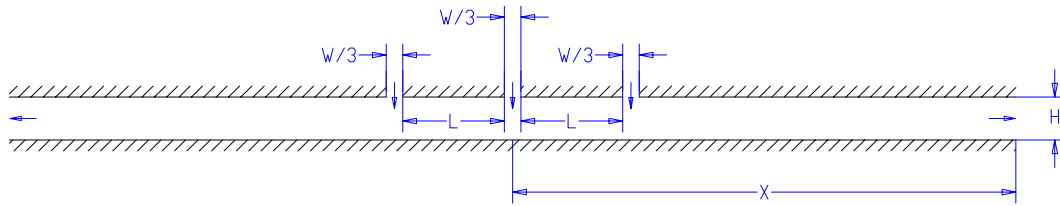


Figura 6.45.: Paràmetres defnitoris de la geometria analitzada per a l'estudi d'un bufador de tres ranures

L'expressió que s'ha utilitzat per al càlcul de Nu és per analogia a la que s'ha utilitzat en el cas anterior

$$Nu = \frac{[\partial T / \partial y]_w}{(T_w - T_{in}) / (3 \cdot W/3)} = \frac{[\partial T / \partial y]_w}{(T_w - T_{in}) / W} \quad (6.76)$$

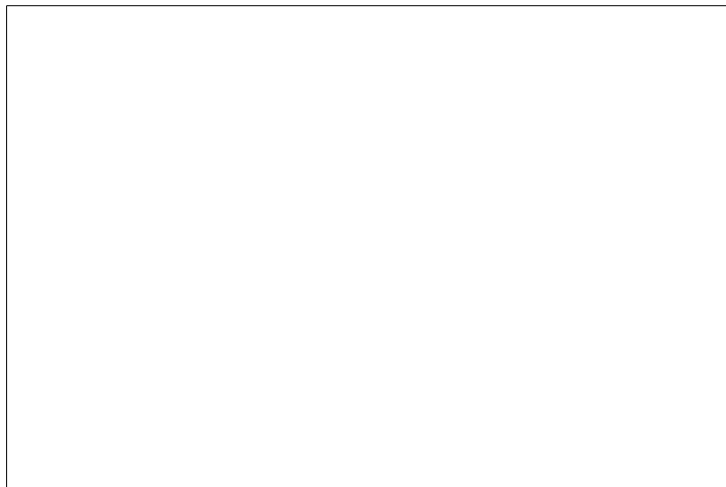


Figura 6.46.: Distribució del nombre de Nusselt, per un bufador de triple ranura, per diverses separacions entre les ranures, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$, $0 mm \leq L \leq 6 mm$

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

No obstant això, la distribució del nombre de Nu és molt diferent en els diversos casos estudiats respecte de la distribució obtinguda amb una sola ranura o bé amb dues ranures. En el cas del llavi de tres ranures s'obtenen tres pics amb valors de Nu més elevats, on el més gran d'ells coincideix amb el valor assolit en relació a la ranura practicada al centre del llavi. Els dos màxims locals que sorgeixen a banda i banda del màxim central presenten uns pics molt més pronunciats que els que s'obtenien en el cas d'un sol llavi.



Figura 6.47.: Contorn de velocitat del bufador de triple ranura, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 4 mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$

Si s'analitza de manera més detallada la interactuació que hi ha entre els diversos raigs de fluid provinents de cadascuna de les ranures del bufador, cal destacar que quan l'aire provinent de la ranura central del bufador interactua amb el fluid provinent de la ranura que té situada o bé a la seva esquerra o bé a la seva dreta, hi ha una zona on el gruix de la capa límit del fluid tendeix a augmentar. Aquest augment del gruix de la capa límit tendeix a créixer a mesura que també creix la separació entre les diverses ranures; no obstant però, per el rang de velocitats estudiat no s'observa despreniment de la capa límit en aquesta zona (zona encerclada fig. 6.49).

Per els diversos casos estudiats, es veu com hi ha una correlació entre la distribució del nombre de Nu amb la distribució de l'esforç tallant sobre el fluid a la paret d'impacte contra la qual incideix l'aire provinent del bufador. Els valors del màxim i mínim del valor de Nu són pràcticament coincidents amb els valors on hi ha un màxim i un mínim en la distribució de l'esforç tallant tal i com s'ha representat a la fig. 6.51 per una separació entre les ranures de $L = 6 mm$. La única zona on no coincideixen és just a la zona d'estancament del bufador central, on el valor del coeficient de transferència de calor presenta un màxim i en canvi el valor de l'esforç tallant presenta un mínim just a la mateixa localització.

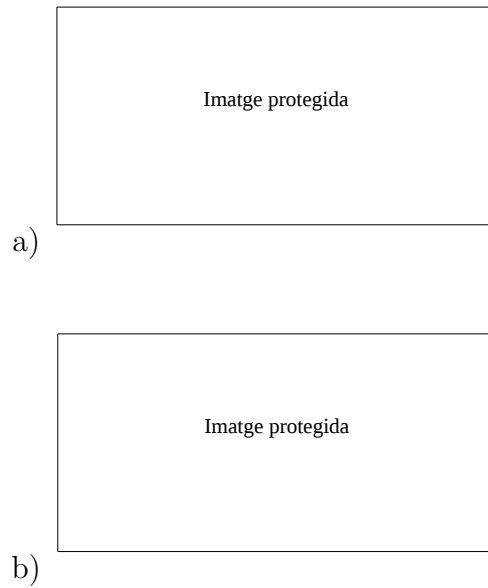


Figura 6.48.: a) Contorn de velocitat del bufador de triple ranura (detall zona central), b) Esforç tallant a la superfície d'impacte (detall zona central), $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 2mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$

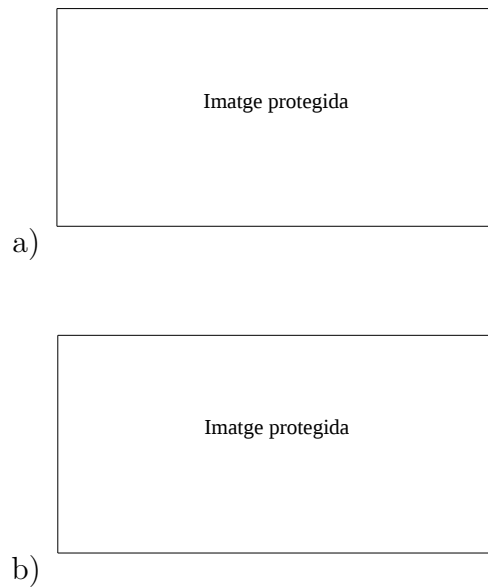


Figura 6.49.: a) Contorn de velocitat del bufador de triple ranura (detall zona central), b) Esforç tallant a la superfície d'impacte (detall zona central), $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 4mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$

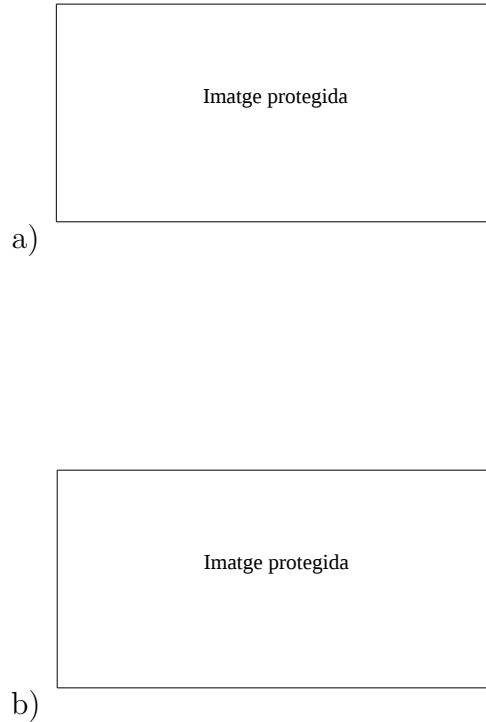


Figura 6.50.: a) Contorn de velocitat del bufador de triple ranura (detall zona central), b) Esforç tallant a la superfície d'impacte (detall zona central), $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 6 mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$

A la figura que segueix es mostra la distribució de l'esforç tallant en relació a la distribució del nombre de Nu . Tal i com apunta [11] el coeficient de fricció que es calcula com

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho v_{jet}^2} \quad \tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (6.77)$$

presenta un mínim a la zona d'estancament i dos màxims totalment simètrics a cada costat de l'eix de la ranura central. En aquesta figura no s'ha calculat el coeficient C_f però al ser proporcional al valor de l'esforç tallant τ_w les distribucions seran similars.

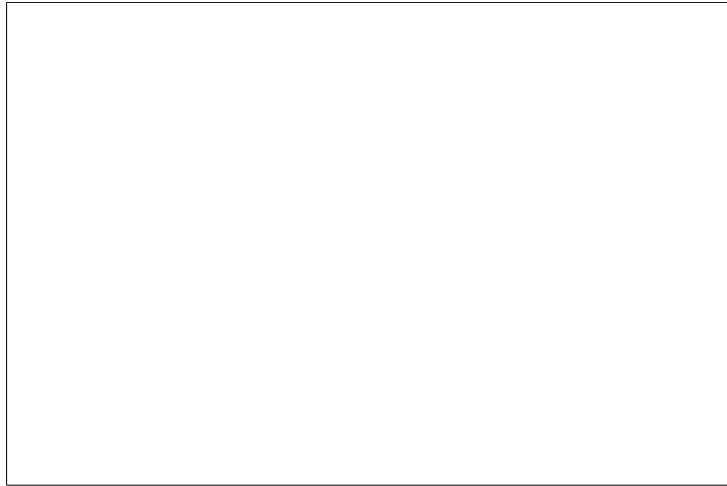


Figura 6.51.: Distribució del nombre de Nusselt i de l'esforç tallant a la paret d'impacte del bufador, per un bufador de triple ranura, $X = "W_{llavi}/2 mm"$, $H = "b mm"$, $W/3 = "a/3 mm"$, $L = 6 mm$, $V_{jet} = "V_1 m/s"$

6.10. Conclusions

A continuació es presenta un resum de les conclusions assolides en l'anàlisi del coeficient de transferència de calor per convecció que s'ha realitzat en aquest capítol:

Per a poder fer un bon estudi del valor de \bar{h} és necessari escollir un model de turbulència adequat que sigui capaç de modelar correctament la transferència de calor segons la configuració del cas que s'està estudiant. A partir dels treballs d'altres autors recollits a la bibliografia, s'ha vist que els resultats són molt sensibles al model de turbulència escollit per a la realització de les simulacions, i que d'entre els models disponibles, els que presenten un millor comportament són els que estan adaptats per a baixos nombres de Reynolds.

Una vegada determinat el model de turbulència idoni per a portar a terme les simulacions, s'ha procedit a fer un estudi de l'efecte dels diversos paràmetres que entren en joc a l'hora de definir el cas, els resultats dels quals s'exposen a continuació:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

7. Validació del coeficient de transferència de calor per convecció

En el cap. 6 s'ha aconseguit assolir un bon ajust del coeficient de transferència de calor per convecció ' \bar{h} ' entre les dades experimentals recopilades a la bibliografia i els resultats obtinguts mitjançant el software de simulació; no obstant, es dona la casuística que aquests resultats estan recollits per unes determinades condicions de treball diferents de les habituals pròpies del procés d'impressió flexogràfica (bàsicament, diferents nombres de Reynolds, diferent separació entre el substrat i el propi bufador i finalment diferents temperatures).

En aquest capítol es considera necessari validar experimentalment el valor del coeficient ' \bar{h} ' que s'ha obtingut mitjançant simulació CFD en el cap. 6 per a la configuració actual de les pantalles d'assecatge entre tinters ($W = "a\text{ mm}"$ i $H = "b\text{ mm}"$). El procés de validació d'aquest coeficient es planteja de manera indirecta, és a dir, no s'ha obtingut la distribució del nombre de Nusselt ó ' \bar{h} ' al llarg del llavi de la pantalla, sino que el valor d'aquest coeficient s'obté indirectament a partir de la impressió d'un treball de característiques conegudes sota unes determinades condicions de treball controlades. El muntatge experimental que s'ha utilitzat es mostra a la fig. 7.2, i la seva descripció es planteja a la sec. 7.1.

Per a la validació d'aquest coeficient és necessari, a més a més, la implementació del model matemàtic que s'ha plantejat en el cap. 9, que evalua la capacitat d'assecatge d'una pantalla sota diversos paràmetres de treball, essent un dels paràmetres indispensables per aquest càlcul, el valor del coeficient de transferència de calor per convecció ' \bar{h} ' que es vol determinar. El procés de validació consisteix en comprovar si el coeficient ' \bar{h} ' que s'ha determinat en el cap. 6 expressat en unitats de (W/m^2K), i amb el mètode de càlcul proposat en el cap. 9, tot reproduïnt de manera teòrica el muntatge de la fig. 7.2, permet assolir la velocitat d'impressió que s'ha assolit experimentalment, obtenint una mostra totalment seca en el punt C del muntatge descrit a la fig. 7.2. Si la velocitat d'impressió assolida a màquina, coincideix amb la velocitat d'impressió assolida amb el càlcul teòric del cap. 9 i amb el valor del coeficient obtingut en el cap. 6, aleshores es considera el valor del coeficient ' \bar{h} ' com a validat.

"Paràgraf deixada intencionadament en blanc"

quantitat de solvent abans de que el material passi a estar sota els efectes de la convecció forçada provocada per la pantalla d'assecatge.

- És en el punt B on es produeix l'assecatge per convecció forçada d'aire a alta temperatura, durant una llargada de " $W_{llavi} mm$ " (aquesta longitud es correspon amb la llargada del passamà d'alumini que actua com a base del llavi de la pantalla d'assecatge, tal i com es pot veure a la fig. 7.7).

- Del punt B al punt C , succeeix exactament el mateix que passava en el tram $A-B$, on també s'evapora una certa quantitat de solvent per la interactuació del solvent amb l'aire ambiental.

- En el punt C es col·loca una camisa porta-clixé però sense muntar-hi a sobre el clixé que se sol incorporar en el procés d'impressió (es tracta d'una camisa porta-clixé de cautxú a fons continu).

- Per a cada velocitat de sortida de l'aire del llavi de la pantalla (tot mantenint la temperatura de sortida d'aquest aire a un valor constant), s'incrementa paulatinament la velocitat d'impressió fins que la mostra impresa deixa d'estar totalment seca i al entrar en contacte amb la camisa porta-clixé situada en el punt C aquesta camisa comença a quedar parcialment entintada ja que arrenca part de la imatge impresa que no ha quedat ben seca del substrat que s'ha imprès.

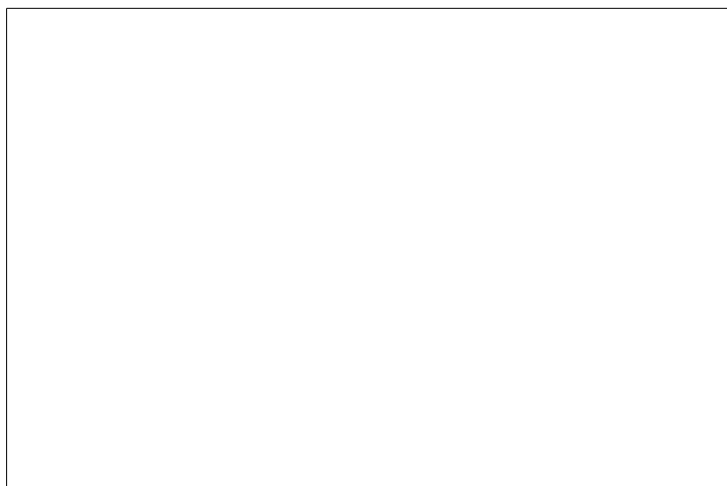


Figura 7.2.: Muntatge experimental impressora "M8" (representació esquemàtica), per a validació del coeficient de transferència de calor per convecció \bar{h} (diàmetre en mm)



"Paràgraf deixada intencionadament en blanc"





"Paràgraf deixada intencionadament en blanc"

aportat mitjançant resistències elèctriques. Per a les proves que s'han realitzat s'ha establert la consigna de temperatura a " T_1 °C".

- La velocitat de l'aire a la sortida del llavi s'ha pogut variar a través de modificar el règim de gir del ventilador del sistema d'impulsió; s'han realitzat els assajos per diverses velocitats de l'aire, anant del rang de valors compresos entre " V_2 m/s" i " V_3 m/s".
- La velocitat d'impressió del material, que ha variat entre 0 m/min i " $V_{material}$ m/min".
- La temperatura del tambor central de contrapressió s'ha mantingut a " T_{tambor} °C", mitjançant el circuit de regulació de temperatura intern de què disposa. El diàmetre del tambor és de " \varnothing_{M8} mm". Es considera que aquesta temperatura es manté estable i constant al llarg del temps a tota la superfície del propi tambor.
- La longitud en què es produeix interacció entre l'aire calent i el substrat imprès que cal assecat és de " W_{llavi} mm", corresponent a la llargada del llavi de la zona d'impulsió de la pantalla.
- L'obertura del llavi es manté constant, i és de " a mm" (la pantalla d'assecatge només disposa d'un sol llavi).
- Hi ha una distància de separació " b mm" entre el llavi i la superfície del tambor central.
- El material quan arriba al punt A s'estima que es troba a una temperatura de " T_{tambor} °C" (la temperatura del material s'ha igualat amb la temperatura del tambor).
- La tinta quan s'aplica al punt A està a una temperatura ambiental de 20°C.
- S'utilitza un anilox de $8\text{cm}^3/\text{m}^2$, i una lineatura de $200\text{l}/\text{cm}^2$.
- El treball que s'imprimeix és un fons de color cian, essent l'amplada d'impressió de 1.030mm .
- El material que s'imprimeix és polipropilè nacrà amb un gruix de $25\mu\text{m}$, i té una amplada de 1.200mm .

Resultats experimentals:

A la taula següent es recullen les velocitats d'impressió màximes que ha estat possible assolir per a cada velocitat de l'aire que sortia del llavi de la pantalla, amb el condicionant d'aconseguir en el punt C de la fig. 7.2 una mostra totalment seca (no s'embrutava la camisa da cautxú).

Totes les dades s'han recollit establint una temperatura de consigna d'assecatge de " T_1 °C", a excepció de la primera dada en què no circulava aire a través del llavi de la pantalla d'assecatge.



Taula 7.1.: Velocitat d'impressió, en funció de la velocitat de sortida de l'aire del llavi de la pantalla d'assecatge, per tal d'obtenir una mostra totalment seca en el punt C de la fig. 7.2

De la taula. 7.1 es pot veure com lògicament i tal com s'ha descrit en el cap. 6 a major velocitat de sortida de l'aire del llavi, és a dir, a un major nombre de Reynolds, major capacitat d'assecatge del bufador, per tant hi ha una clara dependència entre ells. També és important notar que tot i que l'assecatge durant la primera mesura estava aturat, ha estat possible arribar a una velocitat d'impressió de fins a " V_0 m/s" obtenint la mostra final impresa totalment seca; això s'explica degut al fet que el tambor de contrapressió es manté a una temperatura estable de " T_{tambor} °C" mitjançant el sistema de control de temperatura anomenat *termtrol* que porta incorporat la màquina i que l'efecte combinat d'aquesta temperatura per sobre de l'ambient (que es trobava a una temperatura de 20°C) i la llargada considerable que hi ha entre els punts A i C de la fig. 7.2 proporcionen les condicions suficients per assecar la quantitat de tinta aplicada durant la impressió.

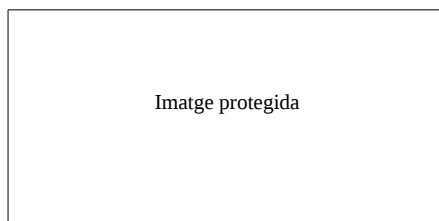


Figura 7.6.: Velocitat d'impressió per obtenir una mostra totalment seca en el punt C segons l'experiment de la fig. 7.2, per una temperatura d'assecatge de " T_1 °C"

Segons es desprèn de la fig. 7.6, si es fa la recta de regressió a partir de les dades recollides experimentalment es pot visualitzar que, per al rang de velocitats assajades, hi ha una dependència totalment lineal entre la velocitat d'impressió que s'assoleix i la velocitat de sortida de l'aire del llavi que es dirigeix contra la imatge impresa sobre el substrat.

Els valors de velocitat de màquina assolida per aquest treball, i que es mostren a la fig. 7.6, no es corresponen amb els valors de velocitat als quals treballa una màquina en producció; de fet, una màquina és capaç de treballar a velocitats molt més elevades que poden arribar a valors de l'ordre de $400m/min$. Això és factible perquè no és necessari assecar al 100% el treball de l'etapa o tinter precedent, com per a poder-hi aplicar a sobre el color del tinter que segueix.

L'elecció que s'ha pres de portar a terme les proves provocant / assegurant que s'assequi totalment el solvent contingut en la tinta en arribar al punt C es deu a la voluntat de poder fer un anàlisi comparatiu dels diversos resultats obtinguts, tots ells portats a terme sota unes mateixes condicions de treball.

7.2. Anàlisi de resultats

Una visualització més detallada del procés d'assecatge mitjançant convecció forçada que es porta a terme en l'experiment mostrat a la fig. 7.2, es pot analitzar segons l'esquema que es mostra a la fig. 7.7.

La quantitat de tinta aportada durant l'experiment, és en tots els casos la mateixa ja que s'ha mantingut l'anilox, el clixé i les condicions en què es trobava la tinta en els diversos casos.

En aquest apartat es desitja quantificar quina és la quantitat d'energia (J) que es transmet des del bufador cap al substrat, i per tant cap a la tinta que es desitja assecar, per a les diverses velocitats d'impressió assolides. En tots els casos, tal i com s'ha dit, la quantitat de tinta aportada és la mateixa, aleshores la quantitat d'energia necessària per evaporar el solvent contingut en la tinta, és també la mateixa en els diferents casos. La única diferència entre els diversos punts de treball, rau en el fet que a mesura que el material o substrat augmenta la seva velocitat d'impressió, el bufador també ha d'augmentar la velocitat de sortida de l'aire a través del llavi per així augmentar el coeficient de transferència de calor per convecció i així transmetre la mateixa energia cap al material. Cal augmentar el coeficient \bar{h} , ja que a major velocitat del material és menor el temps que el bufador pot actuar sobre el material (tram de color vermell a la fig. 7.7), i per tant és necessari transmetre aquesta energia de manera més ràpida.

No obstant, no tota l'energia que és capaç d'aportar el bufador es transmetrà única i exclusivament cap a la tinta i al substrat, sinó que hi ha una certa part d'aquesta energia que s'escaparà a través del tambor central (que és metàl·lic i per tant bon conductor del calor) cap al circuit de regulació de temperatura del bombo. A la part final d'aquesta secció també es fa una anàlisi energètica de com es distribueix l'energia que proporciona el bufador, per saber quina part és aprofitada i quina residual.

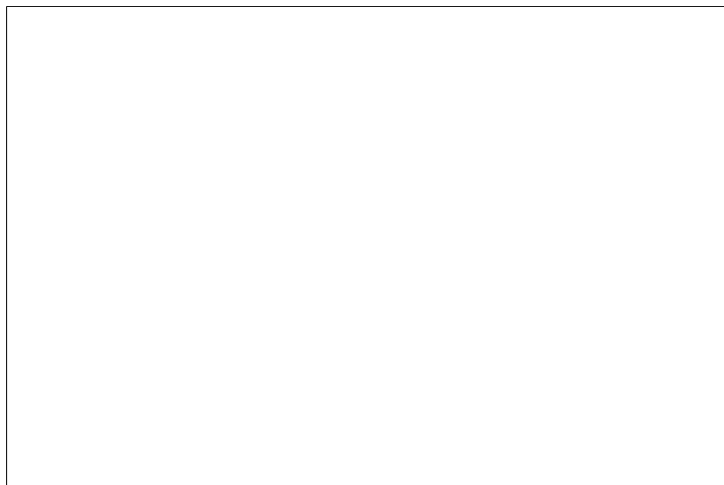


Figura 7.7.: Esquema del procés d'assecatge que es porta a terme en la pantalla testejada a la "M8" (cota en mm)

7.2.1. Valors del coeficient de transferència de calor per convecció obtinguts via simulació

A partir de les simulacions realitzades en el cap.6 es disposa del valor teòric del coeficient de transferència de calor per convecció forçada d'un bufador de ranura amb confinament com el que s'ha utilitzat per els experiments. Si es representen en una gràfica els resultats obtinguts, es pot veure que hi ha una correspondència lineal entre la velocitat de sortida de l'aire del bufador i el valor obtingut del coeficient \bar{h} , per el rang de velocitats simulat mitjançant OpenFOAM®, que comprèn des de " $V_2 m/s$ " a " $V_3 m/s$ ".



Figura 7.8.: Coeficient de transferència de calor per convecció en funció de la velocitat de sortida de l'aire del llavi (s'ha considerat l'amplada del llavi igual a " $W_{llavi} mm$ ")

Dels resultats de la fig. 7.6 es desprèn que per tal de poder augmentar la velocitat d'impressió tot obtenint la mostra totalment seca després de passar sota l'acció de la pantalla d'assecatge i fer tot el recorregut del tram $A - C$, és necessari incrementar proporcionalment la velocitat que té l'aire just a la sortida del llavi de la pantalla. En base a la dependència que es mostra entre les variables involucrades a la fig. 7.8 es busca quina relació hi ha entre aquests tres paràmetres: el coeficient de transferència de calor per convecció \bar{h} , el temps que tarda el material a passar a través de la pantalla $\Delta t_{pantalla}$, i finalment la densitat de calor que ha rebut la superfície d'impacte (material imprès i tambor de contrapressió). Per entendre millor com es fa l'intercanvi d'energia entre el material i el substrat, es representa el conjunt a la fig. 7.9, on l'element superior representa la part corresponent al llavi del bufador, i la part inferior de la imatge representa el moviment que experimenta el material quan passa per sota de la pantalla d'assecatge.

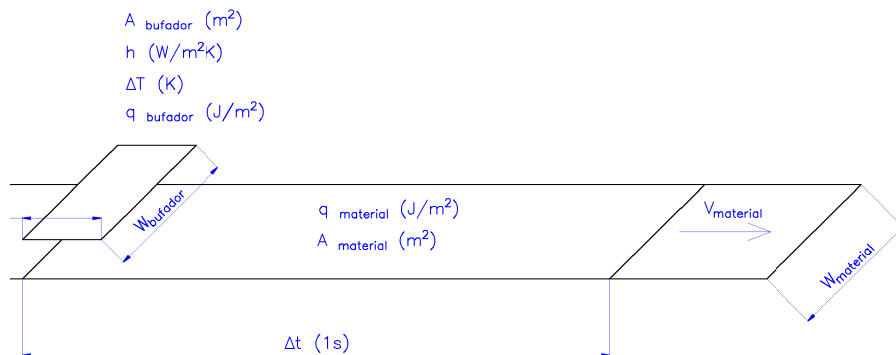


Figura 7.9.: Representació esquemàtica de la transferència de calor que es produeix entre el bufador i la superfície d'impacte, en el treball d'impressió portat a terme a la "M8"

Els paràmetres de la fig. 7.9 es defineixen tot seguit:

$A_{bufador}$, secció del bufador de la pantalla (la llargada de la peça on s'ha practicat l'orifici del llavi és de " W_{llavi} mm" i la pantalla té una amplada de 1,2m).

$A_{material}$, secció del material que passa a través del bufador durant un segon.

$W_{bufador}$ i $W_{material}$, amplades del bufador i del material, respectivament en l'experiment que s'ha portat a terme, tots dos tenen una amplada de 1,2m.

Δt , interval de temps considerat, igual a un segon.

\bar{h} , mitjana del coeficient de transferència de calor per convecció que aporta el bufador en una llargada de " W_{llavi} mm" corresponent al llavi d'alumini (ranura de " a mm", separat verticalment a una distància de " b mm" respecte del substrat en moviment).

$q_{bufador}$, densitat de calor del bufador.

$q_{material}$, densitat de calor del material que resta sota l'acció del bufador (aquest material es correspondria a la suma de la tinta, el substrat i finalment el tambor de contrapressió).

$V_{material}$, velocitat d'impressió, o velocitat del material.

a) Dades relacionades amb el bufador:

Es calcula la quantitat d'energia per unitat de superfície que és capaç d'aportar el bufador, durant un interval de temps d'un segon, en funció de la velocitat de l'aire a la sortida del llavi.



Taula 7.2.: Densitat de calor del bufador de la pantalla utilitzada en el muntatge experimental de la "M8"

b) Dades relacionades amb la superfície d'incidència:

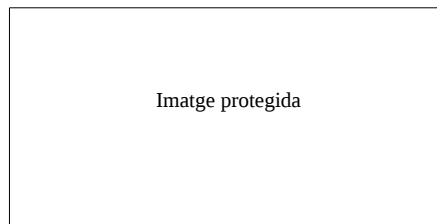
Es calcula com es distribueix la quantitat d'energia que aporta el bufador, al llarg de tota la superfície de material que ha restat sota l'acció del bufador durant el temps considerat que és d'un segon.



Taula 7.3.: Densitat de calor del material una vegada ha passat sota els efectes de la pantalla d'assecatge utilitzada en el muntatge experimental de la "M8"

c) Càlcul del paràmetre constant que representa el procés d'assecatge, degut a l'efecte de la pantalla d'assecatge

En aquest punt es calcula la relació que hi ha entre la quantitat d'energia que rep la superfície en moviment quan travessa la pantalla d'assecatge (es tracta de la mateixa superfície que el propi bufador " $A_{bufador} m^2$ ") gràcies al coeficient de transferència de calor per convecció, i el temps que aquesta superfície que s'esmenta tarda a travessar la pròpia pantalla ($\Delta t_{bufador}$).



Taula 7.4.: Cerca de la constant de l'assecatge, en el muntatge experimental de la "M8"

D'aquesta anàlisi es desprèn que per un mateix treball d'impressió, i sota una mateixa configuració del treball que s'està imprimint (mantenint el mateix nombre de pantalles d'assecatge actives, les mateixes temperatures d'assecatge, la mateixa aportació de tinta...) i únicament canviant la velocitat amb què surt l'aire del llavi o bé variant la velocitat d'impressió, hi ha una relació directa entre el temps durant el qual el material passa sota l'acció del bufador, el coeficient de transferència de calor per convecció que aporta el bufador de la pantalla, i la diferència de temperatures entre la superfície del cos impressor i l'aire que s'utilitza per a assecatge, que ve donat per una constant que en el cas de la pantalla pren el valor de $\bar{C}_{tassecatge} = 72,95$. Per acceptar que el valor d'aquesta constant és correcte, cal comprovar que la quantitat de solvent evaporat en tots els casos sigui aproximadament la mateixa.

Cal tenir en compte però que cada configuració d'impressió tindrà la seva pròpia constant, i aquesta constant serà vàlida sempre per un determinat percentatge de quantitat de tinta evaporada.

$$\text{"Equació intencionadament en blanc"} \quad (7.1)$$

Aquesta equació descriu el procés d'assecatge només en el punt B de la fig. 7.2. En apartats següents es busca la constant d'assecatge per els diversos trams en els

quals s'ha dividit l'experiment, $A - B$, B i $B - C$, i la del conjunt sencer. També es proposa l'addició d'un factor multiplicador a eq. 7.1, per obtenir una major correlació entre els resultats experimentals i els teòrics.

Mitjançant el model matemàtic es comprovarà la veracitat de la eq. 7.1 sota diverses condicions de treball, en la sec. 7.2.2.

d) Rendiment del procés d'assecatge entre tinters

Si s'analitza amb més detall els resultats de la taula. 7.4, s'aprecia que a majors velocitats d'impressió cal augmentar el coeficient de transferència de calor per convecció per a poder mantenir la mateixa capacitat d'assecatge (assecar totalment la mostra abans d'arribar al punt C de la fig. 7.2) amb la mateixa llargada disponible de la pantalla " $W_{llavi} mm$ ". Això es tradueix amb una major quantitat d'energia que transporta el bufador cap a la superfície d'impacte (tal com s'ha dit unes línies més amunt, aquesta superfície d'impacte en el cas analitzat es tradueix en la tinta composta per la part de sòlids i de solvents, el material o substrat sobre el qual s'està imprimint, i finalment el tambor de contrapressió que es manté a una temperatura constant gràcies al *termtrol*). Aquesta energia s'inverteix doncs en escalfar la tinta, evaporar el dissolvent contingut a la pròpia tinta, escalfar el material, i la resta d'energia es transmet a través del tambor de contrapressió cap al circuit de refrigeració intern que porta incorporat el tambor i que queda regulat per el *termtrol*). Si es considera que la superfície del tambor es manté a " $T_{tambor} ^{\circ}C$ ", gràcies al circuit de refrigeració/calefacció intern que aporta el *termtrol*, aleshores és raonable considerar que el material no sobrepassarà aquesta temperatura de " $T_{tambor} ^{\circ}C$ ", i que l'excés d'energia o sobrant es dirigeix al circuit de control de temperatura.

Com que l'energia per assecar o evaporar el solvent contingut en la tinta és sempre la mateixa, de la taula. 7.4 es desprèn que a majors velocitats d'impressió més ineficient es torna el procés energèticament ja que hi ha una major quantitat d'energia que no s'aprofita per a l'assecatge i es dirigeix cap al circuit de refrigeració/escalfament del tambor.

A la sec. 7.2.3.2 es quantifica de manera numèrica aquest rendiment.

7.2.2. Càlcul teòric de la quantitat de solvent evaporada

En aquest apartat es calcula mitjançant la modelització matemàtica que s'ha fet en el cap. 9 del procés d'assecatge, quina és la quantitat de solvent que s'evapora en els diversos trams de la fig. 7.2. En el tram previ al punt A (tram que va des del pisor fins al punt A), el material assoleix la temperatura del tambor, per tant es considera que quan s'aplica la tinta sobre el substrat, les condicions inicials de temperatura del substrat són de " $T_{tambor} ^{\circ}C$ ".

1. En el punt A , s'aplica la tinta sobre el substrat. La tinta es troba a unes condicions inicials ambientals de $20^{\circ}C$, i el substrat com ja s'ha dit abans, es troba a una temperatura inicial de " $T_{tambor} ^{\circ}C$ ".

2. En el tram comprès entre el punt A i el punt B , té una longitud de $0,449m$ no disposa d'assecatge per convecció forçada, i el solvent de la tinta s'asseca per interacció d'aquesta amb l'ambient. En quant al coeficient de transferència de calor per convecció durant aquest tram, s'assimila al cas d'una placa plana a temperatura constant tal i com es mostra a la sec. 7.2.2.1.
3. Punt B , on entra en acció l'assecatge per convecció forçada que proporciona la pantalla d'assecatge. La pantalla afecta l'assecatge de la mostra impresa durant una longitud de " $W_{llavi} mm$ ", que es correspon amb la llargada de la base d'alumini del llavi de la pantalla.
4. Tram $B - C$, amb una longitud de $2,965m$, on tampoc hi ha assecatge per convecció forçada, i el solvent també s'asseca per la pròpia interacció amb l'ambient, al igual que succeïa en el tram $A - B$.

7.2.2.1. Coeficient de transferència de calor per convecció en els trams on no hi ha convecció forçada (trams $A - B$ i $B - C$)

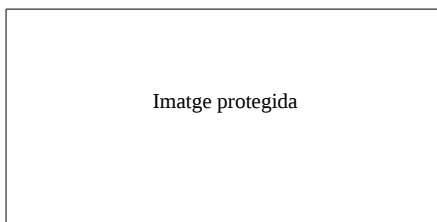
Tal i com s'ha dit més amunt, i per simplificar el problema, es considera que aquests dos trams es poden assimilar al cas d'una placa plana la qual es troba a temperatura constant (" $T_{tambor} ^\circ C$ "), en la que per sobre la seva cara superior hi circula aire a una determinada temperatura (temperatura ambiental $20^\circ C$), i a una determinada velocitat constant (equivalent a la velocitat d'impressió).

La referència [3] proporciona la fórmula eq. 7.2, per a una capa límit dintre del règim laminar

$$\bar{h} = \frac{\kappa}{l} \cdot 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (7.2)$$

Es comprova que en les condicions experimentals no s'hagi sobrepassat la zona en què la capa límit sigui laminar (i que segons [3] es pot considerar un valor del nombre de Reynolds crític de $Re_c = 5 \cdot 10^5$), i que per tant la fórmula esmentada sigui aplicable; es considera el cas més desfavorable que és quan s'ha imprès a més velocitat i durant el tram més llarg que és per tant el tram que va del punt B al punt C .

$$Re = 274.872,9 < 5 \cdot 10^5 \quad (7.3)$$



Taula 7.5.: Coeficients de transferència de calor per convecció en els trams $A - B$ ($l = 0,44869m$) i $B - C$ ($l = 2,96539m$) de la fig. 7.2.

7.2.2.2. Estimació de la quantitat de tinta aplicada, a partir d'una porció de mostra impresa seca, de secció coneguda

En el capítol dedicat a les tintes s'ha explicat que les tintes, estan compostes bàsicament per sòlids en un 30% i solvents en un 70%. Tot seguit es prenen les dades necessàries per poder quantificar experimentalment la quantitat de tinta (només la part corresponent als sòlids) que han quedat adherida a la mostra impresa, una vegada s'ha portat a terme el treball d'impressió que s'ha explicat prèviament.

Les dades de la taula que segueix es corresponen al pesatge d'una mostra del treball realitzat, quan aquesta ja està totalment seca, i per tant no conté solvents. Es talla una mostra de dimensions $100cm^2$, i es mesura la seva massa una vegada impresa; tot seguit es fa un frotis a la mateixa mostra per retirar tota la capa impresa fins que quedi el substrat plàstic completament nu, i per tant com si es tractés de material nou verge, i es torna a mesurar la massa de la mostra.

Mesura	Mostra impresa (g)	Mostra sense imprimir (g)	Sòlids en la mostra (g)
1	0,1881	0,1820	0,0061
2	0,1880	0,1821	0,0059
3	0,1882	0,1822	0,0060
Mitjana	0,1881	0,1821	0,0060

Taula 7.6.: Quantitat de sòlids romanents a la mostra impresa durant les proves d'impressió amb la "M8" (les dimensions de la mostra analitzada són $100cm^2$)

A partir de la taula anterior, es coneix la quantitat de sòlids que han quedat adherits a la mostra impresa una vegada està totalment seca, que és de $0,6g/m^2$.

Per tal de calcular el gruix equivalent corresponent a aquesta quantitat de sòlids, és necessari conèixer la densitat dels sòlids continguts en la tinta, que com a valor

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"

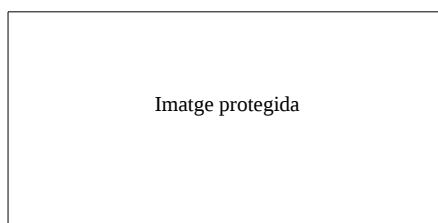
Gruix tinta (μm)	Sòlids (%)	Gruix sòlids (μm)	Solvent (%)	Gruix solvent (μm)	T_{tinta} ($^{\circ}C$)
1.3125	30	0,39375	70	0,91875	20

Taula 7.7.: Dades de la tinta, a introduir en el model matemàtic utilitzat per al càlcul de la capacitat d'evaporació de la pantalla d'assecatge entre tinters, per reproduir els resultats de les proves d'impressió dutes a terme a la "M8"

- Càlcul teòric de la quantitat de solvent evaporada en el tram $A - B$

Les condicions de contorn que s'han aplicat per al càlcul són:

- Temperatura d'aplicació de la tinta, $20^{\circ}C$.
- Temperatura inicial del substrat de tipus plàstic, " $T_{tambor}^{\circ}C$ " (la mateixa que el tambor central).
- La part més baixa del substrat està a una temperatura que es pren com a constant i que és igual a " $T_{tambor}^{\circ}C$ ".
- El coeficient de transferència de calor per convecció s'ha pres com el d'una placa plana de temperatura constant, tal i com s'ha dit més amunt.
- La quantitat de solvent aplicada és de $0,7248g/m^2$, corresponent a un gruix de $0,91875\mu m$ de solvent (degut a que el model matemàtic que s'ha preparat només permet treballar amb un únic solvent, es considera que la tinta utilitzada per imprimir només conté com a solvent l'Etanol), i amb una densitat de $788,89kg/m^3$.

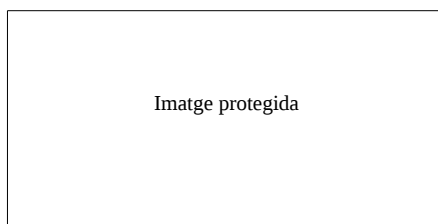


Taula 7.8.: Quantitat de solvent evaporada en el tram $A - B$ segons l'esquema de la fig. 7.2 (valors calculats amb el model matemàtic que s'ha generat)

Tot i que augmenta lleugerament el coeficient de transferència de calor per convecció a mesura que s'apuja la velocitat d'impressió, la quantitat de solvent evaporada disminueix gradualment degut a que hi ha menys temps de contacte entre la mostra impresa i l'aire ambient. L'augment del coeficient h no és suficient per mantenir constant $M_{solvent_{evap}}$ a mesura que augmenta la velocitat d'impressió.

- Càlcul teòric de la quantitat de solvent evaporada gràcies a la pantalla d'assecatge, punt B

Les condicions finals del tram $A - B$, són les condicions inicials per als càlculs de l'evaporació en el punt B .



Taula 7.9.: Quantitat de solvent evaporada en el punt B segons l'esquema de la fig. 7.2 (valors calculats amb el model matemàtic que s'ha generat)

Veient els resultats de la taula. 7.9, es pot apreciar com en tots els casos assajats la quantitat de solvent evaporat és similar, però per aconseguir aquesta mateixa capacitat d'assecatge a mesura que augmenta la velocitat d'impressió, ha estat necessari augmentar de manera notable el coeficient de transferència de calor del bufador (a una velocitat del jet de " $V_3 m/s$ " el coeficient \bar{h} és un 70% superior al valor del coeficient \bar{h} necessari a una velocitat del jet de " $V_2 m/s$ ").

Aquest fet implica que per una mateixa capacitat d'assecatge (mateix percentatge de solvent que s'asseca), a mesura que augmenta la velocitat d'impressió, és menor el rendiment energètic de la pantalla (s'aprofita una menor quantitat d'energia per el procés d'assecatge, respecte del total d'energia que aporta la pantalla).

- Càlcul teòric de la quantitat de solvent evaporada en el tram $B - C$

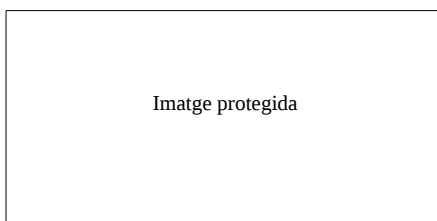
Al igual que en el punt anterior, les condicions finals resultants del punt B , són les condicions inicials per al càlcul de l'evaporació del tram $B - C$.



Taula 7.10.: Quantitat de solvent evaporada en el tram $B - C$ segons l'esquema de la fig. 7.2

La proporció de quantitat de solvent assecat manté la mateixa tendència que s'ha observat en el tram $A - B$.

- Recopilació de resultats



Taula 7.11.: Quadre resum del percentatge de la quantitat de solvent evaporada, segons l'experiment de la fig. 7.2 (valors calculats amb el model matemàtic que s'ha generat)

Tal com s'esperava, la quantitat de tinta assecada en tots els casos és similar i és molt propera al 100%, que era la condició imposada en l'experiment (per a cada velocitat de sortida del llavi de la pantalla s'apujava gradualment la velocitat d'impressió fins que la mostra final resultava totalment seca en arribar al punt C). Per a cada velocitat d'impressió, és diferent com es reparteix el percentatge d'assecatge en els diversos trams $A - B$, B i $B - C$, però la suma global dels diversos trams es manté en un mateix valor molt pròxim al 100% en tots els casos.

7.2.3. Càlcul de la constant d'assecatge per al procés d'impressió assajat

Uns paràgrafs més amunt s'ha calculat la constant que representa el procés d'assecatge de la fig. 7.2 (només la pantalla). La finalitat d'aquesta constant és relacionar el valor del coeficient de transferència de calor per convecció amb la velocitat d'impressió del treball, de manera que permet predir de aproximadament quin és el coeficient \bar{h} necessari per mantenir una mateixa quantitat de solvent evaporat quan es canvia la velocitat d'impressió del treball.

Cada treball en concret tindrà la seva constant, i l'aplicabilitat de la fórmula requereix que tots els paràmetres del sistema d'assecatge es mantinguin constants a excepció de la velocitat d'impressió i el coeficient \bar{h} .

Es calcula la constant d'assecatge de cada tram, a partir de la fórmula eq. 7.1, i posteriorment es calcula la constant del sistema global

$C_{tt,assecatge(A-B)}$	$C_{tt,assecatge(B)}$	$C_{tt,assecatge(B-C)}$	$C_{tt,assecatge(global)}$
9,82	72,15	166,82	248,79
9,05	72,91	153,69	235,64
8,37	72,79	142,18	223,34
7,77	73,14	132,05	212,96
7,24	72,21	123,06	202,52
6,77	74,62	115,05	196,45

Taula 7.12.: Constant d'assecatge global del procés d'assecatge de la fig. 7.2, segons eq. 7.1

A la taula. 7.12 es mostra el valor calculat de la constant d'assecatge per els diversos trams del procés d'impressió (es manté la condició d'aplicabilitat de la fórmula que és que el percentatge assecat sigui el mateix, que de fet oscil·la entre el 98 i el 100% aproximadament), i s'aprecia com aquest valor no és el mateix en tots els casos.

Es proposa modificar la fórmula original per un factor de correcció que tingui en compte l'efecte de la velocitat d'impressió del substrat, segons l'equació que segueix:

$$”Equació intencionadament en blanc” \quad (7.4)$$

La velocitat d'impressió a la fórmula del factor de correcció, s'ha d'introduir en m/s .

$C'_{tt.assecatge(A-B)}$	$C'_{tt.assecatge(B)}$	$C'_{tt.assecatge(B-C)}$	$C'_{tt.assecatge(global)}$
11,1	81,3	188,0	280,3
10,8	86,8	182,9	280,4
10,5	91,2	178,2	279,9
10,2	96,3	173,9	280,4
10,2	99,7	169,8	279,5
9,8	107,7	166,1	283,5

Taula 7.13.: Constant d'assecatge global del procés d'assecatge de la fig. 7.2, segons eq. 7.4

Amb aquesta modificació a la fórmula, sí que la constant d'assecatge pren un valor molt més similar en tots els casos que no pas amb l'expressió anterior; les lleugeres diferències entre uns valors i altres són degudes a la diferència que hi ha entre el percentatge total evaporat de la mostra que s'ha imprès, no obstant, tots els valors són pràcticament iguals al 100%.

Cal notar que tot i que la constant global del procés d'assecatge és molt semblant en tots els casos, si que presenta diferències significatives si s'analitza cada etapa de manera independent; això es deu a què en cadascuna de les etapes s'evapora una quantitat diferent de solvent segons es mostra a la taula.7.11, en funció de la velocitat d'impressió del material i dels coeficients de transferència de calor per convecció en cada etapa.

7.2.3.1. Càlcul de la constant d'assecatge per un sistema format per una única pantalla

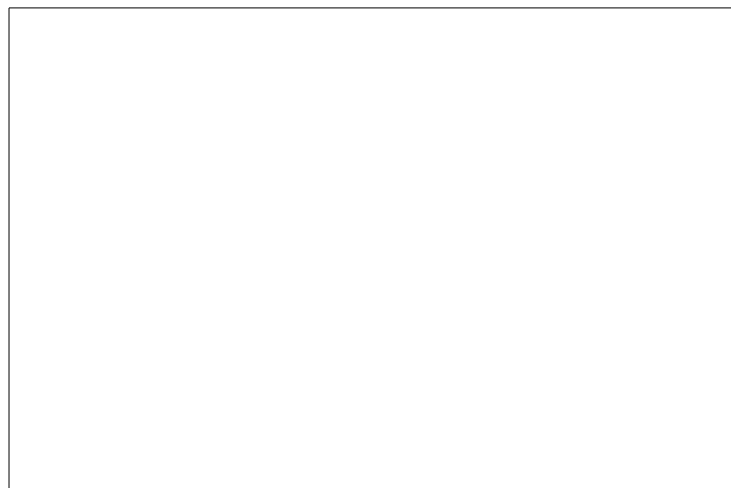
En aquest apartat es verifica el comportament de la eq. 7.4, amb els resultats proporcionats per el model matemàtic que calcula la taxa d'evaporació d'un treball sota unes determinades condicions de treball. Per simplificar els càlculs, només s'estudia una sola pantalla d'assecatge, sense tenir en compte el tram previ i el tram posterior a la pantalla, es tracta d'un cas simplificat com si la pantalla estigués situada immediatament després de la zona d'impressió.

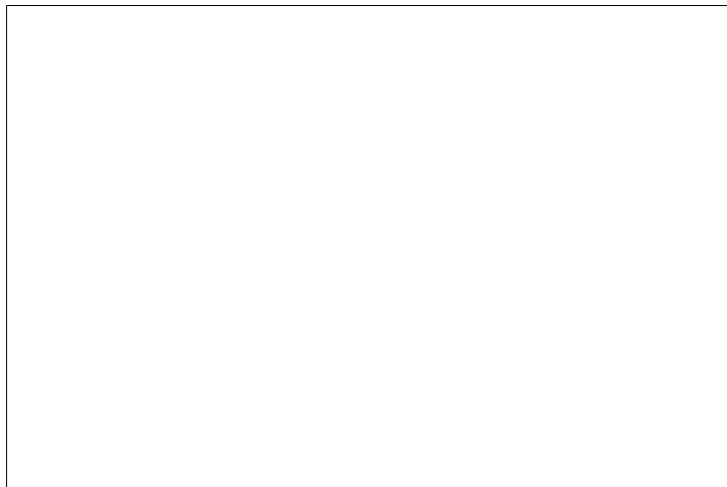
En tots els casos s'aplica el mateix treball que consisteix en el següent:

- S'aplica la mateixa quantitat de tinta que s'ha fet servir en el cas experimental, que té un gruix de $1,3125\mu m$, format per un 30% de sòlids i un 70% de dissolvents (el dissolvent està format totalment per Etanol).
- Les condicions inicials de temperatura de la tinta quan s'aplica és de 20°C.

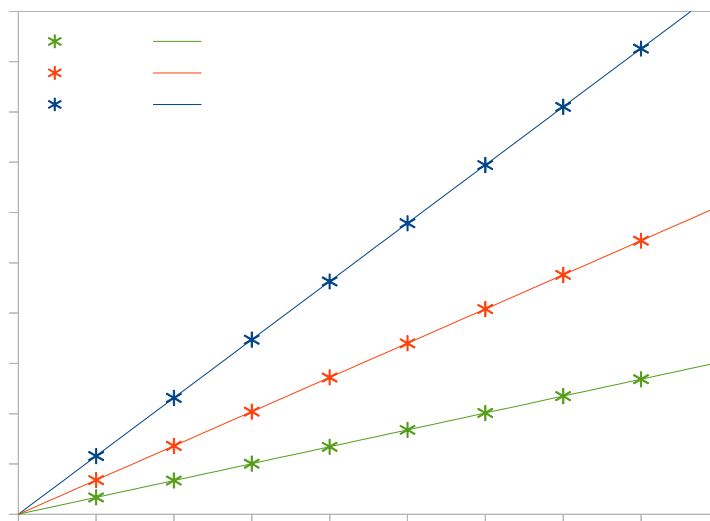
- El substrat està a unes condicions inicials de " $T_{tambor} \text{ } ^\circ\text{C}$ ".
- La temperatura de sortida de l'aire del bufador es manté constant i igual a " $T_1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ".
- La temperatura a la superfície del tambor és de " $T_{tambor} \text{ } ^\circ\text{C}$ ".
- El substrat de tipus plàstic té un gruix de $25\mu\text{m}$.
- S'estudien tres casos on el percentatge assecat és diferent ($\simeq 26\%$, $\simeq 49\%$ i $\simeq 74\%$).

En tots els casos, s'ha calculat quin és valor que ha de prendre el coeficient de transferència de calor per convecció, per assecat un mateix percentatge del total de tinta que s'ha aplicat a la mostra, a mesura que es varia la velocitat d'impressió (tot mantenint la resta de paràmetres del sistema d'assecatge invariables).





"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



A la figura anterior s'han representat els diversos punts de treball de la taula. 7.14, i es pot veure com per un mateix coeficient \bar{h} s'obté una menor capacitat d'assecatge a mesura que s'augmenta la velocitat d'impressió.

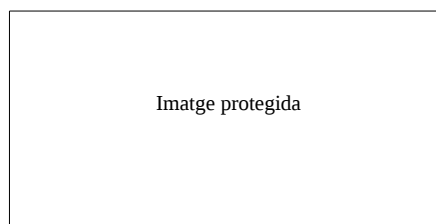
Tot i que s'han grafiat valors de transferència de calor de fins a $500W/m^2K$, en condicions reals de la màquina no s'assoleixen mai coeficients tan alts.

7.2.3.2. Rendiment del procés d'assecatge

En aquest apartat s'avalua de manera teòrica l'assecatge que es porta a terme en el punt B de la fig. 7.2, valorant la quantitat d'energia que ha aportat el bufador durant l'interval de temps en què el material i bufador interactuen entre ells, i comparant aquesta energia amb la que és necessària per assecar el solvent que s'ha evaporat en aquest període.

Dels càlculs que s'han fet amb el model matemàtic, i sota les condicions de treball de l'experiment, es sap que la temperatura assolida per la tinta i el material presenten molt poca variació essent de unes poques dècimes de grau i per tant el seu efecte es pot considerar negligible respecte de la quantitat d'energia necessària per evaporar el solvent. Resumint, l'energia que aporta el bufador s'inverteix en definitiva en evaporar el dissolvent, i la resta es transmet cap al circuit que manté la temperatura estable del cos impressor i que es troba a " $T_{tambor} \text{ } ^\circ C$ ".

Dels càlculs anteriors es sap la quantitat de massa que s'ha evaporat en el punt B , segons la taula. 7.9. A partir d'aquesta massa evaporada es calcula la quantitat d'energia necessària per a poder-la evaporar (l'amplada d'impressió de $1,03m$ és menor que l'amplada del material $1,2m$):



Taula 7.15.: Quantitat d'energia necessària per evaporar el solvent en l'etapa B , segons els valors de la taula. 7.9



Taula 7.16.: Desglòs energètic que es produeix en el punt B (sota la pantalla d'assecatge)

Tal com es deia abans, a mesura que augmenta la velocitat d'assecatge (i es desitja assecar la mateixa quantitat de solvent amb menor temps) el procés es torna cada vegada més ineficient ja que s'aprofita menys percentatge de l'energia en forma de calor que aporta el bufador.

7.3. Conclusions

Malgrat no ha estat possible determinar experimentalment el valor del coeficient \bar{h} per a la pantalla d'assecatge sota diverses condicions de treball, s'ha validat aquest coeficient de manera indirecta. La manera de fer-ho ha estat validar la capacitat d'assecatge de la pantalla a partir del coeficient teòric calculat a través de les simulacions amb OpenFOAM®, i comprovar que la taxa d'evaporació assolida amb aquest coeficient i predita amb el model matemàtic que s'ha creat en el cap. 9 es corresponia amb la quantitat evaporada que s'ha determinat experimentalment amb les proves fetes a la "M8". A través d'aquest procediment ha quedat validada la correcta aproximació amb la realitat del valor extret via simulació del coeficient de transferència de calor per convecció, així com del percentatge de massa de solvent evaporat calculat a partir del model matemàtic que s'ha fet.

A partir de l'anàlisi dels resultats obtinguts, s'ha determinat una constant del sistema d'assecatge que permet predir quin és el valor que ha de prendre el coeficient \bar{h} , per a mantenir una mateixa capacitat d'assecatge de la pantalla, a mesura que s'augmenta la velocitat d'impressió de la màquina i la resta de paràmetres que defineixen el treball resten invariables.

8. Comparativa dels punts de funcionament amb les diverses pantalles (assecatge entre tinters)

En el capítol cap. 5 s'ha proposat un nou disseny de pantalla d'assecatge entre tinters que pogués ésser aplicat directament a una impressora flexogràfica tipus "M4", tenint en compte que calia respectar les dimensions externes de la pantalla (el nou disseny proposat no podia sobresortir de l'envolupant externa de la pantalla actual, amb l'objectiu d'evitar interferències amb altres parts de la màquina), i tanmateix que també calia assegurar que la nova situació de les boques d'impulsió i d'aspiració de la pantalla fos compatible amb les obertures que actualment ja hi ha practicades a la bancada de la màquina i que per tant no fos necessari modificar-les.

Partint d'aquestes premisses, no s'ha considerat com a factor limitant en el nou disseny, que la nova pèrdua de càrrega global del sistema d'assecatge amb la instal·lació de les noves pantalles fos superior a la pèrdua de càrrega del disseny actual.

En aquest capítol es justifica quins seran els canvis que es produiran en el punt de funcionament (en tant que cabal i pressió) dels ventiladors de la màquina envers a la substitució de les pantalles actuals per el nou disseny proposat. Es comprova si els ventiladors actuals són suficients per vehicular el cabal d'aire desitjat a través de les noves pantalles o si bé, en el cas que el nou cabal impulsat sigui molt distant a l'actual cal modificar la potència de l'accionament del ventilador seleccionat (kW necessaris).

8.1. Determinació de la corba característica global del sistema d'assecatge entre tinters amb les pantalles actuals

Tot i que inicialment el nou disseny de la pantalla s'ha ideat per la impressora tipus "M4", es decideix que és més apropiat implementar el nou concepte de pantalla a les màquines que tenen una major demanda comercial dintre de la seva sèrie, que es correspondria al model "M3" amb la particularitat que hi ha disponible una màquina d'aquest model que permetrà validar les pantalles en condicions reals de producció durant un llarg període de temps. Es manté intacte el concepte que s'ha definit

per a la “M4”, amb la única diferència que s’adeqüen les dimensions de la pantalla de manera que siguin similars a les d’una “M3” i així assegurar no es produeixin interferències amb altres elements de la màquina.

Elements dels sistema d’assecatge entre tinters

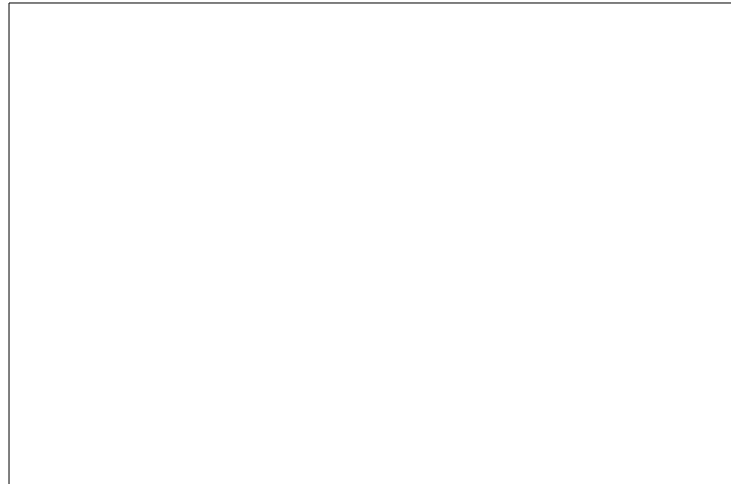


Figura 8.1.: Elements bàsics del sistema d’assecatge entre tinters

Descripció dels diversos elements continguts en la imatge de la fig. 8.1:

1. Filtre d’aspiració d’aire.
2. Font de calor, que pot tractar-se de resistències elèctriques, bateries d’oli tèrmic o bé cremadors de gas.

3. Ventilador d'impulsió.
4. Caixó d'impulsió (actua com a pulmó i proveeix d'aire de manera simultània a les diverses pantalles del cos impressor).
5. Conducte d'impulsió que connecta el caixó d'impulsió amb la boca d'impulsió de la pantalla mitjançant un tub flexible.
6. Pantalles d'assecatge distribuïdes al voltant del tambor central de contrapressió (7 pantalles d'assecatge en el cas de màquines de 8 colors, i 9 pantalles d'assecatge en el cas de màquines de 10 colors).
7. Conducte d'aspiració, que connecta el caixó d'aspiració amb la boca d'aspiració de la pantalla mitjançant un tub flexible.
8. Caixó d'aspiració (actua també com a pulmó i aspira l'aire de manera simultània de les diverses pantalles del cos impressor).
9. Ventilador d'extracció.
10. Vàlvules d'extracció i de recirculació.
11. Branca de recirculació (ofereix la possibilitat de reaprofitar el calor residual contingut en l'aire d'extracció del sistema d'assecatge, tot tornant-lo a introduir en el sistema i d'aquesta manera és possible reduir la potència que ha de proporcionar la font de calor, ja que el sal tèrmic que ha d'aportar és menor).

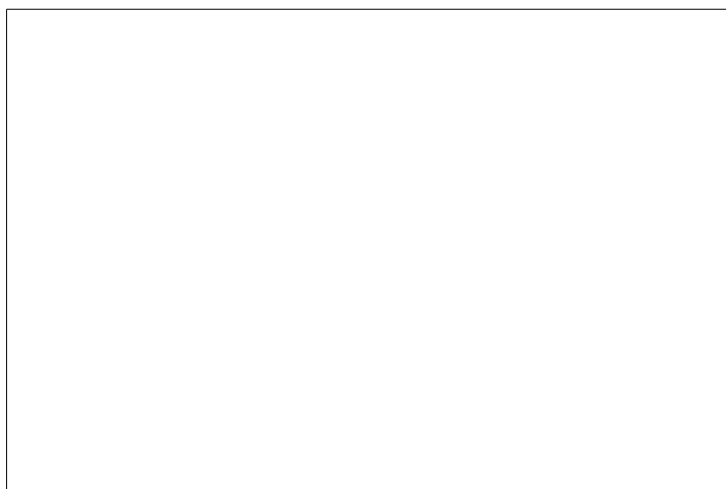


Figura 8.2.: Reaprofitament de la calor residual del cabal d'aire d'extracció, mitjançant un intercanviador de calor

Descripció dels diversos elements continguts en la imatge de la fig. 8.2:

1. Intercanviador de calor (facilita l'intercanvi de calor entre l'aire d'extracció i l'aire d'impulsió, evitant que ambdós circuits d'aire es mesclin entre ells). Aquesta disposició constructiva s'acostuma a utilitzar en aquelles màquines que funcionen amb tintes en base aigua, per tal d'evitar que la humitat que conté l'aire d'extracció es traspassi al circuit d'impulsió i que per tant pugui afectar negativament la capacitat d'assecatge de la màquina.
2. Font de calor.
3. Ventilador d'impulsió.
4. Ventilador d'extracció.

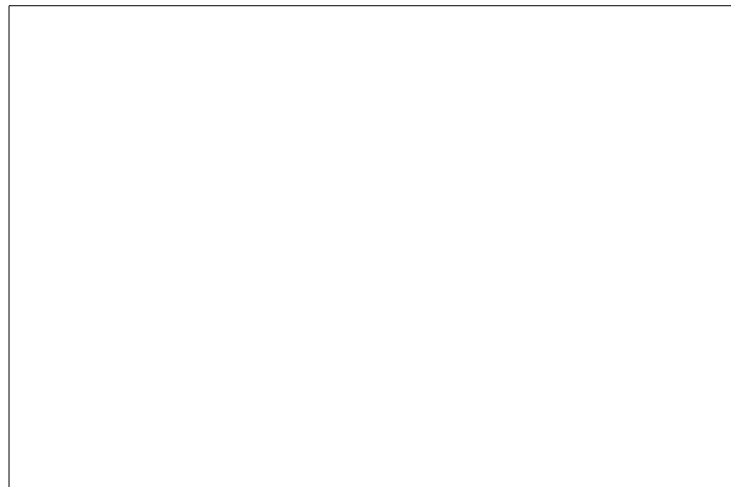


Figura 8.3.: Caixó d'impulsió i caixó d'aspiració

8.1 Determinació de la corba característica global del sistema d'assecatge entre tinters amb les pantalles actuals

Descripció dels diversos elements continguts en la imatge de la fig. 8.3:

1. Caixó d'impulsió.
2. Conducte d'impulsió que connecta el caixó d'impulsió amb la boca d'impulsió de la pantalla mitjançant un tub flexible.
3. Caixó d'aspiració.
4. Conducte d'aspiració que connecta el caixó d'aspiració amb la boca d'aspiració de la pantalla mitjançant un tub flexible.

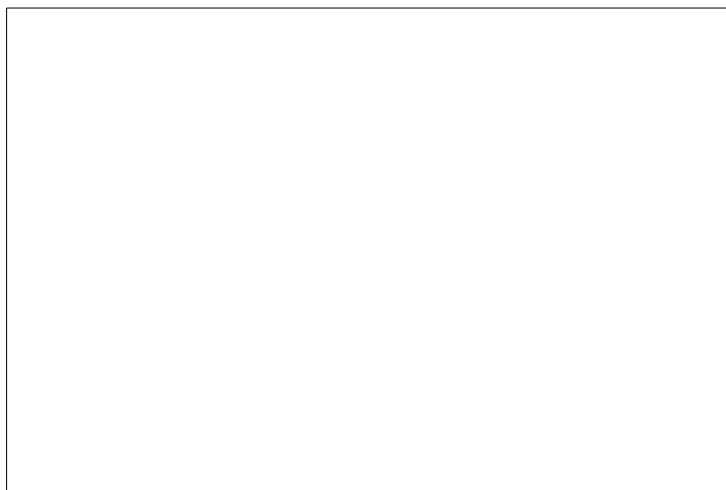


Figura 8.4.: Representació esquemàtica del sistema d'assecatge entre tinters i del túnel d'una impressora flexogràfica, amb quatre ventiladors

Q_n , cabal d'aire fresc que aspira la màquina (pot ser aire fresc de dintre la nau, o bé aire exterior). Aquest aire fresc, abans de ser impulsat a través de la màquina passa per un filtre per tal d'extreure les impureses que pugui contenir.

Q_s , cabal d'impulsió, que serà el que impulsen les diverses pantalles d'assecatge.

Q_r , cabal d'aire que entra a través de l'obturador longitudinal de la pantalla (també anomenat aire fals).

Q_a , cabal que aspira la màquina format per la suma de Q_s i Q_r .

Q_{rec} , cabal provinent del circuit d'aspiració de la màquina que es torna a introduir al sistema per aprofitar-ne la seva entalpia.

Q_{ex} , cabal d'extracció de la màquina cap a l'incinerador o cap a l'exterior de la nau.

Dades experimentals de màquines

Tal i com s'ha comentat en el capítol en què s'ha explicat el disseny de les pantalles, el nou prototip s'instal·larà durant l'etapa de validació a la màquina "M3".

A continuació es presenten les mesures experimentals que s'han fet a la màquina, per determinar la corba característica de la instal·lació del circuit corresponent a la impulsió de tinters, així com del d'aspiració de tinters. Aquestes dades s'han pres de manera que el circuit d'impulsió i el circuit d'aspiració siguin totalment independents entre ells, és a dir, sota la configuració en què la vàlvula de recirculació estava totalment tancada i la vàlvula d'extracció del sistema estava totalment oberta (d'aquesta manera s'assegura que no hi hagi interacció entre els dos circuits, doncs l'aire que s'aspira s'expulsa en la seva totalitat cap a l'exterior de la màquina).

Al llarg del desenvolupament del doctorat, i després de realitzar múltiples mesures experimentals ja sigui a màquines ubicades a les instal·lacions de Comexi o bé a màquines situades en les instal·lacions de client en les que calia fer un ajust del sistema d'assecatge, s'ha detectat la dificultat de prendre mesures de cabals de manera fiable ja que el disseny compacte de la màquina, els canvis de secció dels conductes de la instal·lació, i demés elements singulars de la màquina fan que la ubicació dels punts de mesura de pressió i cabal de la màquina en alguns casos no aportin mesures suficientment fiables.

Una vegada constatada aquesta dificultat, i després de parlar amb el proveïdor dels ventiladors de les màquines (Sistemes de ventilació Soler & Palau), aquest proposa com a solució instal·lar ventiladors amb la configuració *FLW*, que aporta la possibilitat de calcular el cabal que impulsa el ventilador de manera indirecta, a partir d'aplicar un factor k (cada model de ventilador té el seu propi valor associat) a la mesura experimental de pressió diferencial en uns determinats punts del ventilador situats de manera estratègica tal i com es mostra a la fig. 8.5

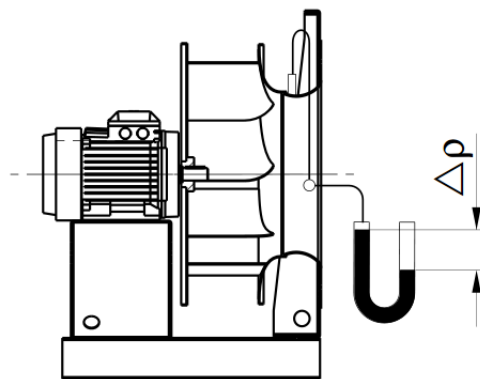


Figura 8.5.: Punts de mesura de pressió per al càlcul del cabal mitjançant el factor k (extret a partir de catàlegs de Soler & Palau) [66]

La fórmula proposada per S&P per al càlcul del cabal a partir del factor k i de la mesura corresponent al diferencial de pressió Δp es mostra tot seguit

$$V = k \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (8.1)$$

V , cabal volumètric impulsat per el ventilador (m^3/h)

k , factor que aporta el fabricant per a cada model de ventilador

Δp , pressió diferencial a l'entrada del ventilador (diferència entre l'entrada del ventilador i la cambra de succió)

$$V_\rho = V_{(\rho=1,205)} \cdot \sqrt{\frac{1,205}{\rho}} \quad (8.2)$$

V_ρ , cabal volumètric a la nova densitat desitjada (m^3/h)

ρ , densitat de l'aire a la temperatura desitjada (kg/m^3)

$V_{(\rho=1,205)}$, cabal volumètric a una densitat de $1,205 kg/m^3$

Tot seguit s'exposen les mesures que ha estat possible realitzar a la màquina candidata a instal·lar les noves pantalles d'assecatge entre tinters; només s'han pres les dades corresponents al sistema d'assecatge del cos impressor, i es separen les dades entre el circuit d'impulsió i el d'aspiració.

Es disposa de tres parelles de dades corresponents a tres ajustaments o punts de funcionament de la màquina, on per a cada freqüència del ventilador d'impulsió,

es busca experimentalment la freqüència del ventilador del circuit d'aspiració com perquè les pantalles funcionin correctament, és a dir, sense que s'escapi aire de dintre de la pantalla cap a l'exterior d'aquesta a través de l'obturador longitudinal, és a dir, fins a obtenir un balanç de la pantalla correcte.

Circuit impulsíó:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Taula 8.1.: Mesures experimentals màquina “M3”, punts de funcionament del sistema d'assecatge del cos impressor (circuit impulsíó), amb pantalles tipus “M3”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

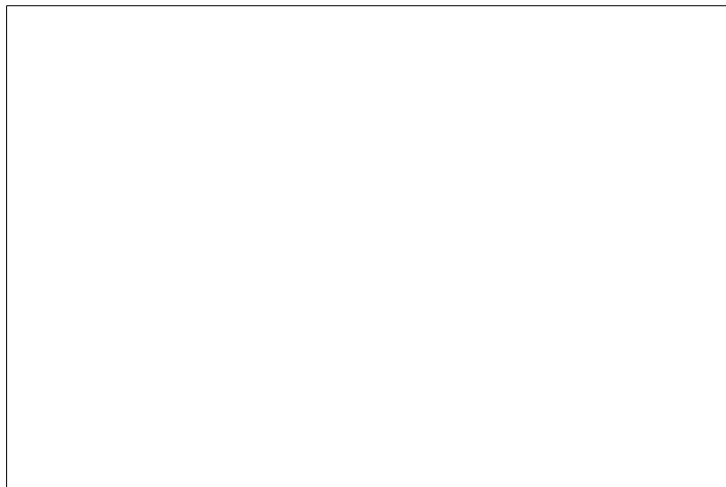


Figura 8.6.: Punt de funcionament assolit pel circuit d'impulsió tinters, amb les pantalles tipus “M3”, a una freqüència de 35Hz [66]

A partir de l'ajust que s'ha fet de la màquina, no era possible sobrepassar la freqüència d'impulsió per sobre del 70%, ja que sinó el ventilador d'aspiració era incapaç d'aspirar tot el cabal d'aire necessari com per evitar el rebuf de les pantalles. De la gràfica superior, s'aprecia com el fet de treballar com a màxim a aquesta freqüència implica que el ventilador d'impulsió està sobredimensionat ja que per assolir el màxim punt de treball actual el mateix ventilador però amb una potència d'accionament de 5,5kW seria suficient.

Com que els altres punts mesurats experimentalment no es poden situar a la gràfica que proporciona el fabricant a través del web, es decideix extreure les gràfiques del ventilador per els altres règims manualment, a través de les lleis de semblança dels ventiladors.

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0} \quad (8.3)$$

Q , i Q_0 , és el cabal que impulsa el ventilador

n , i n_0 , és el règim de gir del ventilador

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (8.4)$$

p , i p_0 , és la pressió que proporciona el ventilador

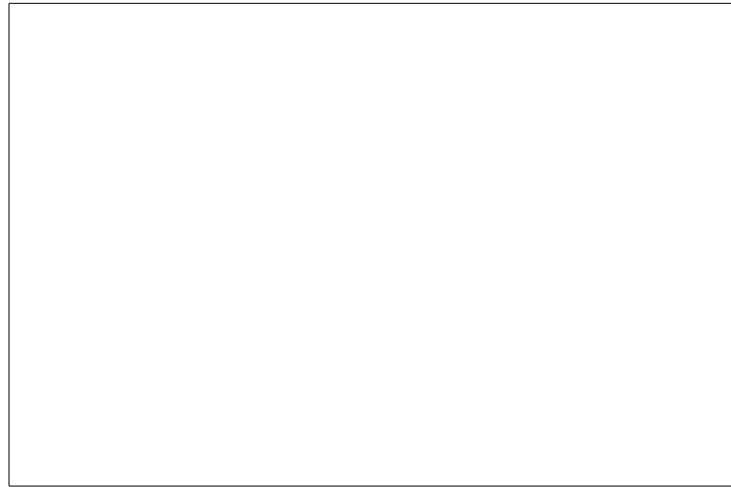
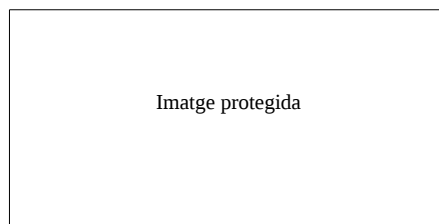


Figura 8.7.: Representació gràfica dels diversos punts de funcionament assajats al circuit d'impulsió de tinters, amb les pantalles tipus "M3"

A la fig. 8.7 s'han representat els punts de funcionament amb les pantalles actuals per a cadascun dels règims de gir que s'han assajat, i s'ha representat la corba característica de la instal·lació corresponent al circuit d'impulsió de tinters. Els valors numèrics de les dades obtingudes es resumeixen a la taula. 8.2:



Taula 8.2.: Resum de valors de cabal i pressió per als punts de funcionament assajats (impulsió tinters "M3")

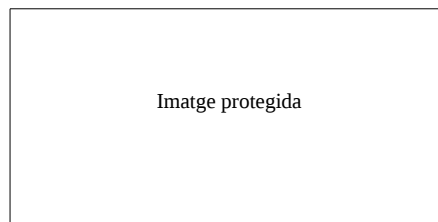
En aquest cas, les pressions mesurades en els punts disponibles a la instal·lació, han proporcionat valors molts propers als que s'obtenen a partir de la gràfica dels ventiladors proporcionada per el fabricant.

8.1 Determinació de la corba característica global del sistema d'assecatge entre tinters amb les pantalles actuals

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Circuit aspiració:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Taula 8.3.: Mesures experimentals màquina “M3”, punts de funcionament del sistema d'assecatge del cos impressor (circuit aspiració), amb pantalles tipus “M3”

De la mateixa manera que s'ha fet en l'apartat anterior, es representen els diversos punts a la gràfica del ventilador obtinguda a partir de la pàgina web del fabricant, per trobar l'equació de la corba característica de la instal·lació del circuit d'aspiració de la màquina.

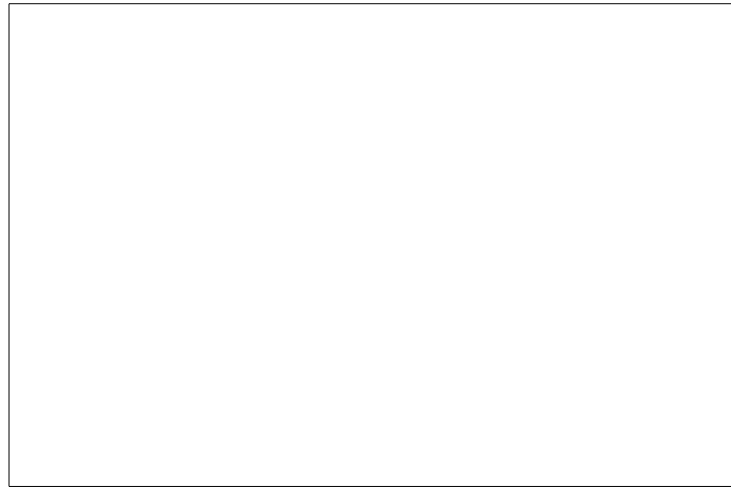


Figura 8.8.: Punt de funcionament assolit pel circuit d'aspiració tinters, amb les pantalles tipus "M3", a una freqüència de 50Hz [66]

Tot seguit es representen els tres punts de funcionament obtinguts, en una mateixa gràfica, tal i com s'ha fet en el cas anterior

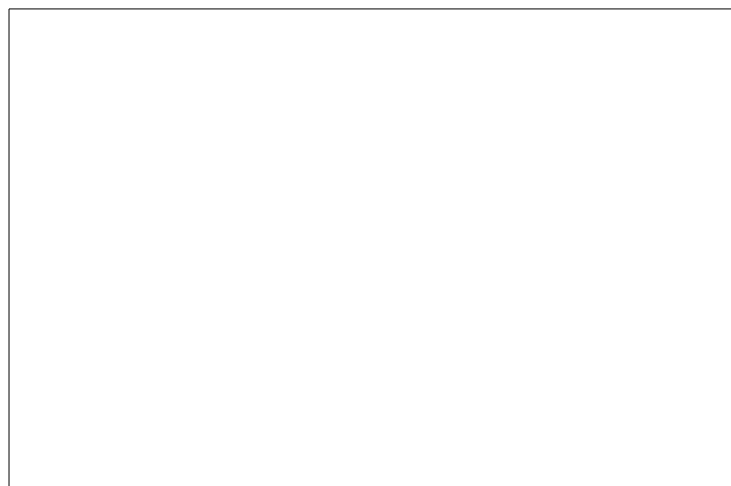
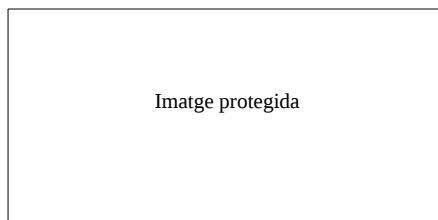


Figura 8.9.: Representació gràfica dels diversos punts de funcionament assajats al circuit d'aspiració tinters, amb les pantalles tipus "M3"



Taula 8.4.: Resum de valors de cabal i pressió per als punts de funcionament assajats (aspiració tinters “M3”)

A partir dels resultats obtinguts, s’aprecia que hi ha molta diferència entre els valors de pressió mesurats als punts de mesura disponibles a la instal·lació, respecte dels valors obtinguts a través de la gràfica del fabricant. Com ja s’ha dit abans, per obtenir punts de mesura de pressió estàtica fiables com per a poder determinar el punt de funcionament en la gràfica del ventilador a partir de la pressió estàtica i el règim de gir del ventilador, seria necessari fer modificacions als conductes de la instal·lació per disposar de trams sense obstacles, i sense canvis de direcció, cosa que és impossible per el propi disseny de la màquina. D’aquesta manera es consideren com a més fiables les mesures de cabals obtingudes a partir de la utilització del factor k , tal i com ha aconsellat el proveïdor de ventiladors S&P.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

8.2. Corba característica de les pantalles d'assecatge entre tinters

En aquest apartat s’avalua la corba característica d’una pantalla d’assecatge entre tinters de manera separada per a la impulsió així com per a l’aspiració, a partir d’assajos realitzats al banc de proves de què es disposa.

Una vegada es té disponible la corba característica de la part corresponent a la impulsió i a l’aspiració d’una sola pantalla per separat, es procedeix a muntar la corba característica equivalent del conjunt de pantalles de tota la màquina (en concret una màquina “M3” de deu colors incorpora nou pantalles d’assecatge en el cos impressor), que es pot aproximar a partir de la suma en paral·lel del comportament de nou pantalles.

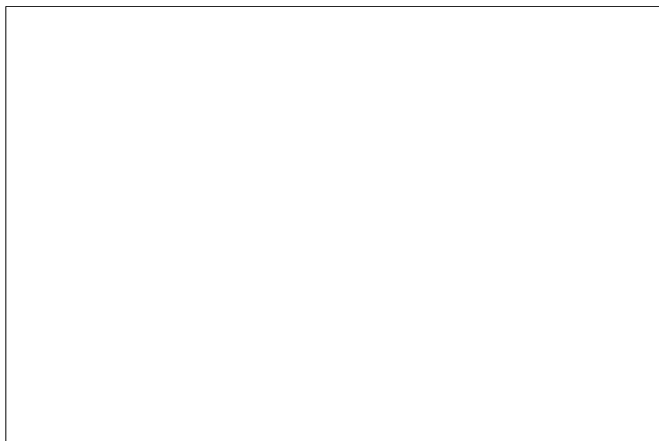
Més endavant es repeteix el mateix procés de caracterització de la corba característica de les pantalles per el nou model que s'ha dissenyat. Finalment, de la gràfica global corresponent al comportament del circuit d'impulsió o d'aspiració de la màquina, el que es fa es substituir la corba de les pantalles antigues per les pantalles noves per determinar el nou punt de funcionament.

L'objectiu d'aquest càlcul no és saber exactament el punt de funcionament de la màquina amb les noves pantalles, sinó que es desitja calcular de manera aproximada si els ventiladors actuals seran suficients per poder garantir una mateixa capacitat d'assecatge amb les pantalles noves (en definitiva, es busca saber si es podrà garantir que els ventiladors actuals amb les pantalles noves, impulsen el mateix cabal d'aire que amb les pantalles actuals). Per fer el càlcul es pren en compte la simplificació de considerar que les nou pantalles que munta la màquina són completament idèntiques entre elles, i que les lleugeres variacions en els diàmetres de les boques d'impulsió i d'aspiració de la pantalla no influiran en el resultat final.

8.2.1. Caracterització de la part corresponent a la impulsió

8.2.1.1. Pantalla tipus "M3"

Es planteja Bernoulli entre l'entrada i la sortida de la pantalla (es considera una pressió igual a l'atmosfèrica a la sortida del llavi; la diferència de cotes entre el punt 1 i el punt 2 es negligeix ja que hi ha molt poca diferència entre elles):



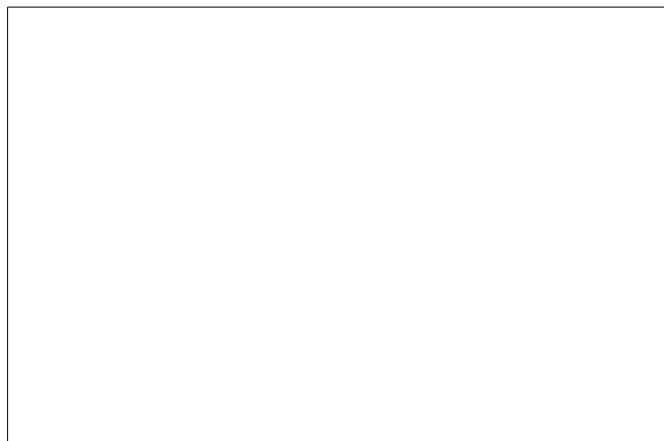
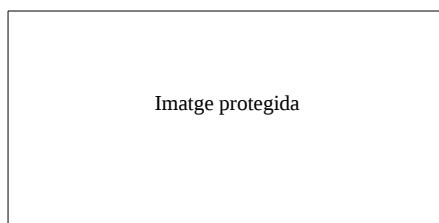


Figura 8.10.: Punts on s'aplica Bernoulli per al càlcul de la corba característica de la pantalla, per a la part corresponent a la impulsió

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 - H_{r_{1-2}} = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (8.5)$$

$$H_{r_{1-2}} = (P_1 - P_2) + \frac{1}{2}\rho (V_1^2 - V_2^2) = P_1 + \frac{1}{2}\rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (8.6)$$

Per al càlcul de la corba característica, i a la vista dels resultats que s'han mostrat en el capítol corresponent al disseny de les pantalles, la velocitat en el punt 2 corresponent a la sortida del llavi no es manté constant en tota l'amplada de la pantalla. Per als càlculs de la corba característica de la instal·lació s'ha pres el valor de V_2 com el valor de la velocitat a la sortida del llavi calculat a partir del cabal que entra a la pantalla, i de la secció de sortida del llavi.



Taula 8.5.: Dades experimentals per determinar la corba característica de la part corresponent a la impulsió d'una pantalla entre tinters tipus "M3"

Després d'ajustar la corba corresponent als punts experimentals anteriors, s'obté que la característica de pèrdues de càrrega d'una pantalla és:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

8.2.1.2. Pantalla prototip

La velocitat de sortida del llavi en aquest cas es mantenia constant al llarg de tota l'amplada de la pantalla, per tant V_2 es correspon amb la velocitat mesurada directament al llavi de la pantalla.



Taula 8.6.: Dades experimentals per determinar la corba característica de la part corresponent a la impulsió d'una pantalla entre tinters corresponent al nou prototip

Després d'ajustar la corba corresponent als punts experimentals anteriors, s'obté que la característica de pèrdues de càrrega d'una pantalla és:

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

8.2.1.3. Comparativa punt de funcionament “M3” - prototip

Una vegada determinada la corba característica del circuit d'impulsió del conjunt de la màquina, la corba de la instal·lació de nou pantalles tipus “M3” en paral·lel, i la corba de nou pantalles tipus prototip en paral·lel, es procedeix a muntar la gràfica equivalent del nou sistema, i buscar el punt de funcionament del ventilador amb les pantalles noves. Els resultats es mostren tot seguit:

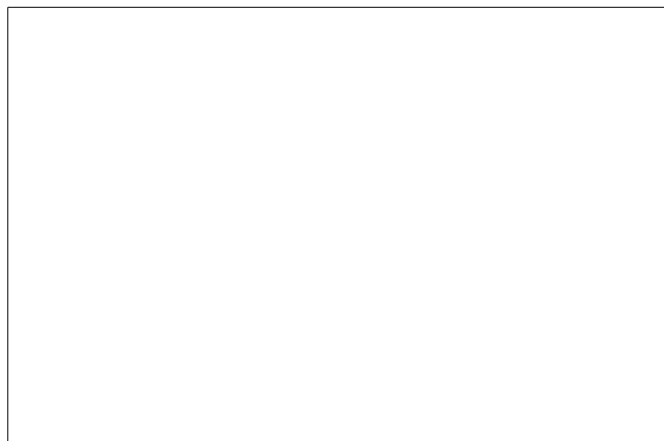


Figura 8.11.: Comparativa punt de funcionament ventilador impulsió, amb les pantalles actuals tipus “M3” i el nou model de pantalla proposat

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Taula 8.7.: Resum dels punts de funcionament, per el circuit d'assecatge d'impulsió entre tinters, per les pantalles tipus “M3”, i per la pantalla prototip

Amb la dificultat afegida del recorregut més complex de l'aire a través de la pantalla, la pèrdua de càrrega obtinguda amb la pantalla prototip és més elevada que la que s'obté amb les pantalles actuals, doncs el circuit que recorre el fluid dintre de la pantalla nova és molt més complex que no pas en el model actual. Tot seguit es busca a partir de la gràfica del fabricant, si el nou punt de funcionament cau dintre de la regió factible de treball del ventilador (tal i com s'ha calculat de manera teòrica a la fig. 8.11).

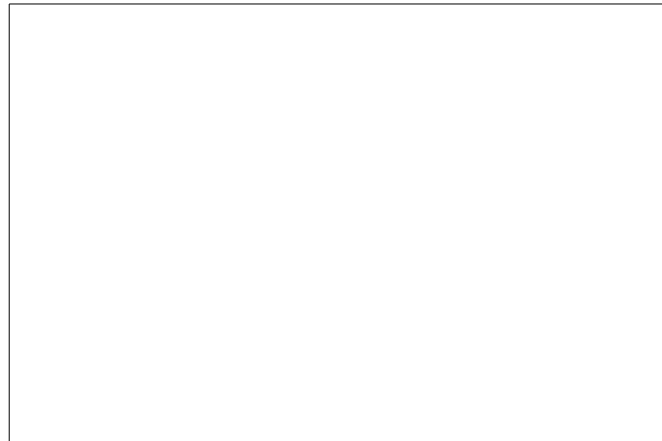


Figura 8.12.: Punt de funcionament assolit pel circuit d'impulsió tinters, amb les pantalles tipus prototip, a una freqüència de 37,5Hz [66]

El ventilador actual pot assolir sense cap problema el punt de funcionament requerit, ja que teòricament només cal apujar la freqüència del ventilador de 35Hz a 37,5Hz. En tots dos casos, una potència d'accionament de 5,5kW serà suficient.

8.2.2. Caracterització de la part corresponent a l'aspiració

Amb l'objectiu d'optimitzar el temps dedicat a la realització de mesures experimentals al banc de proves per tal de caracteritzar la pèrdua de càrrega del circuit d'aspiració de la pantalla actual i la pantalla prototip, es decideix realitzar una simplificació del procés que consisteix en mesurar per a diversos punts de funcionament dels dos models de pantalles la pressió estàtica a la boca d'aspiració de la pantalla, així com el cabal que s'impulsa i el cabal que s'aspira per a cadascun d'aquests punts de funcionament.

La diferència en la pressió estàtica a la boca d'aspiració obtinguda per un mateix cabal d'aspiració de la pantalla, s'atribueix al nou disseny de la pantalla, ja que el recorregut que ha de fer l'aire per el nou circuit d'aspiració és més complexe que no pas el circuit de la versió més antiga.

8.2.2.1. Mesures experimentals pantalla "M3" (aspiració)

A la taula. 8.8 es mostra el cabal d'impulsió mesurat en el conducte d'impulsió, el cabal d'aspiració mesurat en el conducte d'aspiració, i la pressió estàtica mesurada a la boca d'aspiració, per diversos punts de funcionament assajats al banc de proves, de la pantalla "M3".



Taula 8.8.: Mesures experimentals pantalla “M3”, aspiració, banc de proves

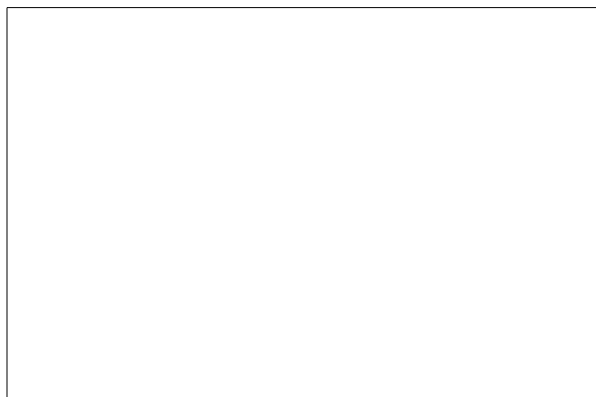


Figura 8.13.: Ajustament entre les dades experimentals i la corba ajustada, de la pressió estàtica a la boca d'aspiració d'una pantalla “M3”, per diversos cabals d'aspiració

8.2.2.2. Mesures experimentals pantalla prototip (aspiració)

A la taula. 8.9 es mostra el cabal d'impulsió mesurat en el conducte d'impulsió, el cabal d'aspiració mesurat en el conducte d'aspiració, i la pressió estàtica mesurada a la boca d'aspiració, per diversos punts de funcionament assajats al banc de proves, de la pantalla prototip.



Taula 8.9.: Mesures experimentals pantalla prototip, aspiració, banc de proves

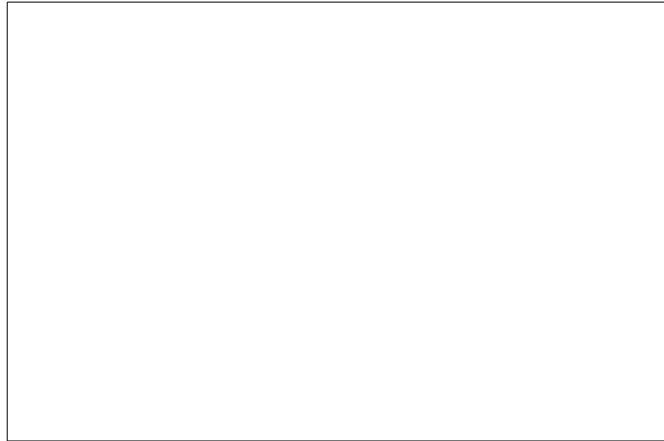


Figura 8.14.: Ajustament entre les dades experimentals i la corba ajustada, de la pressió estàtica a la boca d'aspiració de la pantalla prototip, per diversos cabals d'aspiració

8.2.2.3. Diferències en el comportament de l'aspiració entre les dues pantalles

Si es revisa el cap. 5 on s'analitza el redisseny de les pantalles, i en concret es centra l'atenció en les diferències conceptuals o geomètriques que s'aprecien a simple vista entre el disseny de l'aspiració de la pantalla actual i el de la pantalla prototip, és lògic pensar que el causant de que les pèrdues de càrrega de la part corresponent a l'aspiració del nou disseny siguin majors que les de la pantalla "M3", vénen provocades per la cambra que té tot aquell conjunt d'orificis que permeten uniformitzar l'aspiració al llarg de tota la pantalla.

En aquest apartat es caracteritza la pèrdua de càrrega addicional que provoca aquesta cambra intermèdia que s'ha col·locat a l'aspiració de la pantalla, per comprovar que el valor d'aquesta pèrdua de càrrega addicional sigui molt similar a la variació de pressió estàtica que s'ha originat a la boca d'aspiració de la pantalla (diferència entre els valors de pressió estàtica a la boca d'aspiració de la pantalla, obtinguts a la fig. 8.13 i fig. 8.14).

La pèrdua de càrrega addicional que comporta aquesta xapa perforada al circuit d'aspiració de la pantalla, es pot sumar la corba característica del sistema d'aspiració de la màquina.



Figura 8.15.: Punts on s'aplica Bernoulli per al càlcul de la corba característica de la pantalla, només per la cambra addicional que s'ha col·locat a l'aspiració (recorregut de l'aire des del punt 1 al punt 2)

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 - H_{r_{1-2}} = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (8.7)$$

$$H_{r_{1-2}} = (P_1 - P_2) + \frac{1}{2}\rho (V_1^2 - V_2^2) = -P_2 + \frac{1}{2}\rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (8.8)$$

D'aplicar les equacions amb els diversos punts mesurats experimentalment, en resulta la gràfica que es mostra a continuació

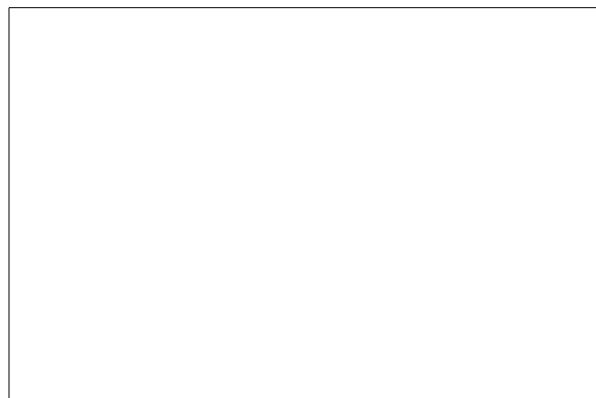


Figura 8.16.: Ajustament entre les dades experimentals i la corba ajustada, de la pèrdua de càrrega provocada per la cambra addicional amb orificis que s'ha col·locat a l'aspiració de la pantalla

Si es compara els resultats de l'ajust de les diverses gràfiques, segons la fig. 8.13, fig. 8.14 i fig. 8.16 es pot comprovar com ambdós valors són molt semblants. Així doncs, queda justificat emprar la diferència de pressió estàtica al conducte d'aspiració de la pantalla, com a pèrdua de càrrega addicional al sistema, equivalent a la pèrdua de càrrega que origina la cambra amb els orificis.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

8.2.2.4. Comparativa punt de funcionament “M3” - prototip

El fet d'instal·lar les noves pantalles a la màquina, i tenint en compte les simplificacions que s'han plantejat a la part inicial d'aquest capítol, comporta una major pèrdua de càrrega de la instal·lació. En aquest punt es compara el cabal màxim possible que podria extreure la màquina instal·lant les pantalles prototip enlloc de les pantalles actuals “M3”, tenint en compte la diferència associada entre elles que s'ha calculat.

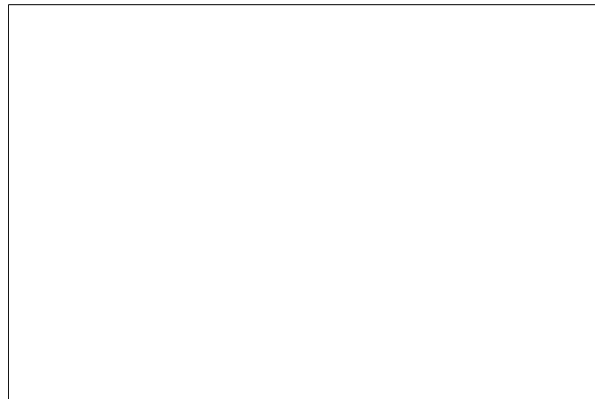


Figura 8.17.: Comparativa punt de funcionament ventilador aspiració, amb les pantalles actuals tipus “M3” i el nou model de pantalla proposat

De la gràfica es desprèn que les pantalles noves al tenir una pèrdua de càrrega associada més gran, no permeten assolir el mateix cabal d'extracció que es tenia amb les pantalles tipus “M3”.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Tot i que el nou cabal que es pot extreure amb el ventilador d'aspiració amb les pantalles noves és inferior a l'actual, el fet de tenir un balanç millor que l'obtingut amb les pantalles "M3" implica que seria possible assolir un cabal d'impulsió tinters encara més gran que l'actual. De fet, si s'aplica la proporció d'un balanç equivalent al de les pantalles noves al cabal d'impulsió, s'obté que el cabal d'extracció necessari li correspondria el punt de funcionament que es mostra a la fig. 8.18, on es comprova que no seria necessari arribar a les $3.000rpm$ necessàries per el funcionament de les pantalles tipus "M3", ja que amb les noves pantalles a un règim de $2.330rpm$ seria suficient.

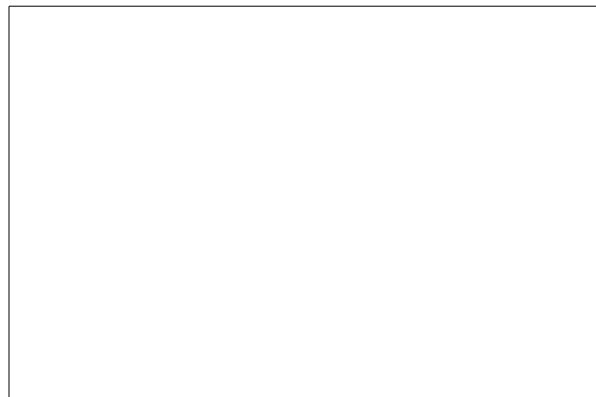


Figura 8.18.: Punt de funcionament assolit pel circuit d'aspiració tinters, amb les pantalles tipus prototip, a una freqüència de 39Hz [66]

8.3. Conclusions

En aquest capítol s'ha estudiat si el nou concepte de pantalla d'assecatge podria ésser implementat a una màquina tipus "M3", sense necessitat d'haver de substituir els ventiladors actuals per uns que tinguin més potència.

Si bé el ventilador d'impulsió cal que augmenti el seu règim de gir per tal d'assolir el punt de funcionament que s'obté amb la pantalla actual, l'accionament actual pot assolir sense problemes el nou punt de treball ja que actualment aquest està sobredimensionat. Pel que fa al ventilador d'aspiració, tot i que la nova pantalla tingui una pèrdua de càrrega més gran que la pantalla actual, aquest augment de pressió queda compensat per la reducció de cabal derivat de la optimització del balanç de la pantalla; de fet, és possible disminuir el règim de gir del ventilador d'aspiració per el mateix cabal d'impulsió que s'està vehiculant actualment.

9. Càlcul de la capacitat d'evaporació d'un jet d'aire

Estudis previs recollits a la bibliografia

Avci, Can i Etemoğlu [2] aporten una base teòrica per al càlcul de l'assecatge de capes molt primes de dissolvents continguts en tintes i recobriments aplicats sobre una placa plana de material que es troba en moviment continu, sota els efectes de la transferència de calor per convecció forçada provocada per un bufador d'aire. Els càlculs depenen de les condicions l'aire utilitzat per a l'assecatge, així com de les propietats del solvent contingut en la tinta, i permeten calcular l'evolució de la temperatura del solvent així com la taxa d'evaporació al llarg del temps. Comparen els resultats experimentals amb els valors teòrics i obtenen un bon ajust de resultats.

Avci i Can [1] analitzen el procés d'assecatge per convecció forçada no només des d'un punt de vista d'assoliment del màxim valor del coeficient de transferència de calor per convecció, sinó que a més a més analitzen el cost energètic que suposa el fet de que la instal·lació pugui operar sota diferents punts de treball (velocitat de l'aire, temperatura d'assecatge, pèrdues de càrrega de la instal·lació), i fan èmfasi en la importància de mirar el procés d'assecatge des d'un punt de vista global tenint en compte tota la instal·lació.

Braud, Moreira i Castell-perez [57] realitzen un estudi per modelar matemàticament la transferència de calor així com la transferència de massa durant l'assecatge de truites de blat de moro sota els efectes de la convecció forçada a través d'un bufador. Els fluid utilitzats per el seu estudi són aire sec, així com vapor sobreescalfat. El seu model representa correctament la tendència de la distribució de temperatura per a les diverses situacions analitzades cosa que aporta validesa al modelat de transferència d'energia en el producte estudiat, però la concentració d'humitat experimental respecte de la predita per el model presenta divergències ja que no s'ha tingut en compte la condensació que es podria donar en el producte del vapor utilitzat per a l'assecat.

9.1. Introducció

Tal i com s'ha comentat en capítols anteriors, el producte final que s'obté amb les màquines que comercialitza Comexi és un material/substrat, que en la majoria dels casos es tracta de materials de tipus plàstic, que posteriorment és utilitzat com a envàs flexible per protegir el producte final que es desitja comercialitzar.

L'envàs flexible ha d'aportar aquestes qualitats:

- Ha d'afavorir que el producte final sigui atractiu als possibles compradors, i destacar-lo respecte de la competència
- Ha d'actuar com a barrera amb el medi extern, tot protegint-lo de les agressions del medi ambient que l'envolta (com per exemple les olors, la humitat)
- Ha de ser compatible amb el propi producte que es vol protegir
- Ha de tenir certes propietats mecàniques amb l'objectiu de que el propi envàs no es pugui trencar i comprometre la conservació del producte que s'envasa

En el cas que l'article final vagi dirigit al sector alimentari, es fa necessari assegurar que el contingut de solvent romanent en l'embalatge flexible després del procés d'impressió i/o laminació estigui per sota de certs límits imposats per normativa tot garantint que aquests aliments siguin aptes per al consum i no quedin contaminats per el solvent residual contingut en l'envasat del propi producte.

L'objectiu d'aquest capítol és el de proporcionar una eina que permeti fer una predicció teòrica de quina serà la quantitat de solvent que quedarà retingut en un substrat de tipus plàstic sota unes determinades condicions de treball (material del substrat, gruix del substrat, temperatura d'assecatge, velocitat del procés d'impressió, quantitat de tinta aplicada, velocitat de l'aire utilitzat en l'assecatge, tipus de bufador). Amb aquest útil es podrà predir si una determinada màquina, sota unes condicions de treball definides, és capaç d'assecar un cert treball d'impressió o laminació, o bé si cal redefinir alguns dels paràmetres de la màquina com per exemple la temperatura d'assecatge, velocitat d'impressió, longitud del túnel, o cabal d'aire impulsat.

Procediment

Consideracions prèvies:

-El material que es simularà serà de tipus plàstic i no porós.

-Amb l'objectiu de simplificar al màxim la resolució del problema es decideix crear un model matemàtic on es considera que la transferència de calor té lloc en una sola dimensió (direcció que serà perpendicular a la direcció d'avanç del substrat del material).

-El resultat final és el de quantificar el percentatge de solvent que s'ha evaporat, respecte del que s'ha aplicat, després de sotmetre el material imprès sota un procés d'assecat.

-Tot i que com s'ha comentat en el cap. 2 una tinta o adhesiu està format per solvents, pigments, resines i additius es simplifica el problema tenint en compte que la capa de líquid que cal assecat està formada per un únic solvent (per exemple Etanol o Acetat d'Etil).

En el cas que es desitgi estudiar la capacitat d'assecatge de la màquina per una barreja formada per diversos dissolvents, s'aconsella simplificar el model i fer el càlcul per el solvent predominant a la mescla en percentatge respecte del total aplicat.

-Tot i que la capa líquida que cal assecat està formada per un determinat percentatge de sòlids (pigments i resines), en el càlcul no es té en compte les propietats tèrmiques d'aquests elements i únicament es té en compte les propietats del solvent pur que cal evaporar (si bé sí que es té en compte quina proporció de sòlids hi ha respecte del total que s'ha aplicat).

Les etapes que es porten a terme per al càlcul de la capacitat d'evaporació de la màquina es poden enumerar tal i com segueix:

1. Descriure la tipologia de nodes que defineixen el model
2. Establir quines són les condicions de contorn que cal tenir en compte
3. Fer el balanç energètic per a cada tipologia de node [65]
4. Plantejar de forma matricial el sistema d'equacions
5. Resoldre el sistema d'equacions i representar els resultats

9.2. Tipologia de nodes

9.2.1. Node situat a la cara inferior del substrat

9.2.1.1. Node sota els efectes de convecció i conducció de calor

El node n situat a la base del substrat està sotmès a transferència de calor per convecció provinent de la part de sota del material, a més a més de la calor que li arriba per conducció, des del seu node veí situat sobre seu, $n+1$.

Esquema

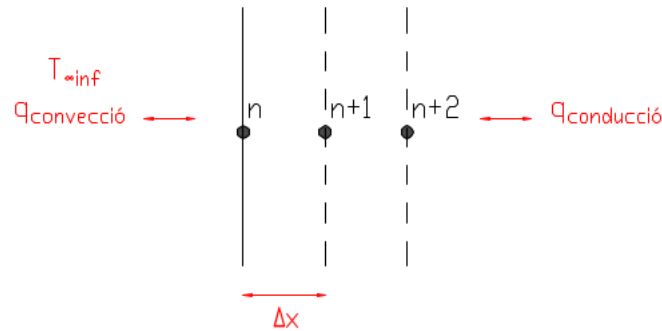


Figura 9.1.: Balanç d'energia per al node situat a la base del substrat

Balanç d'energia en el node n

$$h_{inf}A(T_{\infty inf} - T_n^{t+\Delta t}) + \frac{kA(T_{n+1}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t})}{\Delta x} = \rho \frac{\Delta x}{2} c \frac{(T_n^{t+\Delta t} - T_n^t)}{\Delta t} A$$

$$\frac{h_{inf}A(T_{\infty inf} - T_n^{t+\Delta t})\Delta x + kA(T_{n+1}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t})}{\Delta x} = \frac{\rho\Delta x c (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t)}{2\Delta t} A$$

$$2h_{inf}A(T_{\infty inf} - T_n^{t+\Delta t})\Delta x\Delta t + 2kA(T_{n+1}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t})\Delta t = \rho\Delta x^2 c (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t) A$$

$$\frac{2h_{inf}A(T_{\infty inf} - T_n^{t+\Delta t})\Delta x\Delta t}{k} + 2A(T_{n+1}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t})\Delta t = \frac{\rho\Delta x^2 c (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t) A}{k}$$

substituint els termes

$$B_{inf} = \frac{h_{inf}\Delta x}{k} \quad F_o = \frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c}$$

$$2B_{inf}A(T_{\infty inf} - T_n^{t+\Delta t})\Delta t + 2A\Delta t (T_{n+1}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t}) = \frac{\Delta x^2}{\alpha} (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t) A$$

$$2B_{i_{inf}}A(T_{\infty_{inf}} - T_n^{t+\Delta t})\Delta t + 2A\Delta t (T_{n+1}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t}) = \frac{\Delta t}{F_o} (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t) A$$

$$2B_{i_{inf}}(T_{\infty_{inf}} - T_n^{t+\Delta t}) + 2(T_{n+1}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t}) = \frac{1}{F_o} (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t)$$

$$2F_oB_{i_{inf}}(T_{\infty_{inf}} - T_n^{t+\Delta t}) + 2F_o(T_{n+1}^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t}) = T_n^{t+\Delta t} - T_n^t$$

$$2F_oB_{i_{inf}}T_{\infty_{inf}} - 2F_oB_{i_{inf}}T_n^{t+\Delta t} + 2F_oT_{n+1}^{t+\Delta t} - 2F_oT_n^{t+\Delta t} = T_n^{t+\Delta t} - T_n^t$$

$$T_{\infty_{inf}}(2F_oB_{i_{inf}}) - 2F_oB_{i_{inf}}T_n^{t+\Delta t} - 2F_oT_n^{t+\Delta t} - T_n^{t+\Delta t} + 2F_oT_{n+1}^{t+\Delta t} + T_n^t = 0$$

$$T_{\infty_{inf}}(2F_oB_{i_{inf}}) - T_n^{t+\Delta t}(2F_oB_{i_{inf}} + 2F_o + 1) + T_{n+1}^{t+\Delta t}(2F_o) + T_n^t = 0$$

$$T_{\infty_{inf}}(2F_oB_{i_{inf}}) - T_n^{t+\Delta t}(1 + 2F_o(1 + B_{i_{inf}})) + T_{n+1}^{t+\Delta t}(2F_o) + T_n^t = 0$$

$$T_n^{t+\Delta t}(1 + 2F_o(1 + B_{i_{inf}})) - T_{n+1}^{t+\Delta t}(2F_o) = T_n^t + T_{\infty_{inf}}(2F_oB_{i_{inf}}) \quad (9.1)$$

9.2.1.2. Node sotmès a temperatura ctt.

El node n situat a la base del substrat està sotmès a una temperatura constant.

Esquema

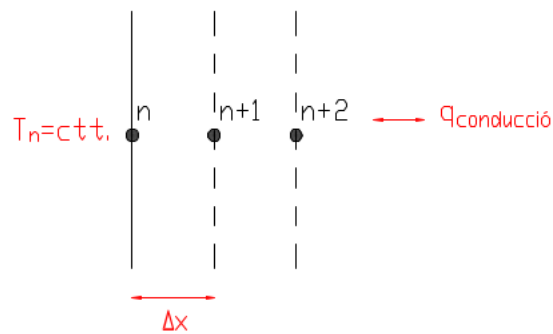


Figura 9.2.: Balanç d'energia per al node situat a la base del substrat (node a temperatura constant)

Balanç d'energia en el node n

Per imposar que la temperatura sigui constant al llarg del temps en aquest node, es pot fer a través de l'equació que segueix

$$T_n^{t+\Delta t} = T_n^t \quad (9.2)$$

9.2.2. Node intermedi

9.2.2.1. Node sotmès a conducció de calor (mateix material i mateix Δx)

El node m és un node que té un node a cada costat. Ambdós nodes veïns estan separats a una mateixa distància Δx respecte del node m , i intercanvia calor per conducció amb aquests nodes $m-1$ i $m+1$.

Esquema

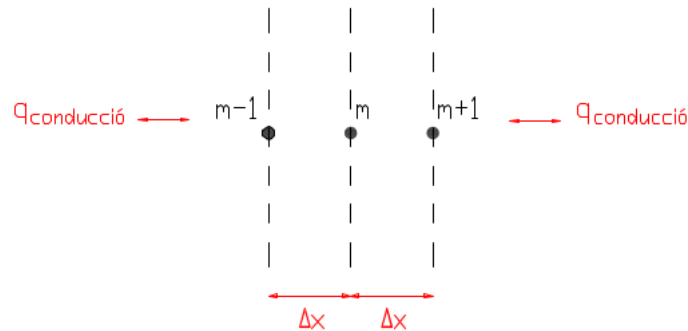


Figura 9.3.: Balanç d'energia per a un node intermedi (un sol material)

Balanç d'energia en el node m

$$kA \frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{\Delta x} + kA \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{\Delta x} = \rho A \Delta x c \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\Delta t}$$

$$kA \Delta t (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) + kA \Delta t (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) = \rho A \Delta x^2 c (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)$$

$$k \Delta t (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) + k \Delta t (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) = \rho \Delta x^2 c (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)$$

$$k (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) + k (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) = \frac{\rho \Delta x^2 c}{\Delta t} (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)$$

$$T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t} + T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t} = \frac{\rho \Delta x^2 c}{k \Delta t} (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)$$

$$T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t} + T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t} = \frac{\Delta x^2}{\alpha \Delta t} (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)$$

$$T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t} + T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t} = \frac{1}{F_o} (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)$$

$$T_{m-1}^{t+\Delta t} - 2T_m^{t+\Delta t} + T_{m+1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{F_o} (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)$$

$$F_o T_{m-1}^{t+\Delta t} - 2F_o T_m^{t+\Delta t} + F_o T_{m+1}^{t+\Delta t} = T_m^{t+\Delta t} - T_m^t$$

$$F_o T_{m-1}^{t+\Delta t} - 2F_o T_m^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t} + F_o T_{m+1}^{t+\Delta t} = -T_m^t$$

$$-F_o T_{m-1}^{t+\Delta t} + 2F_o T_m^{t+\Delta t} + T_m^{t+\Delta t} - F_o T_{m+1}^{t+\Delta t} = T_m^t$$

$$T_{m-1}^{t+\Delta t} (-F_o) + T_m^{t+\Delta t} (1 + 2F_o) - T_{m+1}^{t+\Delta t} (F_o) = T_m^t \quad (9.3)$$

9.2.2.2. Node sotmès a conducció de calor (diferents materials, i mateix Δx)

El node m és un node que té un node a cada costat. Ambdós nodes veïns estan separats a una mateixa distància Δx respecte del node m , i intercanvia calor per conducció amb aquests nodes $m-1$ i $m+1$. El node $m+1$ té les propietats del material 2 i el node $m-1$ té les propietats del material 1.

Esquema

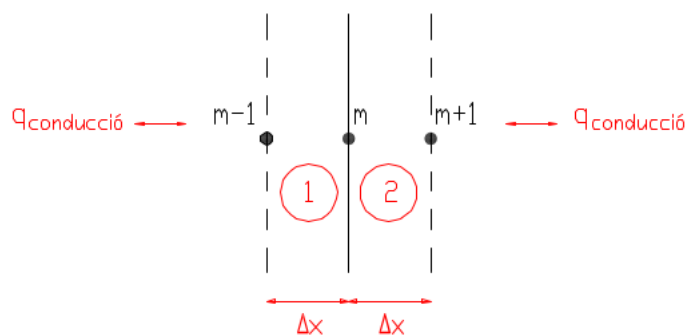


Figura 9.4.: Balanç d'energia per a un node intermedi entre dos materials (dos materials amb el mateix Δx a cada material)

Balanç d'energia en el node m

$$k_1 A \frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{\Delta x} + k_2 A \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{\Delta x} = \rho_1 A \frac{\Delta x}{2} c_1 \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\Delta t} + \rho_2 A \frac{\Delta x}{2} c_2 \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\Delta t}$$

$$k_1 A 2 \Delta t (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) + k_2 A 2 \Delta t (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) = \rho_1 A \Delta x^2 c_1 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) + \rho_2 A \Delta x^2 c_2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)$$

$$\frac{k_1 2 \Delta t (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_1 k_2} + \frac{k_2 2 \Delta t (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_1 k_2} = \frac{\rho_1 \Delta x^2 c_1 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{k_1 k_2} + \frac{\rho_2 \Delta x^2 c_2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{k_1 k_2}$$

$$\frac{2 \Delta t (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_2} + \frac{2 \Delta t (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_1} = \frac{\Delta x^2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\alpha_1 k_2} + \frac{\Delta x^2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\alpha_2 k_1}$$

$$\Delta t \left[\frac{2 (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_2} + \frac{2 (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_1} \right] = \frac{\Delta x^2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\alpha_1 k_2} + \frac{\Delta x^2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\alpha_2 k_1}$$

$$\frac{2 (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_2} + \frac{2 (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_1} = \frac{\Delta x^2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\alpha_1 k_2 \Delta t} + \frac{\Delta x^2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\alpha_2 k_1 \Delta t}$$

$$F_{o_1} = \frac{\alpha_1 \Delta t}{\Delta x^2} \quad \alpha_1 = \frac{k_1}{\rho_1 c_1}$$

$$F_{o_2} = \frac{\alpha_2 \Delta t}{\Delta x^2} \quad \alpha_2 = \frac{k_2}{\rho_2 c_2}$$

$$\frac{2(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_2} + \frac{2(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{k_1} = \frac{1}{F_{o_1}} \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{k_2} + \frac{1}{F_{o_2}} \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{k_1}$$

$$\frac{2}{k_2} T_{m-1}^{t+\Delta t} - \frac{2}{k_2} T_m^{t+\Delta t} + \frac{2}{k_1} T_{m+1}^{t+\Delta t} - \frac{2}{k_1} T_m^{t+\Delta t} = \frac{1}{F_{o_1} k_2} T_m^{t+\Delta t} - \frac{1}{F_{o_1} k_2} T_m^t + \frac{1}{F_{o_2} k_1} T_m^{t+\Delta t} - \frac{1}{F_{o_2} k_1} T_m^t$$

$$T_{m-1}^{t+\Delta t} \left[\frac{2}{k_2} \right] + T_m^{t+\Delta t} \left[-\frac{2}{k_2} - \frac{2}{k_1} - \frac{1}{F_{o_1} k_2} - \frac{1}{F_{o_2} k_1} \right] + T_{m+1}^{t+\Delta t} \left[\frac{2}{k_1} \right] = T_m^t \left[-\frac{1}{F_{o_1} k_2} - \frac{1}{F_{o_2} k_1} \right]$$

$$T_{m-1}^{t+\Delta t} \left[\frac{2}{k_2} \right] + T_m^{t+\Delta t} \left[-\frac{2F_{o_1}}{F_{o_1} k_2} - \frac{2F_{o_2}}{F_{o_2} k_1} - \frac{1}{F_{o_1} k_2} - \frac{1}{F_{o_2} k_1} \right] + T_{m+1}^{t+\Delta t} \left[\frac{2}{k_1} \right] = T_m^t \left[-\frac{1}{F_{o_1} k_2} - \frac{1}{F_{o_2} k_1} \right]$$

$$T_{m-1}^{t+\Delta t} \left[\frac{2}{k_2} \right] + T_m^{t+\Delta t} \left[\frac{-2F_{o_1} - 1}{F_{o_1} k_2} + \frac{-2F_{o_2} - 1}{F_{o_2} k_1} \right] + T_{m+1}^{t+\Delta t} \left[\frac{2}{k_1} \right] = T_m^t \left[\frac{-1}{F_{o_1} k_2} + \frac{-1}{F_{o_2} k_1} \right] \quad (9.4)$$

9.2.2.3. Node sotmès a conducció de calor (diferents materials, i diferents Δx (Δx_1 i Δx_2))

El node m és un node que té un node a cada costat. Ambdós nodes veïns estan separats a una distància diferent Δx_1 i Δx_2 respecte del node m , i intercanvia calor per conducció amb aquests nodes $m-1$ i $m+1$. El node $m+1$ té les propietats del material 2 i el node $m-1$ té les propietats del material 1.

Esquema

Balanç d'energia en el node m

$$k_1 A \frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{\Delta x_1} + k_2 A \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t})}{\Delta x_2} = \rho_1 A \frac{\Delta x_1}{2} c_1 \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\Delta t} + \rho_2 A \frac{\Delta x_2}{2} c_2 \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\Delta t}$$

$$k_1 A \frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2}{\Delta x_1 \Delta x_2} + k_2 A \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1}{\Delta x_2 \Delta x_1} = \rho_1 A \frac{\Delta x_1}{2} c_1 \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\Delta t} + \rho_2 A \frac{\Delta x_2}{2} c_2 \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t)}{\Delta t}$$

$$k_1 A \frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2 2 \Delta t}{\Delta x_1 \Delta x_2 2 \Delta t} + k_2 A \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1 2 \Delta t}{\Delta x_2 \Delta x_1 2 \Delta t} = \rho_1 A \frac{\Delta x_1}{2} c_1 \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1}{\Delta t \Delta x_2 \Delta x_1} + \rho_2 A \frac{\Delta x_2}{2} c_2 \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1}{\Delta t \Delta x_2 \Delta x_1}$$

$$k_1 A (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2 2 \Delta t + k_2 A (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1 2 \Delta t = \rho_1 A \Delta x_1 c_1 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1 + \rho_2 A \Delta x_2 c_2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1$$

$$\frac{k_1 A (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2 2 \Delta t}{k_1 k_2} + \frac{k_2 A (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1 2 \Delta t}{k_1 k_2} = \frac{\rho_1 A c_1 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1^2}{k_1 k_2} + \frac{\rho_2 A c_2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2^2 \Delta x_1}{k_1 k_2}$$

$$\frac{k_1 (T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2 2 \Delta t}{k_1 k_2} + \frac{k_2 (T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1 2 \Delta t}{k_1 k_2} = \frac{\rho_1 c_1 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1^2}{k_1 k_2} + \frac{\rho_2 c_2 (T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2^2 \Delta x_1}{k_1 k_2}$$

$$\frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2 2 \Delta t}{k_2} + \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1 2 \Delta t}{k_1} = \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1^2}{\alpha_1 k_2} + \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2^2 \Delta x_1}{k_1 \alpha_2}$$

$$\Delta t \left[\frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2}{k_2} + \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1}{k_1} \right] = \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1^2}{\alpha_1 k_2} + \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2^2 \Delta x_1}{k_1 \alpha_2}$$

$$\frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2}{k_2} + \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1}{k_1} = \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2 \Delta x_1^2}{\alpha_1 k_2 \Delta t} + \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2^2 \Delta x_1}{k_1 \alpha_2 \Delta t}$$

$$F_{o_1} = \frac{\alpha_1 \Delta t}{\Delta x_1^2} \quad \alpha_1 = \frac{k_1}{\rho_1 c_1}$$

$$F_{o_2} = \frac{\alpha_2 \Delta t}{\Delta x_2^2} \quad \alpha_2 = \frac{k_2}{\rho_2 c_2}$$

$$\frac{(T_{m-1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_2}{k_2} + \frac{(T_{m+1}^{t+\Delta t} - T_m^{t+\Delta t}) \Delta x_1}{k_1} = \frac{1}{F_{o_1}} \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_2}{k_2} + \frac{1}{F_{o_2}} \frac{(T_m^{t+\Delta t} - T_m^t) \Delta x_1}{k_1}$$

$$\frac{2}{k_2} \Delta x_2 T_{m-1}^{t+\Delta t} - \frac{2}{k_2} \Delta x_2 T_m^{t+\Delta t} + \frac{2}{k_1} \Delta x_1 T_{m+1}^{t+\Delta t} - \frac{2}{k_1} \Delta x_1 T_m^{t+\Delta t} = \frac{1}{F_{o_1} k_2} \Delta x_2 T_m^{t+\Delta t} - \frac{1}{F_{o_1} k_2} \Delta x_2 T_m^t + \frac{1}{F_{o_2} k_1} \Delta x_1 T_m^{t+\Delta t} - \frac{1}{F_{o_2} k_1} \Delta x_1 T_m^t$$

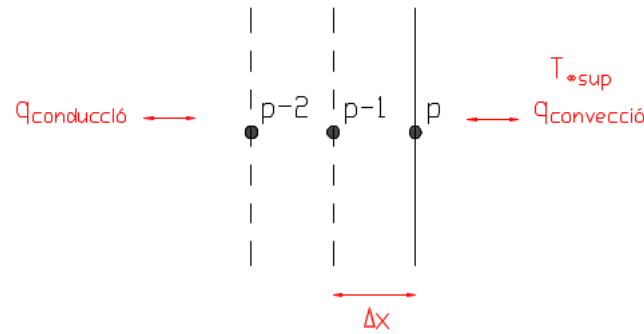
$$T_{m-1}^{t+\Delta t} \left[\frac{2}{k_2} \Delta x_2 \right] + T_m^{t+\Delta t} \left[-\frac{2}{k_2} \Delta x_2 - \frac{2}{k_1} \Delta x_1 - \frac{1}{F_{o_1} k_2} \Delta x_2 - \frac{1}{F_{o_2} k_1} \Delta x_1 \right] + T_{m+1}^{t+\Delta t} \left[\frac{2}{k_1} \Delta x_1 \right] =$$

$$T_m^t \left[-\frac{1}{F_{o_1} k_2} \Delta x_2 - \frac{1}{F_{o_2} k_1} \Delta x_1 \right] \quad (9.5)$$

9.2.3. Node superior

9.2.3.1. Node sota els efectes de convecció i conducció de calor

El node p situat a la part superior del substrat està sotmès a transferència de calor per convecció provinent de la part de sobre del material, a més a més de la calor que li arriba per conducció, des del seu node veí situat sota seu, $p-1$.

Esquema

Figura 9.5.: Balanç d'energia per al node situat a la part superior del material

Balanç d'energia en el node p

$$h_{sup}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t}) + \frac{kA(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t})}{\Delta x} = \rho \frac{\Delta x}{2} c \frac{(T_p^{t+\Delta t} - T_p^t)}{\Delta t} A$$

$$\frac{h_{sup}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t})\Delta x + kA(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t})}{\Delta x} = \frac{\rho \Delta x c (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t)}{2\Delta t} A$$

$$2h_{sup}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t})\Delta x \Delta t + 2kA(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) \Delta t = \rho \Delta x^2 c (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) A$$

$$\frac{2h_{sup}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t})\Delta x \Delta t}{k} + 2A(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) \Delta t = \frac{\rho \Delta x^2 c (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) A}{k}$$

substituint els termes

$$B_{i_{sup}} = \frac{h_{sup}\Delta x}{k} \quad F_o = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c}$$

$$2B_{i_{sup}}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t})\Delta t + 2A\Delta t (T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) = \frac{\Delta x^2}{\alpha} (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) A$$

$$2B_{i_{sup}}A(T_{\infty_{sup}} - T_p^{t+\Delta t})\Delta t + 2A\Delta t (T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) = \frac{\Delta t}{F_o} (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) A$$

$$2B_{i_{sup}}(T_{\infty_{sup}} - T_p^{t+\Delta t}) + 2(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) = \frac{1}{F_o} (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t)$$

$$2F_oB_{i_{sup}}(T_{\infty_{sup}} - T_p^{t+\Delta t}) + 2F_o(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) = T_p^{t+\Delta t} - T_p^t$$

$$2F_oB_{i_{sup}}T_{\infty_{sup}} - 2F_oB_{i_{sup}}T_p^{t+\Delta t} + 2F_oT_{p-1}^{t+\Delta t} - 2F_oT_p^{t+\Delta t} = T_p^{t+\Delta t} - T_p^t$$

$$T_{\infty_{sup}}(2F_oB_{i_{sup}}) - 2F_oB_{i_{sup}}T_p^{t+\Delta t} - 2F_oT_p^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t} + 2F_oT_{p-1}^{t+\Delta t} + T_p^t = 0$$

$$T_{\infty_{sup}}(2F_oB_{i_{sup}}) - T_p^{t+\Delta t}(2F_oB_{i_{sup}} + 2F_o + 1) + T_{p-1}^{t+\Delta t}(2F_o) + T_p^t = 0$$

$$T_{\infty_{sup}}(2F_oB_{i_{sup}}) - T_p^{t+\Delta t}(1 + 2F_o(1 + B_{i_{sup}})) + T_{p-1}^{t+\Delta t}(2F_o) + T_p^t = 0$$

$$T_p^{t+\Delta t}(1 + 2F_o(1 + B_{i_{sup}})) - T_{p-1}^{t+\Delta t}(2F_o) = T_p^t + T_{\infty_{sup}}(2F_oB_{i_{sup}}) \quad (9.6)$$

9.3. Plantejament matricial del sistema d'equacions

9.3.1. Un sol material

9.3.1.1. Un sol material, convecció al node inferior i convecció al node superior

$$A = \begin{pmatrix} 1 + 2F_o(1 + B_{i_{sup}}) & -2F_o & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & -2F_o & 1 + 2F_o(1 + B_{i_{inf}}) & \vdots \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} T_p^{t+\Delta t} \\ T_{p-1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{m-1}^{t+\Delta t} \\ T_m^{t+\Delta t} \\ T_{m+1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{n+1}^{t+\Delta t} \\ T_n^{t+\Delta t} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} T_p^t + T_{\infty_{sup}}(2F_o B_{i_{sup}}) \\ T_{p-1}^t \\ \vdots \\ T_{m-1}^t \\ T_m^t \\ T_{m+1}^t \\ \vdots \\ T_{n+1}^t \\ T_n^t + T_{\infty_{inf}}(2F_o B_{i_{inf}}) \end{pmatrix} \quad (A) \cdot (x) = (b)$$

9.3.1.2. Un sol material, temperatura constant al node inferior i convecció al node superior)

$$A = \begin{pmatrix} 1 + 2F_o (1 + B_{i_{sup}}) & -2F_o & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -F_o & 1 + 2F_o & -F_o & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 1 & \vdots \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} T_p^{t+\Delta t} \\ T_{p-1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{m-1}^{t+\Delta t} \\ T_m^{t+\Delta t} \\ T_{m+1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{n+1}^{t+\Delta t} \\ T_n^{t+\Delta t} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} T_p^t + T_{\infty_{sup}} (2F_o B_{i_{sup}}) \\ T_{p-1}^t \\ \vdots \\ T_{m-1}^t \\ T_m^t \\ T_{m+1}^t \\ \vdots \\ T_{n+1}^t \\ T_n^t \end{pmatrix} \quad (A) \cdot (x) = (b)$$

9.3.2. Diferents materials

9.3.2.1. Diferents materials i mateix Δx , convecció al node inferior i convecció al node superior

$$A = \begin{pmatrix} 1 + 2F_{o1} (1 + B_{i_{sup}}) & -2F_{o1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ -F_{o1} & 1 + 2F_{o1} & -F_{o1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & 0 & -F_{o1} & 1 + 2F_{o1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & 0 & \frac{2}{k_2} & \frac{-2F_{o1}-1}{F_{o1}k_2} + \frac{-2F_{o2}-1}{F_{o2}k_1} & 0 & \frac{2}{k_1} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -F_{o2} & -F_{o2} & 1 + 2F_{o2} & -F_{o2} & 0 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} T_p^{t+\Delta t} \\ T_{p-1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{m-1}^{t+\Delta t} \\ T_m^{t+\Delta t} \\ T_{m+1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{n+1}^{t+\Delta t} \\ T_n^{t+\Delta t} \end{pmatrix} = b = \begin{pmatrix} T_p^t + T_{\infty_{sup}} (2F_{o1} B_{i_{sup}}) \\ T_{p-1}^t \\ \vdots \\ T_{m-1}^t \\ T_m^t \left[-\frac{1}{F_{o1}k_2} - \frac{1}{F_{o2}k_1} \right] \\ T_{m+1}^t \\ \vdots \\ T_{n+1}^t \\ T_n^t + T_{\infty_{inf}} (2F_{o2} B_{i_{inf}}) \end{pmatrix} \quad (A) \cdot (x) = (b)$$

9.3.2.2. Diferents materials i diferents Δx (Δx_1 i Δx_2), convecció al node inferior i convecció al node superior

$$A = \begin{pmatrix} 1 + 2F_{o1} (1 + B_{i, sup}) & -2F_{o1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ -F_{o1} & 1 + 2F_{o1} & -F_{o1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & 0 & -F_{o1} & 1 + 2F_{o1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & 0 & \frac{2\Delta x_2}{k_2} & -\frac{2\Delta x_2}{k_2} - \frac{2\Delta x_1}{k_1} - \frac{\Delta x_2}{F_{o1} k_2} - \frac{\Delta x_1}{F_{o2} k_1} & -F_{o1} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -F_{o2} & -F_{o2} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} T_p^{t+\Delta t} \\ T_{p-1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{m-1}^{t+\Delta t} \\ T_m^{t+\Delta t} \\ T_{m+1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{n+1}^{t+\Delta t} \\ T_n^{t+\Delta t} \end{pmatrix} = b = \begin{pmatrix} T_p^t + T_{\infty, sup} (2F_{o1} B_{i, sup}) \\ T_{p-1}^t \\ \vdots \\ T_{m-1}^t \\ T_m^t \left[-\frac{\Delta x_2}{F_{o1} k_2} - \frac{\Delta x_1}{F_{o2} k_1} \right] \\ T_{m+1}^t \\ \vdots \\ T_{n+1}^t \\ T_n^t + T_{\infty, inf} (2F_{o2} B_{i, inf}) \end{pmatrix}$$

$(A) \cdot (x) = (b)$

9.3.2.4. Diferents materials i diferents Δx ($\Delta x_1 i \Delta x_2$), temperatura constant al node inferior i convecció al node superior

$$A = \begin{pmatrix} 1 + 2F_{o1} (1 + B_{i, sup}) & -2F_{o1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ -F_{o1} & 1 + 2F_{o1} & -F_{o1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & -F_{o1} & 1 + 2F_{o1} & -F_{o1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -\frac{2\Delta x_2}{k_2} & -\frac{2\Delta x_1}{k_1} - \frac{\Delta x_2}{F_{o1} k_2} - \frac{\Delta x_1}{F_{o2} k_1} & \frac{2\Delta x_1}{k_1} & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} T_p^{t+\Delta t} \\ T_{p-1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{m-1}^{t+\Delta t} \\ T_m^{t+\Delta t} \\ T_{m+1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{n+1}^{t+\Delta t} \\ T_n^{t+\Delta t} \end{pmatrix} = b = \begin{pmatrix} T_p^t + T_{\infty, sup} (2F_{o1} B_{i, sup}) \\ T_{p-1}^t \\ \vdots \\ T_{m-1}^t \\ T_m^t \left[-\frac{\Delta x_2}{F_{o1} k_2} - \frac{\Delta x_1}{F_{o2} k_1} \right] \\ T_{m+1}^t \\ \vdots \\ T_{n+1}^t \\ T_n^t \end{pmatrix} \quad (A) \cdot (x) = (b)$$

9.4. Valoració de l'evaporació

Segons s'ha recollit en la bibliografia, el flux de solvent que s'evapora des d'una superfície de solvent pur es pot expressar com [2]

$$\dot{m}_D = k_c A_s M_s (C_S - C_A) \quad (9.7)$$

\dot{m}_D taxa de transferència de massa de solvent que s'evapora $\left(\frac{kg}{s}\right)$

k_c coeficient de transferència de massa superficial $\left(\frac{m}{s}\right)$

A_s superfície considerada (m^2)

M_s massa molecular del solvent $\left(\frac{kg}{kmol}\right)$

C_S concentració molar del vapor a la superfície lliure del solvent $\left(\frac{kmol}{m^3}\right)$

C_A concentració molar del vapor de solvent en l'aire utilitzat per assecatge $\left(\frac{kmol}{m^3}\right)$

Aquesta equació té en compte la diferència de concentració de vapor de solvent que hi ha entre la superfície de la tinta (on la concentració pren el valor màxim), i la concentració de vapor de solvent que hi ha a l'aire que s'utilitza per a l'assecatge (on la concentració pren el valor mínim). Gràcies a aquesta diferència de concentracions, el solvent que es troba en forma de vapor es transfereix des de la tinta cap a l'aire d'assecatge (de la zona de més concentració, cap a la zona amb menys concentració).

Si es considera que s'ha assolit l'equilibri termodinàmic a la interfície entre el gas i el líquid, aleshores la temperatura del vapor de solvent a la interfície és la mateixa que la temperatura superficial del líquid [2]. El valor de C es pot calcular segons

$$C = \left(\frac{P_b}{R_u T}\right) \cdot 10^{-3} \quad (9.8)$$

P_b pressió parcial de vapor (Pa)

on R_u constant universal dels gasos $\left(8,31 \frac{Pa \cdot m^3}{mol \cdot K}\right)$

T temperatura (K)

El coeficient superficial de transferència de massa es pot calcular com [2]

$$k_c = \frac{\bar{h}}{\rho c_p Le^{2/3}} \quad (9.9)$$

\bar{h} coeficient de transferència de calor per convecció mitjà $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$

ρ densitat del gas $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

c_p calor específic a pressió constant $\left(\frac{J}{kgK}\right)$

Le número de Lewis (*adimensional*)

Per tal de tenir en compte l'efecte derivat del contingut en sòlids en el propi dissolvent (adhesius, resines, pigments), [2] proposa un factor de correcció que afecta l'àrea visible (l'àrea efectiva de transferència es menor que l'àrea visible)

$$A_S = \phi A_o \quad (9.10)$$

A_S àrea efectiva per a la transferència de matèria

A_o àrea visible

$$\phi = \frac{1}{1 + \frac{x_K}{x_S}}$$

x_K és el gruix equivalent del contingut en sòlids

x_S és el gruix equivalent del contingut de solvent

Cal notar que el coeficient ϕ serà variable en el temps, a mesura que es vagi evaporant solvent

reagrupant tots els termes que s'han anat enumerant, queda [2]:

$$\dot{m}_b = \phi A_o k_c (C_S - C_A) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_K}{x_S}\right)} \frac{\bar{h} A_o M_S}{(\rho c_p)_A Le^{2/3} R_u} \left(\frac{P_S}{T_S} - \frac{P_A}{T_A}\right) \quad (9.11)$$

P_S pressió de vapor de saturació del solvent pur, en les condicions de temperatura T_S

T_S temperatura a la que es troba el solvent a la interfície

P_A pressió parcial de vapor del solvent contingut en l'aire utilitzat per a assecatge, en les condicions de temperatura T_A

T_A temperatura de l'aire que s'utilitza per a assecatge

com a simplificació de la equació anterior, es considera que si les concentracions de vapor de solvent contingut en l'aire utilitzat per a l'assecatge són baixes, aleshores les propietats ρ i c_p de la mescla aire/vapor es poden aproximar a les de l'aire pur (sense contingut de solvent)[2].

9.4.1. Càlcul de les pressions de vapor

Pressió de vapor de saturació del solvent pur A partir de la referència bibliogràfica [16]

$$P_S = 10^{A - \frac{B}{C+T_S}} \quad (9.12)$$

P_S pressió de vapor de saturació del solvent pur (*mmHg*)

T_S temperatura a la qual es vol calcular P ($^{\circ}\text{C}$)

	A	B	C	T_{min}	T_{max}
Aigua	8,07131	1.730,63	233,426	1	100
	8,14019	1.810,94	244,485	99	374
Etanol	8,20417	1.642,89	230,3	-57	80
	7,68117	1.332,04	199,2	77	243
Acetat d'Etil	7,10179	1.244,95	217,9	16	76
	7,2597	1.369,41	235,5	77	210

Taula 9.1.: Coeficients per al càlcul de la pressió de vapor de saturació del solvent

Pressió parcial de vapor del solvent en l'aire utilitzat per assecar

a) Per el cas de l'aigua La condició d'entrada al programa serà la humitat relativa de l'aire que s'utilitza per assecar [56].

$$P_A = H_r P_S = H_r \cdot 10^{A - \frac{B}{C+T_S}} \quad (9.13)$$

H_r humitat relativa de l'aire que s'utilitza per a assecar (%)

Exemple:

La pressió parcial del vapor d'aigua contingut en l'aire que s'impulsa per assecar, sota unes condicions de 20°C i una humitat relativa del 75% és

$$P_A = \frac{75}{100} \cdot 10^{8,07131 - \frac{1730,63}{233,426+20}} = 13,105 \text{ mmHg} = 0,01724 \text{ bar}$$

La quantitat de vapor d'aire (g) que corresponen a aquesta pressió parcial es pot calcular com

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{0.01724 \text{ bar} \cdot 1 \text{ m}^3}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 293 \text{ K}} = 717,556 \cdot 10^{-3} \text{ mol} = 0,0129 \text{ kg} = 12,9 \text{ g}$$

Es pot dir que un metre cúbic d'aire humit amb una humitat relativa d'un 75% a 20°C conté 12,9g de vapor d'aigua, amb una pressió parcial de vapor per al vapor d'aigua de 0.01724bar.

b) Per el cas d'un dissolvent orgànic (un únic component) La capacitat d'assecatge es veurà afectada per el nivell de *LEL* que tingui l'aire que s'utilitzi per a l'assecat; és a dir, la quantitat inicial de solvent que està contingut en l'aire que s'utilitzarà per a assecar farà que la capacitat d'assecatge variï. Com més gran sigui el contingut inicial de solvent, menys capacitat d'assecatge tindrà l'aire que s'utilitzi en el procés d'assecat.

Una vegada conegut el nivell de *LEL* d'una màquina sota unes determinades condicions de treball, és possible calcular la pressió parcial de vapor del solvent contingut en l'aire, a partir del procediment que segueix (per més informació sobre conceptes relacionats amb *LEL*, consultar el cap. 3):

	$LEL_{20^\circ\text{C}}(\% \frac{v}{v})$	$LEL_{20^\circ\text{C}}(\frac{g}{m^3})$
Etanol	3.1	59.5
Acetat d'Etil	2.0	73.4

Taula 9.2.: Correspondència $LEL_{20^\circ\text{C}}(\% \frac{v}{v})$, $LEL_{20^\circ\text{C}}(\frac{g}{m^3})$

La variació de *LEL* en funció de la temperatura obeeix l'equació [18]

$$LEL_T = LEL [1 - \Delta_{LEL} (T - 20)]$$

LEL_T nivell de *LEL* en $(\frac{g}{m^3})$ a la nova temperatura

LEL nivell de *LEL* en $(\frac{g}{m^3})$ a 20°C

Δ_{LEL} dependència de la temperatura deguda a la cinètica de reacció de *LEL*. Si es desconeix de manera fiable el seu valor, es pot aproximar tot suposant $\frac{20\%}{100K} = 0.002 \frac{1}{K}$.

Una vegada coneguda la concentració de solvent, és possible calcular la pressió parcial de vapor d'igual manera que s'ha fet en l'apartat anterior (prenent com a base $1m^3$ de mescla d'aire i solvent)

$$LEL_T \left(\frac{g}{m^3} \right) \rightarrow \begin{cases} 1m^3(\text{com a base}) \\ \text{massa molar solvent} \end{cases} \rightarrow LEL_T(\text{mol})$$

$$P_{A(\text{solvent orgànic})} = \frac{LEL_{T(\text{mol})} RT}{1m^3} = LEL_{T(\text{mol})} RT$$

9.4.2. Càlcul del número de Lewis Le

El número de Lewis es pot calcular com

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \tag{9.14}$$

D_{AB} difusivitat màssica del solvent en l'aire $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

α difusivitat tèrmica de l'aire $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Per ambdós casos que segueixen, les propietats ρ , c_p i Le es calculen a la temperatura mitjana entre la temperatura de la superfície del solvent i la temperatura del jet d'aire; per tant $T = \frac{T_s + T_A}{2}$.

a) Per el cas de l'aigua La difusivitat del vapor d'aigua en l'aire es pot calcular com [3]

$$D_{AB} = 0.26 \cdot 10^{-4}_{(298K)} \tag{9.15}$$

D_{AB} difusivitat del vapor d'aigua en aire, a $298K$ $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Per transformar aquesta difusivitat a una altra temperatura es pot aproximar com [3]

$$D_{AB_T} = D_{AB(298K)} \left(\frac{T}{298} \right)^{\frac{3}{2}} \tag{9.16}$$

D_{AB_T} difusivitat del vapor d'aigua en aire, a la nova temperatura desitjada $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

T temperatura desitjada (K)

b) Per el cas d'un dissolvent orgànic (un únic component) La referència bibliogràfica [17] aporta la següent correlació

$$D_{AB} = A + BT + CT^2 \quad (9.17)$$

En aquesta fórmula D_{AB} està expressat en $\left(\frac{cm^2}{s}\right)$

	A	B	C
Etanol	-0.10107	$5.6275 \cdot 10^{-4}$	$5.8314 \cdot 10^{-7}$
Acetat d'Etil	-0.07262	$4.0240 \cdot 10^{-4}$	$4.3923 \cdot 10^{-7}$

Taula 9.3.: Coeficients per al càlcul de la difusivitat del solvent en l'aire

T temperatura desitjada (K)

9.4.3. Càlcul de l'entalpia de vaporització h_{fg} del solvent

A partir de les dades extretes de les referències bibliogràfiques [15] i [16]

	$h_{fg} \left(\frac{kJ}{mol}\right)$	A	B	C	D	E	$T_c (K)$
Aigua	-	5.6297	13.962	-11.673	2.1784	-0.31666	647.3
Etanol	40.5	9.1919	2.8118	8.6931	-11.776	-31.745	516.2
Acetat d'Etil	31.9	-	-	-	-	-	-

Taula 9.4.: Coeficients per al càlcul de l'entalpia de vaporització del solvent

$$h_{fg} = RT_c \left(A\tau^{\frac{1}{3}} + B\tau^{\frac{2}{3}} + C\tau + D\tau^2 + E\tau^6 \right) \quad (9.18)$$

h_{fg} calor de vaporització $\left(\frac{J}{mol}\right)$

$$\tau = 1 - \frac{T}{T_c} \quad (9.19)$$

La temperatura a considerar per a calcular l'entalpia d'evaporació és la temperatura a la superfície del líquid que es vol evaporar T_s .

9.4.4. Node situat a la part superior amb evaporació, convecció i conducció

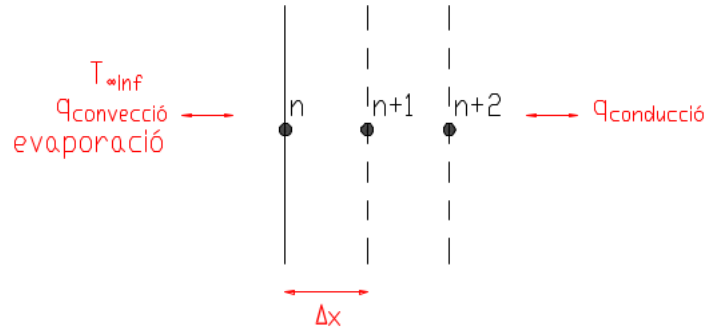


Figura 9.6.: Balanç d'energia per al node situat a la part superior, amb evaporació, convecció i conducció

$$h_{sup}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t}) + \frac{kA(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t})}{\Delta x} = \rho \frac{\Delta x}{2} c \frac{(T_p^{t+\Delta t} - T_p^t)}{\Delta t} A + \dot{m}_b A h_{fg}$$

$$\frac{h_{sup}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t})\Delta x + kA(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t})}{\Delta x} = \frac{\rho \Delta x c (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) A + \dot{m}_b A h_{fg} 2\Delta t}{2\Delta t}$$

$$2h_{sup}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t})\Delta x \Delta t + 2kA(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t})\Delta t = \rho \Delta x^2 c (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) A + \dot{m}_b A h_{fg} 2\Delta t \Delta x$$

$$\frac{2h_{sup}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t})\Delta x \Delta t}{k} + 2A(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t})\Delta t = \frac{\rho \Delta x^2 c (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) A}{k} + \frac{\dot{m}_b A h_{fg} 2\Delta t \Delta x}{k}$$

substituint els termes

$$B_{i_{sup}} = \frac{h_{sup}\Delta x}{k} \quad F_o = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c}$$

$$2B_{i_{sup}}A(T_{\infty sup} - T_p^{t+\Delta t})\Delta t + 2A\Delta t(T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) = \frac{\Delta x^2}{\alpha}(T_p^{t+\Delta t} - T_p^t)A + \frac{\dot{m}_b A h_{fg} 2\Delta t \Delta x}{k}$$

$$2B_{i_{sup}} A(T_{\infty_{sup}} - T_p^{t+\Delta t})\Delta t + 2A\Delta t (T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) = \frac{\Delta t}{F_o} (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) A + \frac{\dot{m}_b A h_{fg} 2\Delta t \Delta x}{k}$$

$$2B_{i_{sup}} (T_{\infty_{sup}} - T_p^{t+\Delta t}) + 2 (T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) = \frac{1}{F_o} (T_p^{t+\Delta t} - T_p^t) + \frac{\dot{m}_b h_{fg} 2\Delta x}{k}$$

$$2F_o B_{i_{sup}} (T_{\infty_{sup}} - T_p^{t+\Delta t}) + 2F_o (T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t}) = T_p^{t+\Delta t} - T_p^t + \frac{\dot{m}_b h_{fg} 2\Delta x F_o}{k}$$

$$2F_o B_{i_{sup}} T_{\infty_{sup}} - 2F_o B_{i_{sup}} T_p^{t+\Delta t} + 2F_o T_{p-1}^{t+\Delta t} - 2F_o T_p^{t+\Delta t} = T_p^{t+\Delta t} - T_p^t + \frac{\dot{m}_b h_{fg} 2\Delta x F_o}{k}$$

$$T_{\infty_{sup}} (2F_o B_{i_{sup}}) - 2F_o B_{i_{sup}} T_p^{t+\Delta t} - 2F_o T_{p-1}^{t+\Delta t} - T_p^{t+\Delta t} + 2F_o T_{p-1}^{t+\Delta t} + T_p^t - \frac{\dot{m}_b h_{fg} 2\Delta x F_o}{k} = 0$$

$$T_{\infty_{sup}} (2F_o B_{i_{sup}}) - T_p^{t+\Delta t} (2F_o B_{i_{sup}} + 2F_o + 1) + T_{p-1}^{t+\Delta t} (2F_o) + T_p^t - \frac{\dot{m}_b h_{fg} 2\Delta x F_o}{k} = 0$$

$$T_{\infty_{sup}} (2F_o B_{i_{sup}}) - T_p^{t+\Delta t} (1 + 2F_o (1 + B_{i_{sup}})) + T_{p-1}^{t+\Delta t} (2F_o) + T_p^t - \frac{\dot{m}_b h_{fg} 2\Delta x F_o}{k} = 0$$

$$T_p^{t+\Delta t} (1 + 2F_o (1 + B_{i_{sup}})) - T_{p-1}^{t+\Delta t} (2F_o) = T_p^t + T_{\infty_{sup}} (2F_o B_{i_{sup}}) - \frac{\dot{m}_b h_{fg} 2\Delta x F_o}{k} \quad (9.20)$$

9.4.5. Plantejament del sistema d'equacions amb convecció i evaporació al node superior, i convecció al node inferior, diversos materials i mateix Δx

$$A = \begin{pmatrix} 1 + 2F_{o1} (1 + B_{i_{sup}}) & -2F_{o1} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ -F_{o1} & 1 + 2F_{o1} & -F_{o1} & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & -F_{o1} & 1 + 2F_{o1} & -F_{o1} & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & \frac{2}{k_2} & \frac{-2F_{o1}-1}{F_{o1}k_2} + \frac{-2F_{o2}-1}{F_{o2}k_1} & \frac{2}{k_1} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -F_{o2} & 1 + 2F_{o2} & -F_{o2} & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -F_{o2} & 1 + 2F_{o2} & -F_{o2} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & -2F_{o2} & 1 + 2F_{o2} (1 + B_{i_{inf}}) \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} T_p^{t+\Delta t} \\ T_{p-1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{m-1}^{t+\Delta t} \\ T_m^{t+\Delta t} \\ T_{m+1}^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_{n+1}^{t+\Delta t} \\ T_n^{t+\Delta t} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} T_p^t + T_{\infty_{sup}} (2F_{o1} B_{i_{sup}}) - \frac{\dot{m}_b h_{fg} 2\Delta x F_{o1}}{k_1} \\ T_{p-1}^t \\ \vdots \\ T_{m-1}^t \\ T_m^t \left[-\frac{1}{F_{o1} k_2} - \frac{1}{F_{o2} k_1} \right] \\ T_{m+1}^t \\ \vdots \\ T_{n+1}^t \\ T_n^t + T_{\infty_{inf}} (2F_{o2} B_{i_{inf}}) \end{pmatrix} \quad (A) \cdot (x) = (b)$$

9.5. Estudi paramètric de la capacitat d'assecatge d'una pantalla d'assecatge entre tinters

En el cap. 7 s'ha assajat experimentalment la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters situada en el cos impressor de la màquina de proves "M8", sota diverses configuracions de treball, que de manera molt resumida consistia en determinar la velocitat d'impressió màxima a la qual era possible arribar tot obtenint una mostra impresa del treball totalment seca, només variant la velocitat de l'aire que s'ha utilitzat per a l'assecatge (per tant, variant la capacitat d'assecatge de la pròpia pantalla, és a dir, el valor del coeficient de transferència de calor per convecció que era capaç d'aportar la pantalla).

Aquests valors experimentals s'han contrastat amb els valors obtinguts a partir de la resolució del sistema d'equacions matricials que s'ha plantejat en el capítol actual, i s'ha obtingut un bon ajust entre els valors simulats i els valors reals. Així doncs, el sistema d'equacions resulta ésser un bon punt de partida per calcular la capacitat d'assecatge d'una pantalla, per un determinat treball, i per unes determinades condicions d'impressió. Aquest model matemàtic permetrà, en definitiva, fer una estimació de la velocitat a la qual és possible imprimir un treball sota els efectes dels diversos paràmetres que incideixen l'assecatge.

En aquest apartat es realitza tot un seguit de càlculs teòrics a partir de la resolució dels sistemes d'equacions que s'han plantejat en aquest capítol, per veure l'efecte que produeixen els diversos paràmetres en l'assecatge d'un treball teòric.

9.5.1. Configuració del treball

El treball que s'ha decidit utilitzar per a l'estudi paramètric és exactament el mateix que s'ha fet servir en l'assaig experimental del cap. 7. Tot i que ja s'han explicat les condicions de treball en l'esmentat capítol, es tornen a citar en aquest punt:

Propietats del material:

- El material que s'imprimeix és polipropilè nacràt amb un gruix de $25\mu m$.
- Es considera que el material es troba a una temperatura igual a la del tambor central de la impressora, i que està definida a " $T_{tambor}^{\circ C}$ ". El material com que és tan prim (cal recordar que té un gruix d'unes poques micres) iguala la seva temperatura a la que té el tambor de manera molt ràpida. El tambor té un circuit intern de refrigeració / escalfament, que permet mantenir estable la temperatura del cos impressor a aquesta consigna i així evitar dilatacions tèrmiques del propi tambor.

Propietats de la tinta:

El model matemàtic permet realitzar càlculs amb tintes en base aigua així com amb tintes en base solvent (quan es parla de tintes en base solvent es fa referència a tintes en les quals els dissolvents són compostos orgànics enlloc de l'aigua). En tots dos casos, es considera que el micratge de tinta que s'ha aplicat és exactament el mateix, i que es defineix amb un gruix de $1,3125\mu m$.

- Gruix de tinta aplicat, $1,3125\mu m$.
- La tinta s'aplica a una temperatura de $20^{\circ C}$, per tant aquestes són les seves condicions inicials de temperatura que cal imposar per al càlcul.
- El percentatge de sòlids contingut en la tinta és d'un 30%.
- El solvent de la tinta en base solvent és 100% Etanol.
- El solvent de la tinta en base aigua és 100% aigua.

La diferència entre les densitats dels dos líquids, provoca que malgrat el gruix de tinta que s'aplica sobre el substrat sigui exactament el mateix, en el cas de la tinta en base aigua al tenir una densitat superior a la de l'Etanol, s'aporta una major massa de solvent que en el cas de la tinta en base solvent.

Propietats del bufador o llavi:

La separació o distància vertical que hi ha entre el llavi de la pantalla i el bufador, així com l'obertura del propi llavi.

- Separació entre el llavi i el tambor, " $H = b mm$ ".
- Obertura del llavi, " $W = a mm$ ".
- Amplada del llavi de la pantalla, " $W_{llavi} mm$ ". L'assecatge només es porta a terme durant el temps en què el substrat i la tinta que cal assecatge passen sota els efectes de la pantalla, per tant durant el temps que es tarda a recórrer els " $W_{llavi} mm$ " d'amplada del llavi.

Propietats de l'aire utilitzat per a l'assecatge:

El sistema d'assecatge que s'empra a les màquines ofereix la possibilitat de variar el cabal que s'impulsa a través de les pantalles (per tant, en definitiva la velocitat

de l'aire que s'impulsa a la sortida del llavi); també és possible variar a voluntat la temperatura d'impulsió d'aquest aire.

Tal i com s'ha dit en capítols anteriors, les màquines ofereixen la possibilitat de recircular part de l'aire que s'extreu del sistema d'assecatge de la màquina i tornar-lo a dirigir cap al circuit d'impulsió i que es barregi amb l'aire fresc que s'utilitzarà per a assecar la mostra impresa. A mesura que augmenti la proporció en què es recirculi part d'aquest aire amb un cert contingut de solvent, novament cap al circuit d'impulsió, provocarà que l'aire que s'utilitza per a l'assecatge estigui cada vegada més carregat de solvent.

En aquest apartat es desitja visualitzar l'efecte que provoca sobre la capacitat d'assecatge de la pantalla el fet d'utilitzar aire fresc net (sense càrrega de solvents), o bé utilitzar aire recirculat "brut".

- Es varia la temperatura de consigna de l'aire utilitzat per a l'assecatge en els valors de 20, 40, 60 i 80°C.

- La velocitat de l'aire que s'impulsa a través del llavi de la pantalla varia entre 30, 35, 40, 45, 50, 55 i 60m/s.

- En el cas de tintes en base solvent, s'utilitza aire amb diferents nivells de LEL, compresos entre 0, 15, 30 i 45% LEL.

- En el cas de tintes en base aigua, s'impulsa aire amb diferents humitats relatives, amb les característiques que es mostren a la taula que segueix. Es mostren quatre casos, on en cadascun d'ells es parteix d'un aire a temperatura ambient a 20°C amb una humitat relativa diferent.

Cas	HR(%) 20°C	HR(%) 40°C	HR(%) 60°C	HR(%) 80°C
1	0	0	0	0
2	32,7	10,6	3,7	1,6
3	66,0	20,6	7,8	3,3
4	100	32,7	12,6	5,3

Taula 9.5.: Humitats relatives de l'aire a diverses temperatures, per comptabilitzar l'efecte de la humitat a la capacitat d'assecatge

Velocitat d'impressió:

Es varia la velocitat en què s'imprimeix el treball.

- Per les tintes en base solvent s'estudien velocitats de 90 a 350m/min.

- Per les tintes en base aigua, com que els requeriments d'assecatge són més exigents, implica haver d'imprimir a unes velocitats més baixes. En aquest cas, el rang de velocitats va dels 20 a 150m/min.

9.5.2. Estudi paramètric per tintes en base solvent

9.5.2.1. Variació de la velocitat del bufador i de la temperatura d'assecatge

En aquest apartat es valora quina és la quantitat de solvent que s'ha evaporat per el treball tipus que s'ha definit més amunt, sota diverses configuracions d'impressió. Es presenta per a diverses velocitats d'impressió quin és l'efecte que s'obté en tant que el percentatge d'assecatge assolit, si es varien paràmetres de la impressió com la temperatura de l'aire que surt del llavi, així com la pròpia velocitat que té aquest aire quan s'expulsa del llavi.

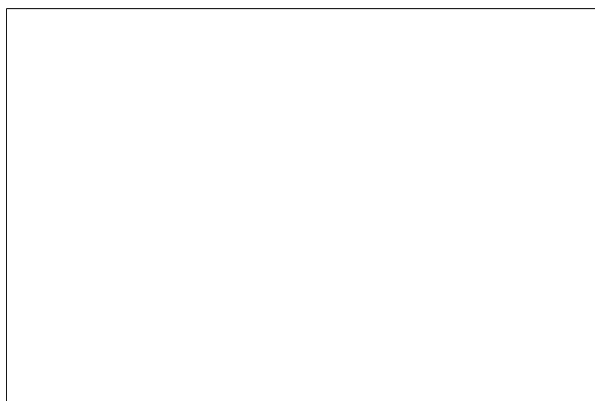
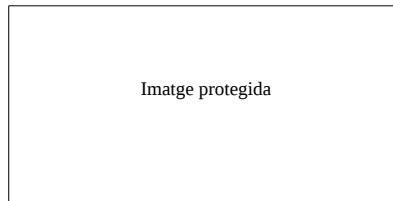


Figura 9.7.: Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, sota diverses configuracions d'impressió (LEL 0%)

Les conclusions que es deriven de l'anàlisi de la fig. 9.7 són:

- La quantitat de dissolvent que és capaç d'assecar una pantalla, sota unes determinades condicions de velocitat i temperatura de l'aire a la sortida del llavi de la pantalla, és molt sensible a la velocitat a la qual s'està imprimint el treball; a majors velocitats d'impressió, és menor la quantitat de solvent que és possible assecar.
- Per a qualsevol velocitat d'impressió, l'efecte d'incrementar la temperatura d'assecatge afecta positivament en la capacitat d'assecatge de la pantalla; si bé cal tenir en compte que l'efecte d'incrementar la temperatura, cada vegada és menys apreciable a mesura que augmenta la velocitat d'impressió. Aquesta tendència no es manté per velocitats molt i molt baixes d'impressió on el percentatge final d'assecatge és proper a la zona del 90%; això es deu a la pròpia cinètica de l'assecatge, que no presenta un comportament constant al llarg del temps (a mesura que queda menys solvent per evaporar, cada vegada és més difícil d'assecar-lo).



Taula 9.6.: Variació en la capacitat d'assecatge que suposa incrementar la temperatura d'assecatge de 20°C a 80°C, per una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", per diverses velocitats d'impressió

- A mesura que augmenta la velocitat d'impressió, l'efecte que suposa en tant que capacitat d'assecatge, el fet d'augmentar la velocitat de l'aire a la sortida del llavi cada vegada es fa menys notable. Tal i com es pot veure a la fig. 9.7, per velocitats de treball més elevades, el pendent de les rectes que defineixen l'assecatge tendeix a ésser cada vegada més baix.

D'aquest fet, es desprèn que en aquells casos on és necessari assolir velocitats d'impressió elevades, cal tenir en compte que és necessari estudiar l'efecte combinat d'incrementar la velocitat de l'aire quan surt del llavi de la pantalla amb un augment de la longitud d'assecatge.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

9.5.2.2. Variació del nivell de LEL (%)

L'aire que s'ha fet servir per a l'assecatge en el cos impressor, ha evaporat una certa quantitat de solvent d'entre la quantitat total que s'ha aplicat sobre el substrat durant el procés d'impressió. Aquest solvent que s'ha evaporat de la banda que s'ha imprès, queda mesclat en estat vapor amb l'aire que s'ha impulsat durant el procés d'assecatge, i això provoca que l'aire que s'aspira de cadascuna de les pantalles del cos impressor quedi contaminat de solvent.

L'aire del circuit d'aspiració del cos impressor es pot dirigir directament cap a l'incinerador de la planta per tractar els gasos de components volàtils i evitar abocar-los directament a l'atmosfera, o bé es pot optar per recircular part d'aquest aire cap al circuit d'impulsió de la màquina per a tornar a ésser utilitzat com a fluid d'assecatge.

Aquest aire es troba a una temperatura intermèdia entre la temperatura de l'aire fresc que s'utilitza per el procés d'impressió i entre la temperatura de consigna que es marca en la impulsió del circuit d'assecatge, cosa que permet estalviar energia calorífica per elevar la temperatura de l'aire, però per altra banda aquest aire estarà parcialment contaminat amb solvent degut a que ja s'ha utilitzat prèviament en el sistema d'assecatge.

En aquest punt es desitja valorar quin és l'efecte que produeix en la capacitat d'assecatge la utilització d'aire fresc (amb contingut de solvent igual a zero) o bé considerant que l'aire que s'utilitza per a l'assecatge prové en part d'un percentatge d'aire que es recircula provinent del circuit d'extracció de la màquina (aire amb un cert contingut de solvent).

Per als càlculs de l'afectació del nivell de LEL a la capacitat d'assecatge, s'ha considerat una velocitat d'impressió de $250m/min$.

A partir de la fig. 9.8, es pot comprovar com els efectes derivats d'utilitzar aire reaprofitat en el circuit d'assecatge provoca una disminució de la capacitat d'assecatge del mateix. De fet, els efectes que provoca presenten un comportament molt similar al que s'obté quan es disminueix la temperatura d'assecatge. Si s'estudien en més detall els resultats obtinguts en aquest cas en particular, es pot veure com incrementar el nivell de LEL en un 15% o un 30%, implica obtenir un resultat molt similar al que s'obtindria si s'abaixés la temperatura d'assecatge uns $15^{\circ}C$ o uns $30^{\circ}C$ respectivament. Queda pendent comprovar si aquesta relació d'equivalència entre temperatura i LEL es manté sota altres condicions de treball.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Figura 9.8.: Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a un nivell de LEL del 15%, per una velocitat d'impressió de 250 m/min

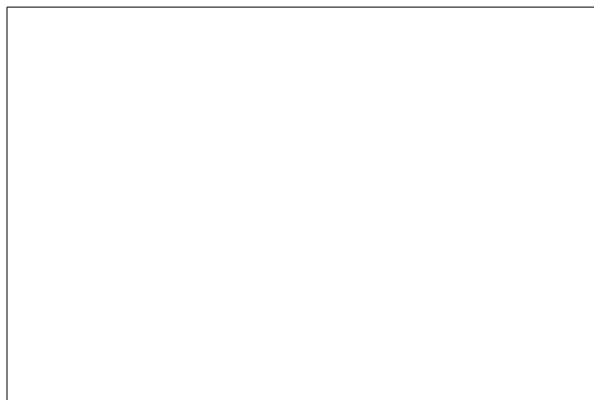


Figura 9.9.: Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a un nivell de LEL del 30%, per una velocitat d'impressió de 250 m/min



Figura 9.10.: Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a un nivell de LEL del 45%, per una velocitat d'impressió de 250 m/min

"Paràgraf deixat intencionadament en blanc"

9.5.3. Estudi paramètric per tintes en base aigua

9.5.3.1. Variació de la velocitat del bufador i de la temperatura d'assecatge

Malgrat que el micratge de tinta que s'ha aplicat per a la tinta en base aigua sigui exactament el mateix que el que s'ha aplicat en la tinta en base solvent, al tenir l'aigua una densitat superior a la del solvent implica que la massa de solvent que cal evaporar en una tinta en base aigua sigui superior al d'una tinta en base solvent. Aquest factor, unit al fet que l'energia necessària per provocar el canvi de fase en el solvent tipus aigua sigui molt més gran que l'energia requerida per induir el canvi de fase en la tinta en què el solvent és Etanol, provoca que el sistema d'assecatge per una màquina que hagi de treballar amb tintes en base aigua tingui uns requeriments de capacitat d'assecatge més grans que els d'una màquina pensada per treballar amb tintes en base solvent.

De fet, si es para atenció a la fig. 9.11, és important remarcar que les velocitats d'impressió a les quals ha estat possible arribar amb les tintes en base solvent són

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



En alguns dels casos estudiats s'ha utilitzat aire per a l'assecatge a 20°C, que és la mateixa temperatura a la qual es troba el solvent a l'inici dels càlculs. En aquests casos no ha arribat a condensar el vapor d'aigua contingut en l'aire degut al fet que la temperatura del substrat és de " T_{tambor} °C" (igual que la temperatura del tambor central), per tant per sobre de la temperatura de l'aire utilitzat per assecar.

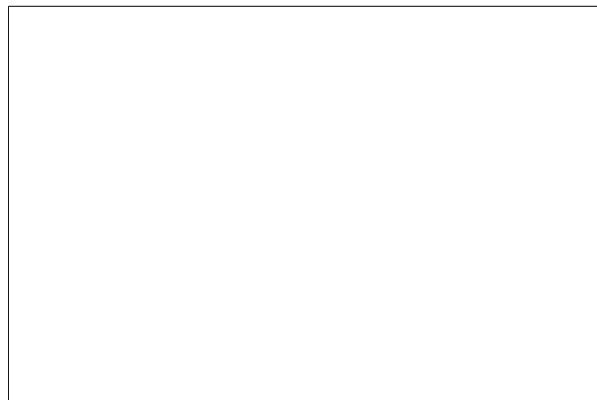


Figura 9.12.: Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a\text{ mm}$ ", " $H = b\text{ mm}$ ", per un treball tipus, a una humitat relativa del 33% a 20°C, per una velocitat d'impressió de 50m/min

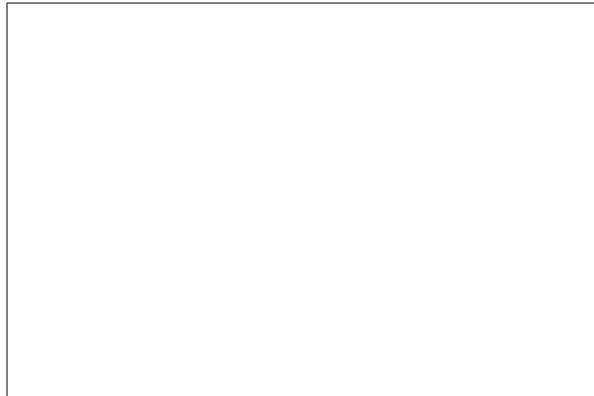


Figura 9.13.: Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a una humitat relativa del 66% a 20°C, per una velocitat d'impressió de 50m/min

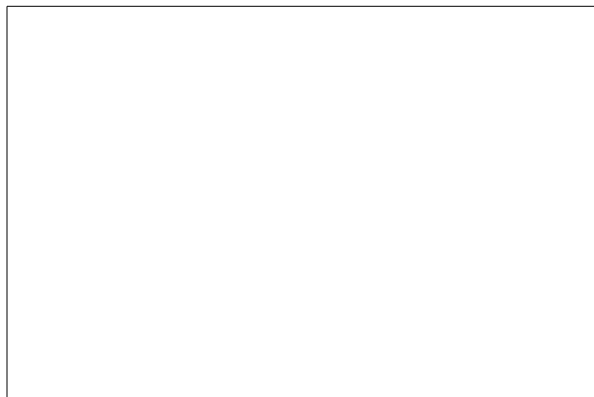


Figura 9.14.: Variació de la capacitat d'assecatge d'una pantalla entre tinters amb les condicions geomètriques " $W = a \text{ mm}$ ", " $H = b \text{ mm}$ ", per un treball tipus, a una humitat relativa del 100% a 20°C, per una velocitat d'impressió de 50m/min

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

S'ha fet l'exercici de provocar una situació en els càlculs en què l'aire del sistema d'assecatge tingues tendència a condensar, per mirar si el codi era capaç de capturar aquest comportament. S'ha assajat, per exemple, un cas hipotètic en què l'aire d'assecatge es trobés a 20°C, amb una humitat relativa del 100%, i tant l'aigua que actua com a solvent en la tinta, com el material de tipus plàstic que s'imprimeix així com el tambor central de la impressora estiguessin a una temperatura també igual a 20°C; sota aquestes condicions, es produïa condensació sobre el substrat enlloc d'evaporar, tal i com s'esperava.

9.5.4. Conclusions

La quantitat de dissolvent evaporat respecte de la que s'ha aplicat sobre el substrat, és molt sensible a la velocitat d'impressió a la qual està treballant la màquina. Per un mateix cabal d'aire impulsat a través de la pantalla d'assecatge, s'obté una menor capacitat d'assecatge a mesura que s'augmenta la velocitat de treball de la màquina.

Un augment en la temperatura de l'aire que s'utilitza per a l'evaporació del dissolvent que s'ha aplicat, repercuteix positivament en l'obtenció d'un percentatge d'assecatge més elevat.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

9.6. Estudi paramètric de la capacitat d'assecatge d'un túnel

A la secció precedent s'ha fet un estudi paramètric de la capacitat d'assecatge d'una pantalla situada en el cos impressor d'una impressora flexogràfica, i tal i com s'ha comentat, el tall de codi que s'executa amb QtOctave per al càlcul de la capacitat d'assecatge de la pantalla presenta una bona correlació entre els resultats reals i els teòrics.

Malgrat no es disposa de dades experimentals del comportament d'un túnel en tant que capacitat d'assecatge, es desitja realitzar un estudi paramètric de la seva capacitat d'assecatge però en aquest cas més simplificat per reduir el temps de càlcul.

Aquest càlcul serà orientatiu, per visualitzar tendències a l'hora que s'afecta un o altre paràmetre que defineix el túnel d'assecatge, ja que un dels valors més importants que cal tenir en compte per valorar la capacitat d'assecatge del túnel és el valor del coeficient de transferència de calor per convecció \bar{h} .

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Una altra de les simplificacions que s'han considerat és que el valor del coeficient \bar{h} s'ha calculat mitjançant simulació, sense tenir en compte la interacció que hi pogués haver amb una altra pantalla que estigués pròxima. Aquesta simplificació té sentit fer-la en el cos impressor ja que les pantalles d'assecatge es troben a una distància considerable les unes de les altres, en canvi en el túnel d'assecatge aquesta distància és més baixa i poden produir-se doncs interferències que afectin al valor del coeficient de transferència de calor degut al fet que l'aire provinent d'una pantalla entri en contacte amb l'aire provinent de la pantalla que té justament al costat. Com que no es disposa d'aquests valors del coeficient en funció de la distància de separació entre pantalles consecutives, s'opta per utilitzar el valor d'aquest coeficient obtingut per les pantalles del cos impressor com si les pantalles actuessin sense cap interacció entre elles.

Un altre factor que cal tenir en compte a l'hora de fer el càlcul del valor de \bar{h} per el túnel, és recalculer el valor per a la distància de separació que es considera entre pantalles. A tinters s'havia fet la mitjana del coeficient de transferència per una amplada total del llavi de " $W_{llavi} mm$ ", en canvi per el túnel la distància a considerar a l'hora de fer la mitjana del coeficient és molt més elevada ja que s'ha pres la mitjana per una amplada igual a la distància de separació que hi ha entre dues

pantalles consecutives que en els dissenys actuals és d'aproximadament " $W_{túnel} \text{ mm}$ ". El fet de considerar la mitjana en una amplada més gran implicarà que el coeficient \bar{h} disminueixi el seu valor respecte de l'obtingut en el cos impressor.

9.6.1. Configuració del treball

El treball que es simula en el túnel és lleugerament diferent del que s'ha analitzat en el cos impressor, la diferència rau en el fet que en el càlcul de la pantalla entre tinters només s'estudia una sola pantalla actuant de manera aïllada i per tant només es té en compte el gruix de tinta a evaporar corresponent a un sol tinter. Cal tenir en compte que una impressora flexogràfica té diversos tinters que actuen de manera consecutiva imprimint un color sobre del precedent, i tota la quantitat de tinta que no ha estat possible evaporar en el cos impressor entre dues etapes d'impressió consecutives cal assecar-la en el túnel. És per aquest motiu que la quantitat de tinta a assecar en el túnel té un gruix molt més elevat que no pas la quantitat de tinta que s'ha estudiat en el cos impressor. El fet d'haver d'assecar un micratge elevat de tinta a velocitats d'impressió elevades que poden arribar fins a valors de $400 - 500 \text{ m/min}$ implica que el túnel d'assecatge hagi de tenir una longitud elevada i amb un gran nombre de pantalles actuant de manera consecutiva.

Propietats del material:

- Es pren el mateix material que s'ha utilitzat per a l'anàlisi de les pantalles del cos impressor, polipropilè amb un gruix de $25 \mu\text{m}$.
- Es considera que el material, abans d'entrar al túnel d'assecatge, recorre un tram suficientment llarg com per assolir la temperatura ambient de l'aire que l'envolta durant el trajecte que fa des de la sortida del cos impressor fins a l'entrada del túnel. El material té un gruix tan i tan petit, de l'ordre de micres, que té una inèrcia tèrmica molt petita.

Propietats del material:

- La tinta és la mateixa que en el cas anterior; únicament canvia el micratge que es té en compte a l'hora de calcular l'evaporació. Per als càlculs s'ha considerat que el gruix de la tinta en total és de $12 \mu\text{m}$. D'aquest gruix, tant per les tintes en base solvent com per les tintes en base aigua, es considera que la part corresponent als sòlids es manté en un 30%.

Propietats del llavi:

- Tal com s'ha comentat més amunt, les pantalles del túnel són diferents de les del cos impressor; les pantalles del túnel són pantalles sense confinament.
- L'obertura del llavi es manté igual que en les pantalles entre tinters, a un valor de " $W = a \text{ mm}$ ".
- La separació entre el substrat i la base del llavi és molt més distant en el túnel que en el cos impressor; actualment aquesta separació varia una mica entre els diversos models de màquines, però està entre els " $H = b' \text{ mm}$ ".

Propietats de l'aire utilitzat per a l'assecatge:

- L'ajust del punt de funcionament del túnel d'assecatge és exactament el mateix que en el cos impressor; és possible ajustar el règim del ventilador (per tant el cabal que impulsen les pantalles), la temperatura d'assecatge i la velocitat d'impressió.
- Per simplificar els casos a estudiar, s'han fet els càlculs per la temperatura màxima que permet el material que s'està imprimint que és de 80°C (degut a la limitació temporal no s'assagen més temperatures).
- A títol d'exemple es faran algunes simulacions variant el LEL de l'aire utilitzat per a l'assecatge en tintes en base solvent, o la HR per el cas de tintes en base aigua.

9.6.2. Estudi paramètric per tintes en base solvent

9.6.2.1. Variació de la velocitat de sortida de l'aire de la pantalla

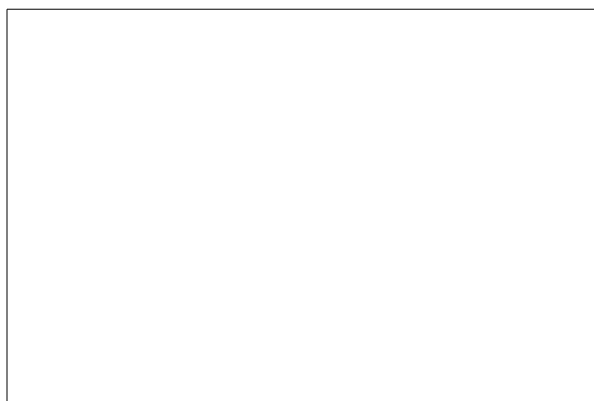


Figura 9.15.: Capacitat d'assecatge d'un túnel de longitud $5m$, amb les condicions geomètriques " $W = a\text{ mm}$ ", " $H = b\text{ mm}$ ", i amb una separació entre pantalles de " $W_{túnel}\text{ mm}$ ", per un treball tipus, utilitzant per a l'assecatge un aire amb un $LEL = 0\%$ i una temperatura de 80°C

De la mateixa manera que passava en el cos impressor, un augment de la velocitat amb la qual la pantalla impulsa l'aire contra el substrat repercuteix positivament en aconseguir una major taxa d'evaporació de solvent respecte del total que s'ha aplicat.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

9.6.2.2. Distància de separació entre dues pantalles consecutives

En aquest punt s'analitza la importància de col·locar més pròximes entre elles les pantalles del túnel d'assecatge; d'aquesta manera, s'aconsegueix encabir més pantalles d'assecatge per unitat de longitud del túnel, i per tant més pantalles actuant al mateix temps, i alhora més cabal d'aire disponible per a assecar el solvent de la tinta. La longitud total del túnel que s'ha considerat és de $5m$, i permet encabir-hi un total de " $N_{pantalles}$ " pantalles si estan separades entre elles " $W_{túnel} mm$ " (distància que s'implementa en l'actualitat), o bé un total de " $N'_{pantalles}$ " pantalles si estan separades entre elles " $W'_{túnel} mm$ ". El fet de passar de " $N_{pantalles}$ " a " $N'_{pantalles}$ " pantalles comporta de manera directa que el cabal d'impulsió s'incrementa en " $x\%$ " en total, ja que les pantalles addicionals es consideren idèntiques que les actuals. Els resultats es mostren a la fig. 9.16.

A la fig. 9.17 i a la fig. 9.18 es presenten les longituds necessàries del túnel per assecar totalment el dissolvent contingut en la tinta que s'ha aplicat sobre el substrat. La llargada del túnel es calcula per diverses velocitats d'impressió, així com per diferents separacions verticals entre el substrat i la pantalla d'assecatge.

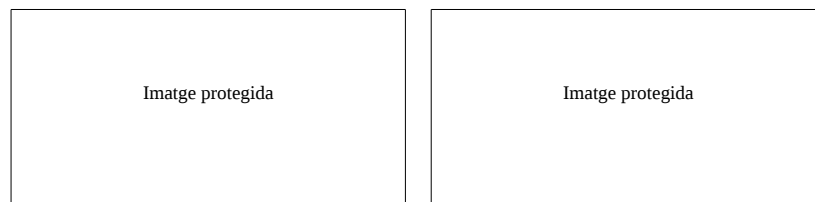


Figura 9.16.: Percentatge evaporat per el treball tipus, variant la separació entre pantalles, a l'esquerra és de " $W_{túnel} mm$ " i a la dreta és de " $W'_{túnel} mm$ ", a una velocitat de l'aire de " $V_1 m/s$ " i a una temperatura de $80^{\circ}C$, amb un nivell de $LEL = 0\%$

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

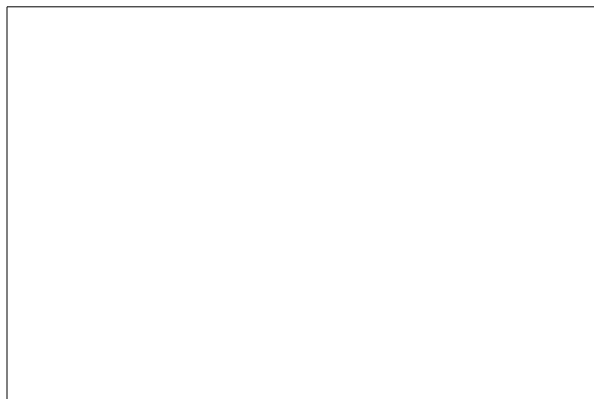


Figura 9.17.: Longitud del túnel necessària per assecar en un 99% el treball estàndard que s'ha considerat, a una velocitat de l'aire de " $V_1 m/s$ " i a una temperatura de $80^{\circ}C$, amb un nivell de $LEL = 0\%$, a diferents velocitats d'impressió i a diferents separacions entre el substrat i la pantalla (separació entre pantalles de " $W_{túnel} mm$ ")

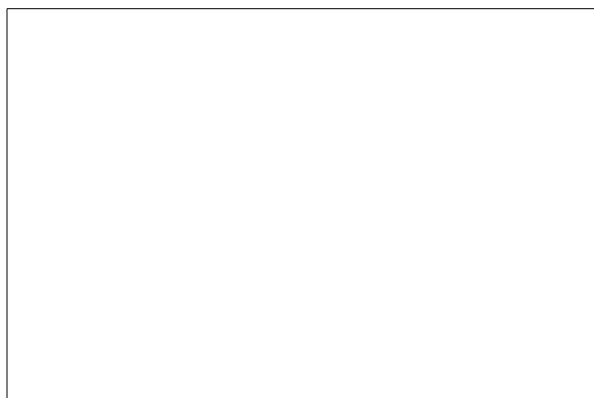


Figura 9.18.: Longitud del túnel necessària per assecar en un 99% el treball estàndard que s'ha considerat, a una velocitat de l'aire de " $V_1 m/s$ " i a una temperatura de $80^{\circ}C$, amb un nivell de $LEL = 0\%$, a diferents velocitats d'impressió i a diferents separacions entre el substrat i la pantalla (separació entre pantalles de " $W'_{túnel} mm$ ")

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

9.6.2.3. Alternatives de disseny del túnel per millorar-ne la capacitat d'assecatge

En els apartats anteriors s'ha relacionat la capacitat d'assecatge del túnel amb la separació entre pantalles, amb la velocitat de sortida de l'aire del llavi, i amb la distància vertical de separació entre la pantalla i el substrat.

En aquest apartat s'estudia l'efecte que produeix en l'assecatge el fet d'incrementar la longitud del túnel, incorporar una calandra que escalfi lleugerament el substrat imprès abans d'entrar al túnel, i finalment el treballar amb un túnel de sustentació.

Increment en la longitud del túnel

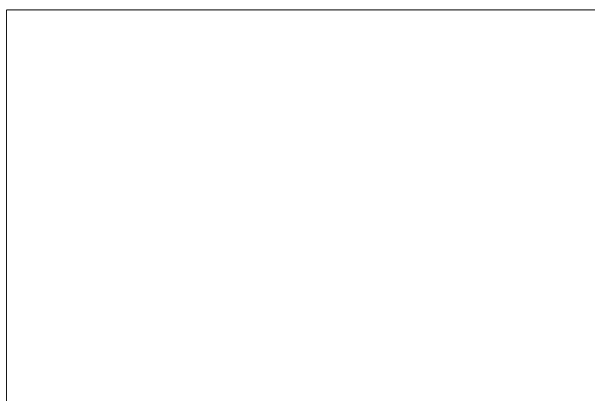


Figura 9.19.: Percentatge evaporat per el treball tipus, a diverses velocitats d'impressió, i per diverses longituds del túnel

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Calandra escalfadora

En els càlculs anteriors s'ha tingut en compte que quan el material (el conjunt format per el substrat i la tinta) s'introdueix dintre del túnel, es troba a una temperatura de 20°C. Aquí s'estudia com repercuteix en el resultat final el fet de que el conjunt entri dintre del túnel a una temperatura de 35°C enlloc dels 20°C que s'han considerat com a temperatura ambient. Per portar a terme aquest increment de temperatura

es podria col·locar una calandra escalfadora a un punt intermedi situat entre la sortida del cos impressor i l'entrada del túnel.

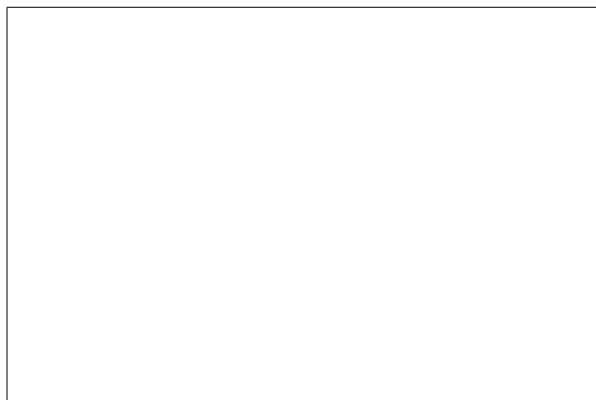


Figura 9.20.: Percentatge evaporat per el treball tipus, a diverses velocitats d'impressió, sense calandra escalfadora i amb calandra escalfadora

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Túnel de sustentació

Els túnels de sustentació substitueixen els corròns que guien el material dintre del túnel per unes pantalles situades a la cara inferior del material. Aquestes pantalles addicionals, aporten energia addicional a l'hora de facilitar l'assecatge del substrat imprès quan travessa el túnel.

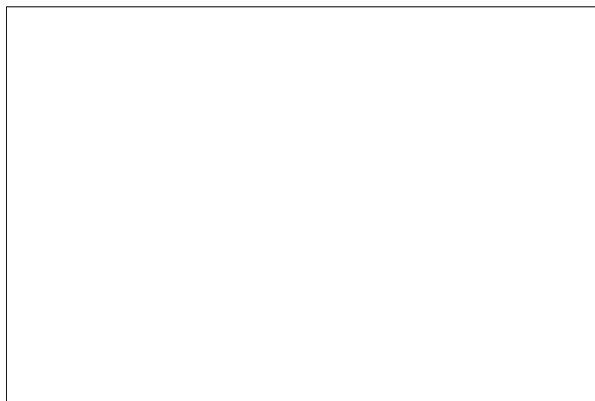


Figura 9.21.: Percentatge evaporat per el treball tipus, a diverses velocitats d'impressió, túnel de $5m$ estàndard, i túnel $5m$ sustentació

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

Temperatura del material a la sortida del túnel

En algunes aplicacions pot ésser necessari garantir que el material imprès assoleixi una determinada temperatura i que aquesta es mantingui durant un cert temps, per garantir que la tinta impresa quedi anclada sobre del substrat una vegada es rebobini el material.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Figura 9.22.: Temperatura assolida per el material a la sortida del túnel, a diverses velocitats d'impressió, túnel de 5m estàndard, túnel 5m amb calandra escalfadora a 35°C, i túnel 5m sustentació

9.6.2.4. Variació del nivell de LEL (%)

Al igual que succeïa en el cos impressor un augment del nivell de LEL en l'aire que s'utilitza per a l'assecatge, penalitza la capacitat d'assecatge de la màquina.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”



Figura 9.23.: Variació de la capacitat d'assecatge d'un túnel d'una longitud de $5m$, amb pantalles separades " $W_{túnel} mm$ ", per diferents relacions geomètriques H/W per un treball tipus, a un nivell de LEL del 15%, una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", i una temperatura d'assecatge de $80^{\circ}C$, per diverses velocitats d'impressió

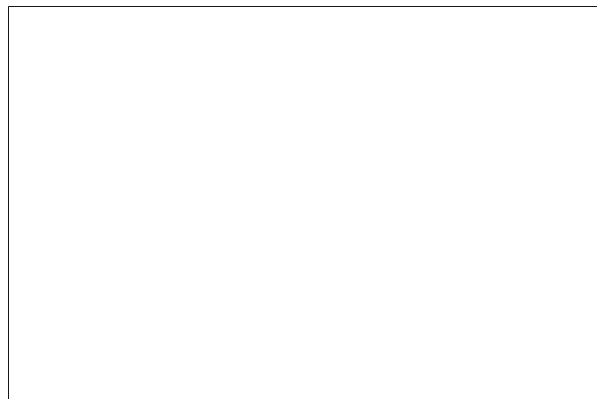
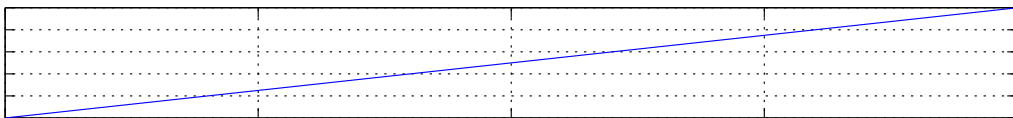
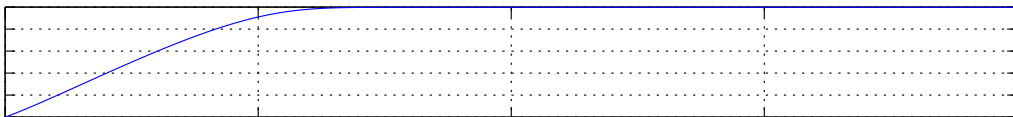
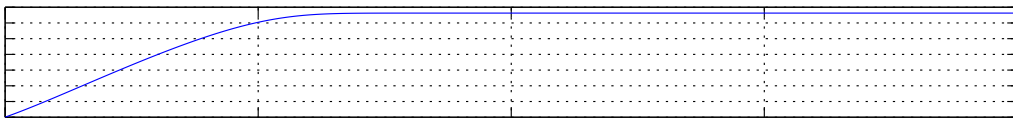
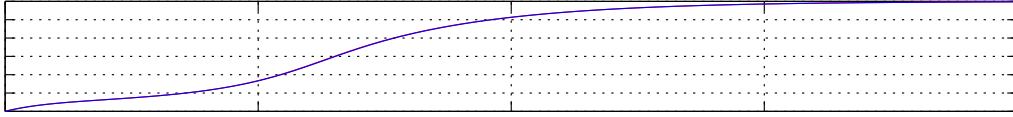


Figura 9.24.: Variació de la capacitat d'assecatge d'un túnel d'una longitud de $5m$, amb pantalles separades " $W_{túnel} mm$ ", per diferents relacions geomètriques H/W per un treball tipus, a un nivell de LEL del 30%, una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", i una temperatura d'assecatge de $80^{\circ}C$, per diverses velocitats d'impressió

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



9.6.3. Estudi paramètric per tintes en base aigua

Pel que fa a les velocitats d'impressió assolides, s'observa un comportament molt similar al que s'ha obtingut en el cos impressor, és a dir, la velocitat de treball queda reduïda de manera molt considerable en comparació a una tinta en base solvent, per un mateix percentatge de solvent evaporat.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

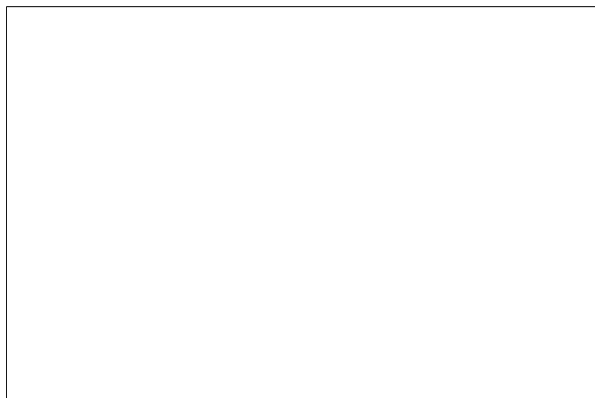
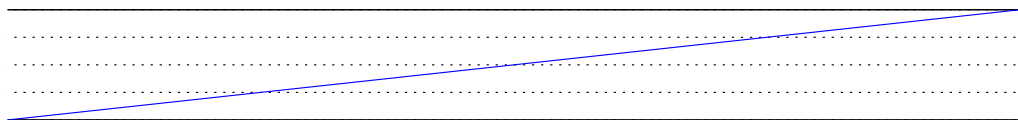
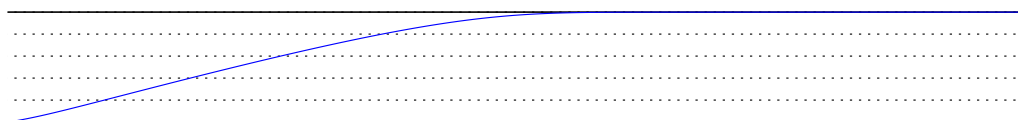
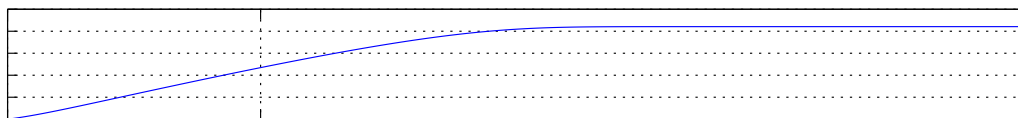
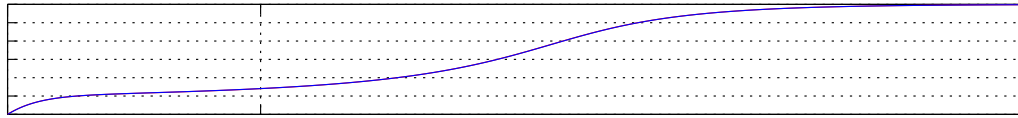


Figura 9.26.: Variació de la capacitat d'assecatge d'un túnel d'una longitud de $5m$, amb pantalles separades " $W_{túnel} mm$ ", per diferents relacions geomètriques H/W per un treball tipus, amb una humitat relativa a $20^{\circ}C$ del 33%, una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", i una temperatura d'assecatge de $80^{\circ}C$ ($HR = 1,6\%$), per diverses velocitats d'impressió



Figura 9.27.: Variació de la capacitat d'assecatge d'un túnel d'una longitud de $5m$, amb pantalles separades " $W_{túnel} mm$ ", per diferents relacions geomètriques H/W per un treball típic, amb una humitat relativa a $20^{\circ}C$ del 66% , una velocitat al llavi de " $V_1 m/s$ ", i una temperatura d'assecatge de $80^{\circ}C$ ($HR = 3,3\%$), per diverses velocitats d'impressió

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



9.6.4. Conclusions

De la mateixa que manera que succeïa en el cos impressor, un augment de la velocitat d'impressió de la màquina comporta una disminució de la capacitat d'assecatge del túnel.

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

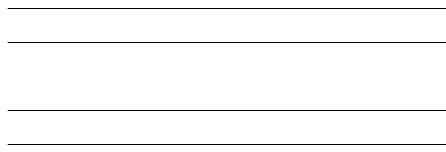
“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Paràgraf deixat intencionadament en blanc”

“Pàgina deixada intencionadament en blanc”



9.7 Validació experimental dels resultats teòrics obtinguts amb *QtOctave*[®], de la calandra escalfadora de la màquina “M9”



“Pàgina deixada intencionadament en blanc”

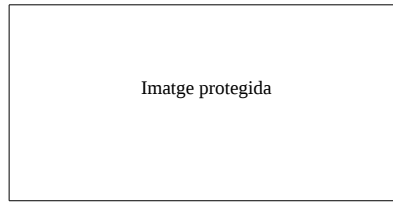


Figura 9.32.: Passat del material i punt de mesura

Per poder mesurar la temperatura del substrat de tipus plàstic en moviment s'utilitza el termoparell tipus T per a superfícies mòbils. Les especificacions tècniques del qual són:

- Rang de mesura d'entre -30°C i 250°C
- Velocitats de fins a $275\text{m}/\text{min}$
- Es pot utilitzar sobre materials metàl·lics, plàstics i tèxtils
- El capçal està esmorteït mitjançant una molla, d'aquesta manera es facilita que hi hagi un millor contacte entre el termoparell i el material de tipus plàstic en moviment que es vol mesurar



Figura 9.33.: Sensor de temperatura per contacte

El sensor de temperatura s'acobla a un braç magnètic articulad que es subjecta a la bancada metàl·lica de la màquina.



Figura 9.34.: Braç magnètic articulat, amb el sensor acoblat

Es decideix ubicar el sensor a l'extrem del costat operari de la màquina; en aquesta zona és on el fluid que circula per dintre de la calandra escalfadora presenta la seva temperatura més elevada, per tant l'efecte de la calandra serà més acusat.

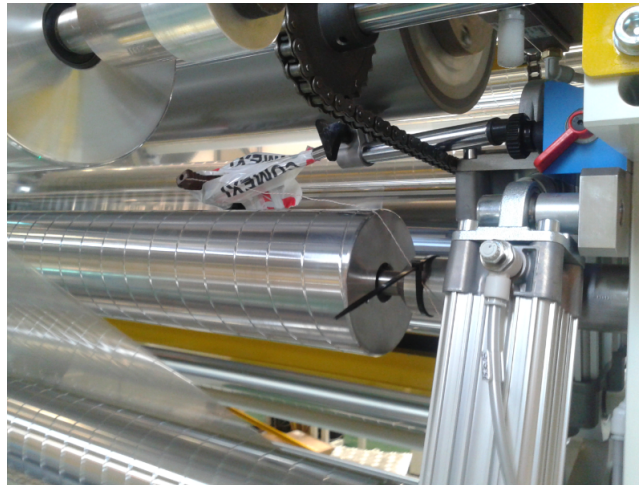


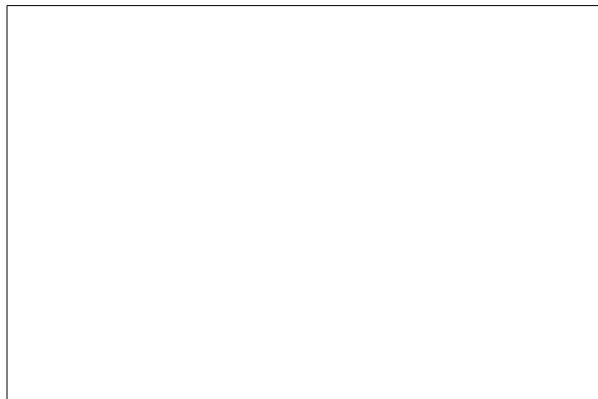
Figura 9.35.: Col·locació del sensor de temperatura

El punt on es pren la mesura de la temperatura del material està situat just després de què el material hagi deixat d'estar en contacte amb la calandra escalfadora.

“Pàgina deixada intencionadament en blanc”



“Pàgina deixada intencionadament en blanc”



“Pàgina deixada intencionadament en blanc”

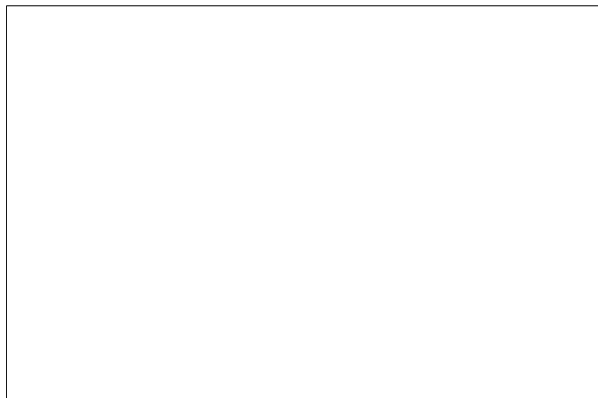




Figura 9.41.: Temperatura final assolida per el material, a diverses velocitats d'avanç

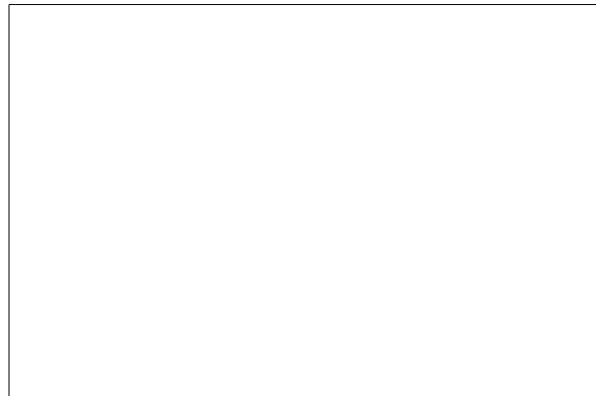


Figura 9.42.: Temperatura final assolida per el material, en funció del temps de contacte

9.7.3. Resultats teòrics

Per tal de modelar correctament la transferència de calor experimental cal detectar quins són els mecanismes de transferència de calor que tindran lloc en aquest muntatge:

- Transferència de calor per convecció entre l'ambient i el substrat de material de tipus plàstic.
- Transferència de calor per conducció al substrat.

- Transferència de calor per conducció a la calandra.
- Transferència de calor per convecció entre el fluid que circula per dintre de la calandra i la pròpia calandra.

Un primer paràmetre que cal determinar és el coeficient de transferència de calor per convecció que defineix quin intercanvi de calor es produirà entre un cilindre en rotació a una determinada temperatura i el fluid que l'envolta. La bibliografia [3] per al cas d'un cilindre orientat horitzontalment com és el cas que es desitja estudiar, suggereix l'equació

$$\overline{Nu_D} = 0.133 Re_D^{2/3} Pr^{1/3} \quad (9.21)$$

on

$$Re_D = \frac{\Omega D^2}{\nu} \quad (9.22)$$

Ω velocitat de rotació del cilindre $\left(\frac{rad}{s}\right)$

D diàmetre del cilindre (m)

Simplificacions adoptades en les simulacions teòriques:

- La temperatura d'entrada del fluid a la calandra es manté constant independentment de la velocitat a la qual estigui treballant la màquina.
- No hi ha pèrdues de calor entre el termoregulador i la calandra calefactora (es comprova amb una sonda de temperatura per contacte que la temperatura a la sortida de la connexió del termoregulador i a la connexió situada a l'entrada que alimenta la calandra és la mateixa).
- El cabal volumètric d'aigua que circula per dintre de la calandra es manté constant al llarg del temps. La bomba que impulsa el cabal per el circuit funciona a un règim constant i no hi ha elements que puguin proporcionar una pèrdua de càrrega a la instal·lació que sigui variable en el temps.
- Es considera que no hi ha intercanvi de calor entre els conductes situats concèntricament pels quals circula el fluid que entra i surt de la calandra.
- No hi ha pèrdua de temperatura de l'aigua des de que entra a la calandra fins que inicia el seu recorregut per les espirals internes.
- La temperatura a la què es troba la paret metàl·lica de la calandra es suposa uniforme en tot el gruix.

9.7.3.1. Temperatura de consigna del termoregulador, de 70°C

Càlcul del coeficient de transferència de calor entre l'ambient i el substrat

Es pren com a temperatura per fer l'estimació del coeficient $\overline{Nu_D}$ la mitjana entre la temperatura de l'ambient i la de del líquid que circula per dintre de la calandra $\overline{T} = (26.6 + 70)/2 = 48.3^\circ\text{C}$

\overline{T} (°C)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	α (m ² /s)	Pr
48.3	$1.7781 \cdot 10^{-5}$	0.027679	$2.5016 \cdot 10^{-5}$	0.71078

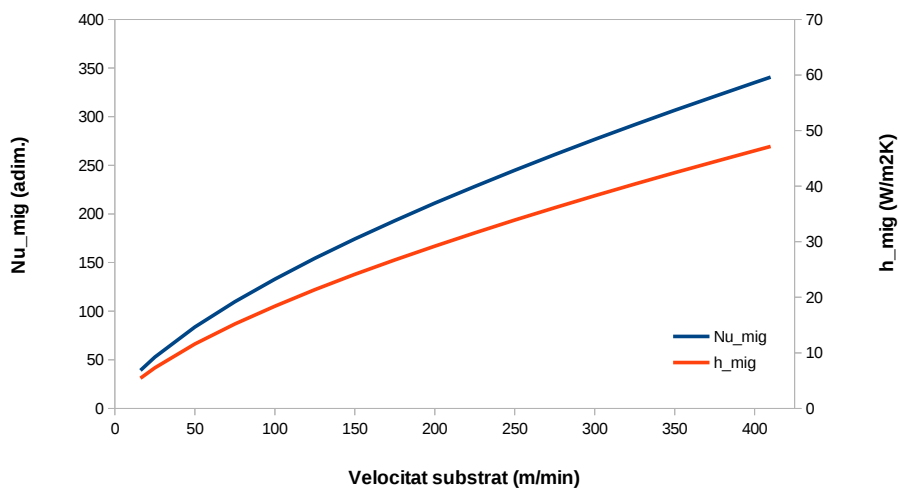


Figura 9.43.: Coeficients de transferència de calor per convecció d'un cilindre horitzontal de " $\varnothing_{calandra}$ mm" amb moviment de rotació. Termoregulador amb consigna 70°C

Càlcul del coeficient de transferència de calor entre el circuit d'aigua calenta i la cara interna de la calandra

Per tal de determinar aquest coeficient de transferència de calor per convecció a la cara interior de la calandra és necessari seguir un procés iteratiu partint de les dades mesurades experimentalment, i ajustant aquests resultats amb les instruccions programades en el codi generat amb *Octave* que s'ha explicat en apartats anteriors.

Per poder fer el càlcul, és necessari establir les condicions inicials dels materials que intervenen en el càlcul. Al substrat de tipus plàstic se li aplica la temperatura que s'ha mesurat en el material abans d'iniciar el moviment, i que és de 26.3°C. Per l'acer cal fer el càlcul de manera indirecta, a partir de la calor aportada al material i la temperatura del fluid intern de la calandra que és de 70°C.



Taula 9.7.: Condicions de temperatura a la base de la calandra

A partir de suposar diversos coeficients de convecció entre el fluid i la part interna de la calandra és possible ajustar els valors teòrics amb els experimentals. A partir dels càlculs teòrics de la fig. 9.44 i la fig. 9.45, es pot concloure que el millor ajust entre experiments i teoria es produeix per un valor del coeficient de transferència de calor intern a la calandra de " $\bar{h}_{calandra} W/m^2K$ "

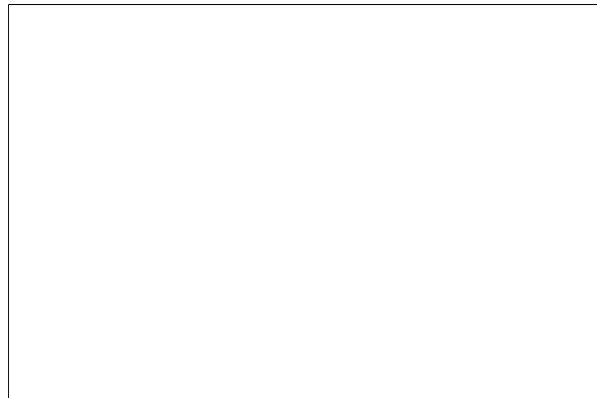
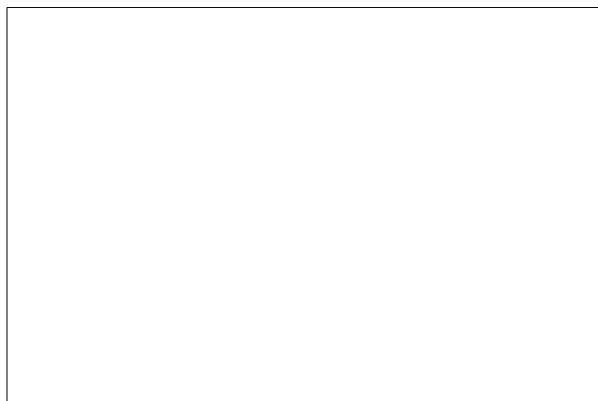


Figura 9.44.: Temperatura final assolida per el material, en funció del temps de contacte

A partir de la figura anterior cal analitzar els resultats en dues zones on l'ajust de resultats entre experiments i teoria mostren més divergència entre ells. Aquestes zones són per temps de contacte entre els dos materials elevats (superiors a 0.8 segons) i per temps de contacte molt breus (inferiors a 0.1 segons).

a) Per temps de contacte elevats, aquesta diferència, pot venir donada pel fet que s'ha considerat una temperatura de consigna del fluid igual a 70°C i que no hi

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



\bar{T} (°C)	ν (m ² /s)	k (W/mK)	α (m ² /s)	Pr
58.3	$1.8763 \cdot 10^{-5}$	0.028396	$2.6450 \cdot 10^{-5}$	0.70936

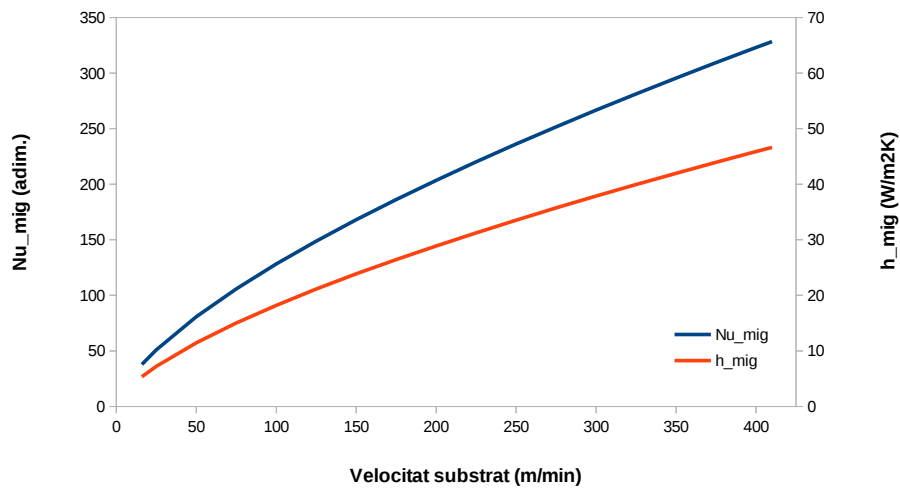


Figura 9.46.: Coeficients de transferència de calor per convecció d'un cilindre horitzontal de " $\varnothing_{calandra} mm$ " amb moviment de rotació. Termoregulador amb consigna 90°C

En aquest cas, s'espera un coeficient de transferència de calor per convecció a la cara interna lleugerament diferent al del cas anterior, ja que les condicions de temperatura del fluid intern han canviat.

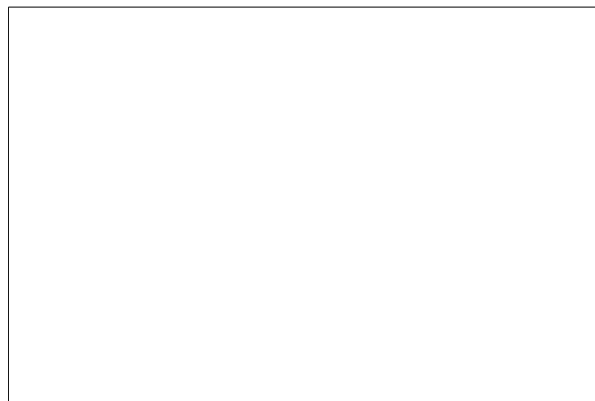


Figura 9.47.: Temperatura final assolida per el material, en funció del temps de contacte

9.8. Validació teòrica dels resultats obtinguts amb *OpenFOAM*® d'un substrat en moviment sota l'acció d'un jet d'aire

En aquest apartat es valida l'ajustament de resultats entre els que s'obtenen mitjançant simulació amb el software *OpenFOAM*® i els que s'obtenen amb el codi creat amb *QtOctave*®.

El cas de validació consisteix en calcular l'evolució de temperatura d'un substrat de tipus plàstic (per tant un anàlisi en estat transitori), al passar sota l'efecte d'un jet d'aire que es troba a alta temperatura i a alta velocitat.

Propietats del substrat:

- Gruix, 12 micres
- Conductivitat tèrmica, $0.15W/mk$
- Densitat, $1395kg/m^3$
- Calor específic, $1170J/kgK$
- Difusivitat tèrmica, $92 \cdot 10^{-9}m^2/s$
- Velocitat d'avanç, $200m/min$

Propietats de l'aire:

Hi ha tres dominis en total: l'aire superior, l'aire inferior i el substrat que queda entremig dels dos dominis.

En el domini situat a la part superior hi ha el jet d'aire que impacta contra el substrat, aquest aire surt del bufador a una temperatura de 80°C i a una velocitat de 40m/s . El bufador té una amplada del llavi $W = 3\text{mm}$ i està separat verticalment del substrat a una distància de $H = 7.8\text{mm}$.

El domini situat a la part inferior consisteix amb aire que es desplaça a una velocitat de 0.5m/s , i la temperatura que té aquest aire quan entra en el domini és de 20°C .

El domini intermedi, és de tipus sòlid i es desplaça cap a la dreta segons es pot apreciar a l'esquema que segueix i que representa el cas que s'ha analitzat:

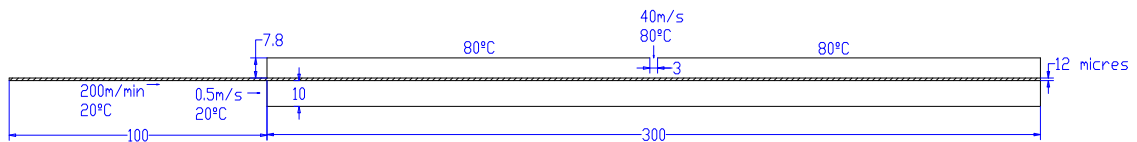


Figura 9.48.: Dominis emprats per la simulació amb *OpenFoam*[®], mides en mm

Simulació amb *OpenFOAM*[®]

Adaptació del solucionador a les noves necessitats

El solucionador del qual es partirà per a la resolució del cas és l'anomenat *chtMultiRegionFoam* que ofereix la possibilitat de calcular la transferència de calor que es produeix entre un domini de material tipus sòlid i un domini de tipus fluid, en aquest cas, en estat transitori.

Per poder realitzar aquest anàlisi, és necessari modificar el codi del solucionador, ja que no té implementada la funcionalitat que permeti el moviment relatiu del domini sòlid respecte del fluid. Tot seguit s'explica l'adaptació que s'ha fet, a partir de la informació recopilada a [27] i [28].

a) Fer una còpia d'un solucionador ja existent, però canviant-li el nom, eliminant les dependències antigues i creant unes noves dependències:

1. Fer una còpia de la carpeta on està ubicat el solucionador original que té *OpenFOAM*[®], anomenat *chtMultiRegionFoam* situat a la ruta `opt/openfoam230/applications/solvers/heatTransfer` i guardar tot el contingut d'aquesta carpeta a la nova ubicació.

2. Canviar el nom a la carpeta que s'ha generat en l'apartat anterior; aquest és el nom que té el nou solucionador. L'adaptació passa a anomenar-se *chtMultiRegionFoam_movingSolid*. La ubicació del nou directori no cal que segueixi una ruta específica relacionada amb el programa, es pot escollir qualsevol ubicació.
3. Eliminar les dependències, executant la instrucció *rmdepall && wclean* dintre de la nova carpeta creada en l'apartat anterior.
4. A l'explorar el contingut del nou directori, es pot apreciar que aquest conté les carpetes *chtMultiRegionSimpleFoam*, *fluid*, *include*, *Make* i *solid*. Com que s'ha canviat de nom a la carpeta que conté els arxius del nou solucionador i que s'ha anomenat *chtMultiRegionFoam_movingSolid*, cal fer també unes adaptacions als diversos fitxers situats dintre la carpeta *Make/files* per tal que reconegui el nou nom que s'ha donat al solucionador. Explorant el fitxer anomenat *files*, es fan els canvis que segueixen:

- Canviar *chtMultiRegionFoam.C* per *chtMultiRegionFoam_movingSolid.C*
- Indicar al software que aquest nou solucionador que s'està adaptant no quedi dintre de les pròpies aplicacions que té generades *OpenFOAM®* per defecte, sinó que són pròpies de l'usuari.

Cal canviar *EXE = \$(FOAM_APP_BIN)/chtMultiRegionFoam*, per *EXE = \$(FOAM_USER_APPBIN)/chtMultiRegionFoam_movingSolid*.

A més a més, també s'ha de canviar el nom del fitxer *chtMultiRegionFoam.C* situat dintre de la nova carpeta arrel que s'ha anomenat *chtMultiRegionFoam_movingSolid*, per *chtMultiRegionFoam_movingSolid.C*.

5. Compilar el nou solucionador mitjançant la instrucció *wmake*.
 6. Amb les passes seguides fins el punt anterior, s'ha aconseguit un nou solucionador anomenat *chtMultiRegionFoam_movingSolid* que actua exactament de la mateixa manera que l'antic solucionador *chtMultiRegionFoam*. La nova instrucció ja és reconeixible cridant-la des del terminal, i s'obté el mateix resultat emprant el codi nou o el codi antic. El proper pas consisteix en adaptar el codi de manera que permeti el moviment del domini sòlid.
- b) Adaptar el contingut del solucionador, als nous requeriments:

1. Per definir el moviment de translació del material tipus sòlid, es defineix la velocitat d'avanç del material. En els cas que s'estudia només es contempla la possibilitat de translació en una sola direcció (component 'x'). Es defineix una variable en el diccionari que controla els paràmetres d'execució del cas *controlDict* i que s'anomena *velocity_solid* (*m/s*). Aquesta velocitat s'utilitza més endavant.

S'ha generat un arxiu del tipus *.H* i que s'anomena *read_velocity_solid.H* amb el contingut:

```
scalar velocity_material
(
```

```
readScalar(runTime.controlDict().lookup("velocity_solid"))
);
```

Aquest fitxer el que fa és anar a buscar el valor de la variable *velocity_solid* dintre del fitxer *controlDict*, i guarda aquest valor com a una variable de tipus escalar que s'anomena *velocity_material* i que s'utilitza posteriorment a la resolució del cas.

2. En l'annex.A es descriuen amb més detall les modificacions que s'han fet al codi original. A mode de resum, a cada iteració s'actualitza la posició dels elements que conformen el domini sòlid, segons la velocitat que se li ha assignat dintre del diccionari *controlDict* (només es considera el moviment en una sola coordenada).

Descripció de les condicions de contorn dels dominis

La simulació s'ha definit en dues dimensions, per tant les cares frontals i posteriors de tots els dominis es defineixen amb la tipologia *empty*.

Domini aire

1. Entrada d'aire al domini, que s'assimila a un bufador que impulsa aire a una velocitat de 40m/s (s'ha considerat una distribució de velocitat uniforme a la sortida del bufador) i a una temperatura de 80°C .
2. Les parets que conformen la part superior del domini, tenen una velocitat de 0m/s (paret no lliscant) i es troben a una temperatura de 80°C .
3. Els laterals situats a la dreta i a l'esquerra del domini, són les obertures per les quals l'aire pot sortir del domini. Es defineixen amb la tipologia *zeroGradient*, ja que la seva temperatura i velocitat no tenen un valor fix. Les obertures laterals es defineixen amb una pressió fixa, igual a l'atmosfèrica.
4. La paret inferior és una interfície que limita amb el domini substrat, i permet l'intercanvi de calor entre els dos dominis. A aquesta paret se li aplica una velocitat igual a la velocitat d'avanç del substrat $U = (3.33, 0, 0)\text{m/s}$.



Figura 9.49.: Esquema de les condicions de contorn del domini aire

Domini substrat

1. La paret superior és una interfície amb el domini aire, i permet l'intercanvi de calor entre els dos dominis.
2. La paret inferior és una interfície amb el domini aire inferior, i permet l'intercanvi de calor entre els dos dominis.
3. Els laterals esquerra i dret del domini, s'han definit amb la tipologia *zeroGradient* ja que no tenen un valor fix.

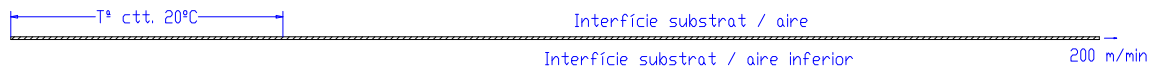


Figura 9.50.: Esquema de les condicions de contorn del domini substrat

Domini aire inferior

1. La paret superior és una interfície que limita amb el domini substrat, i permet l'intercanvi de calor entre els dos dominis. A aquesta paret se li aplica una velocitat igual a la velocitat d'avanç del substrat $U = (3.33, 0, 0)m/s$.
2. El lateral esquerre, és una entrada d'aire a una velocitat fixada $U = (0.5, 0, 0)m/s$, i a una temperatura fixa de 20°C.
3. El lateral dret es defineix com una sortida de fluid del domini.
4. La base del domini es defineix amb una temperatura fixada de 20°C, i a una velocitat de tipologia *zeroGradient*.

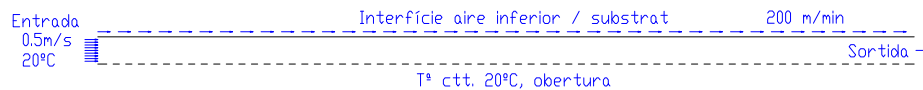


Figura 9.51.: Esquema de les condicions de contorn del domini aire inferior

Diagrama de blocs representatiu del procés de resolució

A la fig. 9.52 es descriu detalladament el procés emprat per a la resolució del cas:

1. Es parteix d'unes condicions inicials tals com les de la fig. 9.48. Cal notar que hi ha una part corresponent al domini de tipus sòlid que no està en contacte amb cap altre domini (a l'inici de la simulació sobresurt una longitud de 100mm a l'extrem esquerre). El motiu pel qual es planteja la resolució del problema d'aquesta manera és perquè sempre hi ha d'haver material de tipus sòlid que mantingui les condicions inicials de temperatura (20°C) constants al llarg del temps abans d'entrar en contacte amb els altres dos dominis de tipus fluid.
2. Es comença a iterar la simulació a partir de les condicions inicials.
3. Quan el domini de tipus sòlid s'ha mogut una distància parcial de 0.6mm aleshores s'atura la simulació. Durant aquest breu interval de temps que es permet resoldre el cas abans d'aturar-lo, és mínima l'escalfor que es transmet cap al material que resta sobresortint al costat esquerre.
4. Una vegada aturada la simulació, s'ha de mirar quina és la quantitat de domini sòlid que queda al costat esquerre, ja que s'ha d'evitar que es pugui arribar a un punt de l'execució de la simulació on no resti material sòlid entre els dos dominis de tipus fluid. Si la distància recorreguda en total (suma dels diversos parcials de 0.6mm) és menor als 100mm , aleshores el que es fa és tornar a imposar que la part esquerra de material que sobresurt tingui una temperatura de 20°C (tot i que com s'ha dit abans la temperatura no hauria variat de manera massa apreciable, és preferible aplicar aquesta condició per assegurar que el material sempre estigui entrant a la mateixa temperatura). Aquesta imposició de condicions es fa a partir de la utilitat *setFields* que permet imposar uns valors a unes determinades cel·les.
5. Tot seguit es torna a iterar, partint en aquest cas de l'últim resultat que s'ha guardat i editat.
6. Si una vegada s'ha arribat al pas número 3, i queda molt poc material a la banda esquerra (voldria dir que el material s'ha desplaçat aproximadament uns 100mm en total), aleshores el que cal fer és desplaçar de nou tot el substrat de tipus sòlid fins a la posició que es mostra a la fig. 9.48, iniciar la seva temperatura a 20°C , i a través de la instrucció *setFields* enviar les temperatures de la última iteració abans de moure la malla, a la nova malla una vegada ja moguda.
7. Es torna a imposar a través de la instrucció *setFields* que el material que sobresurt estigui a una temperatura de 20°C .
8. Tot seguit es torna a iterar, partint en aquest cas de l'últim resultat que s'ha guardat i editat.
9. Si una vegada s'ha aturat la simulació després d'avançar 0.6mm i es comprova amb el post-procés que hi ha molt poca variació de resultats per més que es

continüï avançant amb la simulació, el que es fa és aturar les iteracions i donar la simulació per finalitzada.

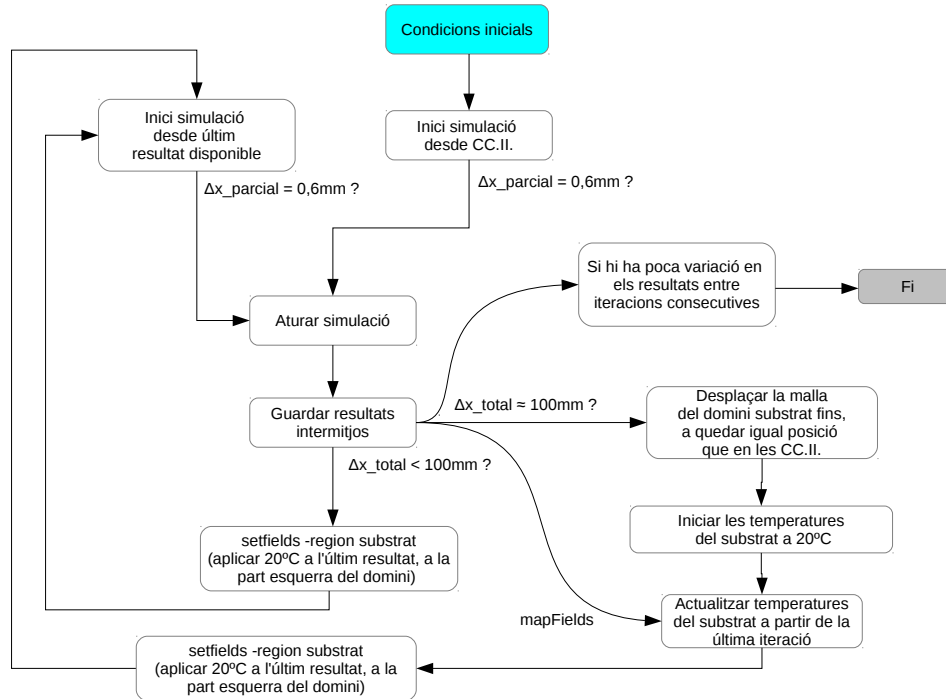


Figura 9.52.: Passes que s'han seguit en la resolució del cas

Post-processat de la simulació amb *OpenFOAM®*

Una vegada s'ha finalitzat la resolució del cas (es considera que s'ha arribat a la solució final quan hi ha un equilibri a la temperatura a la superfície del substrat, és a dir, que ja no evoluciona per més que es continüï iterant), es calcula quina és la transferència de calor per convecció a la interfície entre el domini superior i el substrat, i també entre la interfície inferior i el substrat. El software retorna la calor transmesa expressant el resultat amb les unitats ($kg/s^3 = W/m^2$). A partir d'aquests resultats es pot calcular quin és el coeficient de transferència de calor per convecció a cadascuna de les dues interfícies.

a) Càlcul del coeficient de transferència de calor per convecció entre el domini d'aire superior i el substrat:

$$h_{superior} = \frac{q}{T - T_{jet}} \quad (9.23)$$

$h_{superior}$ coeficient de transferència de calor a la cara superior del substrat (W/m^2K)

q calor transferida a la interfície entre el domini aire superior i el domini substrat (W/m^2)

T temperatura a la interfície (K)

T_{jet} temperatura a la qual surt l'aire del bufador ($80^\circ C$ en la simulació analitzada) (K)

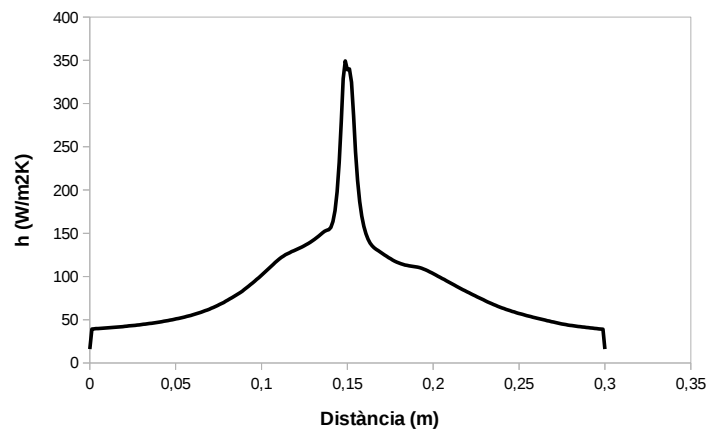


Figura 9.53.: Coeficient de transferència de calor entre els dos dominis (aire i substrat)

Si es pren un valor mitjà en tot el recorregut, $\bar{h}_{superior} = 89 W/m^2K$

A la fig. 9.53 s'ha de destacar que si es traça una vertical a una distància de $0,15m$, i es centre l'atenció en l'àrea que queda a sota la corba, es pot veure com l'àrea del costat esquerre és major que no pas l'àrea del costat dret. Aquest efecte és degut a la velocitat que porta el propi material que està en continu moviment a sota del bufador i en aquest cas es movia cap a la dreta. La component de velocitat cap a la dreta del material contraresta una petita part de la component de velocitat que adopta l'aire una vegada ha sortit del bufador i col·lisiona contra el material que es vol escalfar (una vegada l'aire ha xocat contra el substrat una part es dirigeix cap a l'esquerra i una altra part es dirigeix cap a la dreta).

b) Càlcul del coeficient de transferència de calor per convecció entre el domini d'aire inferior i el substrat:

$$h_{inferior} = \frac{q}{T - T_{\infty}} \quad (9.24)$$

$h_{inferior}$ coeficient de transferència de calor a la cara inferior del substrat (W/m^2K)

q calor transferida a la interfície entre el domini aire inferior i el domini substrat (W/m^2)

T temperatura a la interfície (K)

T_{∞} temperatura a la que entra l'aire pel lateral esquerre, al domini inferior ($20^{\circ}C$ en la simulació analitzada) (K)

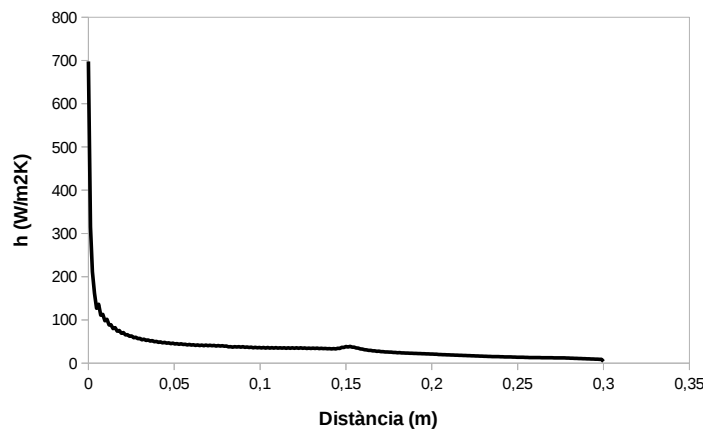


Figura 9.54.: Coeficient de transferència de calor entre els dos dominis (aire inferior i substrat)

$$\bar{h}_{inferior} = 37.54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Els valors instantanis i mitjans de $h_{superior}$ i $h_{inferior}$ són els valors que s'utilitzaran amb el codi generat amb *QtOctave®* per comprovar l'ajustament entre els dos procediments.

Codi generat amb *QtOctave®*

La comprovació de resultats, es fa via dos procediments. El primer d'ells consisteix en utilitzar els valors instantanis del coeficient de transferència de calor per convecció, és a dir, el valor del coeficient per a cada distància respecte de l'origen on el substrat entra en contacte amb els dos dominis de tipus fluid. El segon procediment es basa en la utilització dels valors mitjans dels coeficients de transferència de calor enlloc dels valors instantanis.

Utilitzant coeficients instantanis

El primer pas que s'ha fet és realitzar un ajustament polinòmic de les dades instantànies dels coeficients de transferència de calor per convecció a la cara inferior i a la cara superior, mostrats a la fig. 9.53 i a la fig. 9.54. Aquests seran paràmetres d'entrada per a fer el càlcul amb *QtOctave*®.

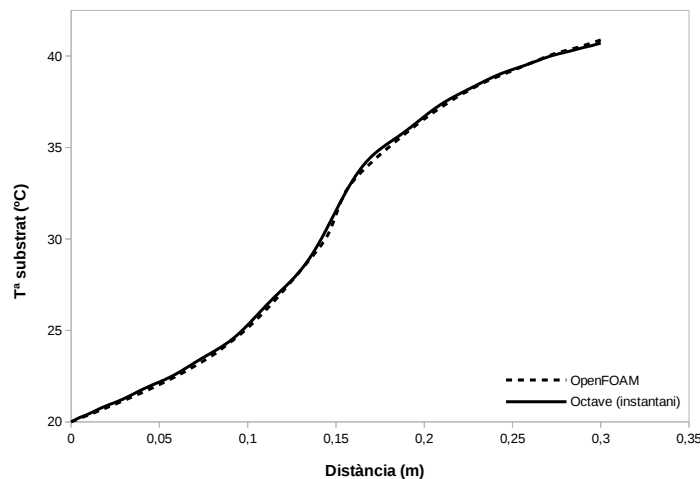


Figura 9.55.: Representació de la temperatura del substrat a mesura que es sotmet a l'acció d'un bufador, en funció de la distància recorreguda. Els valors mostrats a la figura es corresponen amb les temperatures al centre del material sòlid. Comparativa entre els valors simulats amb *OpenFOAM*® i els valors extrets del codi que s'ha generat amb *QtOctave*®.

A partir de la figura anterior es pot comprovar com l'evolució de temperatura del substrat que s'ha modelat amb *QtOctave*® captura un comportament molt similar al que prediu *OpenFOAM*®, ja que s'aprecien unes diferències mínimes entre ells. Les diferències entre ambdós resultats poden venir provocades en part per l'ajustament polinòmic que s'ha fet, ja que no ha estat possible ajustar la corba tant com s'hauria desitjat; no obstant, els resultats obtinguts són molt encoratjadors.

A la gràfica s'aprecia un canvi de pendent a les temperatures just en el punt central on hi ha situat el bufador. La gràfica té un pendent major a la zona prèvia al bufador, i després aquest pendent va baixant després d'haver estat en contacte amb el jet d'aire. Aquest comportament es pot explicar gràcies a la diferència d'àrea que hi ha a la fig. 9.53 (no hi ha la mateixa àrea sota la gràfica al costat esquerre, que al costat dret).

Utilitzant el valor mitjà

S'ha considerat interessant estudiar si s'obtenia una diferència apreciable en els resultats si es feia el càlcul de la evolució de temperatura del substrat tot utilitzant el valor mitjà del coeficient de transferència de calor tant a la banda superior com a la inferior del substrat. El fet de treballar amb el valor mitjà enlloc de valors instantanis fa més fàcil la resolució del cas perquè així es pot evitar l'ajust polinomial que cal fer al valor del coeficient.

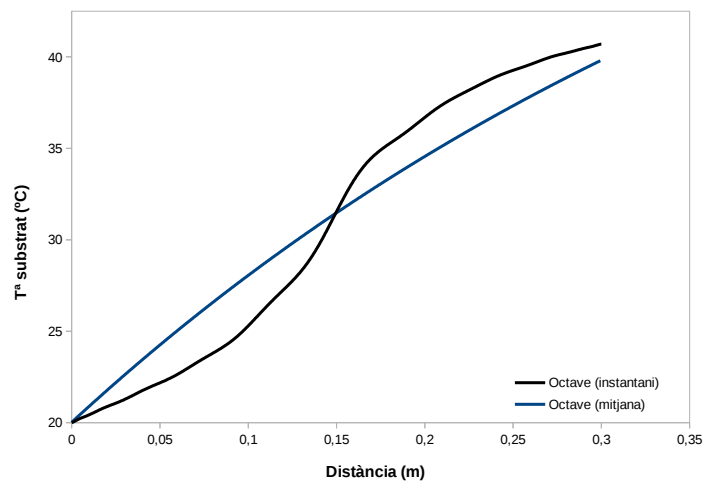


Figura 9.56.: Representació de la temperatura del substrat a mesura que es sotmet a l'acció d'un bufador, en funció de la distància recorreguda. Els valors mostrats a la figura es corresponen amb les temperatures al centre del material sòlid. Comparativa utilitzant valors mitjans i valors instantanis del coeficient de transferència de calor per convecció.

De la figura superior es desprèn que si bé la temperatura final que s'assoleix amb els dos procediments és gairebé la mateixa, si que hi ha una lleugera diferència de temperatures entre ambdós procediments, al llarg de tot el recorregut que fa el material.

Es considera que la distribució de temperatures agafant el coeficient mitjà és una aproximació suficientment bona com per a poder fer els càlculs de la capacitat d'evaporació en funció del coeficient de transferència de calor per convecció.

Comparativa substrat estàtic / en moviment a l'hora de determinar $h_{superior}$ i $h_{inferior}$ mitjançant simulació amb OpenFOAM®

En els paràgrafs anteriors s'ha estudiat l'evolució del coeficient de transferència de calor per convecció a la cara superior i a la cara inferior del material, i també la distribució de temperatura que experimenta el substrat al passar sota l'acció del bufador. L'execució del cas amb *OpenFOAM®* ha estat molt laboriosa i ha consumit molt de temps ja que algunes accions que s'havien de fer de manera iterativa calia fer-les manualment cada cert temps.

En aquest apartat s'estudia si realment és necessari implementar o no el moviment del substrat tot utilitzant el nou solucionador *chtMultiRegionFoam_movingSolid* que s'ha generat, a l'hora de quantificar els coeficients de transferència de calor per convecció a la cara superior i inferior del substrat.

Descripció de les modificacions fetes en els dominis

L'esquema del cas que s'ha analitzat es mostra a continuació:

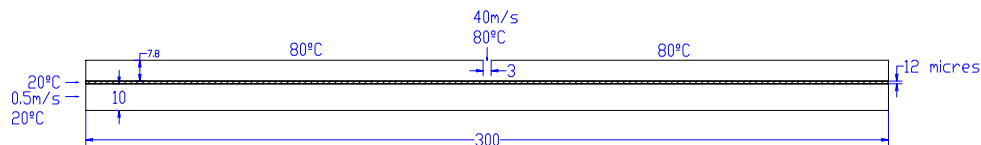


Figura 9.57.: Dominis emprats per la simulació amb *OpenFoam®*, mides en mm

El domini aire es manté igual que en el cas anterior.



Figura 9.58.: Esquema de les condicions de contorn del domini aire

Com es pot veure a la fig. 9.59, s'ha eliminat el sobrant de material que sobresortia de l'extrem esquerre. A més a més, s'ha imposat una temperatura constant en el lateral esquerre de 20°C. En aquest cas, el material no es desplaça al llarg del temps, a diferència del cas anterior.

9.8 Validació teòrica dels resultats obtinguts amb *OpenFOAM*® d'un substrat en moviment sota l'acció d'un jet d'aire

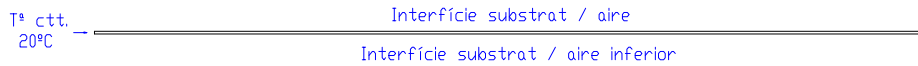


Figura 9.59.: Esquema de les condicions de contorn del domini substrat

El domini aire inferior també es manté igual que en el cas anterior.

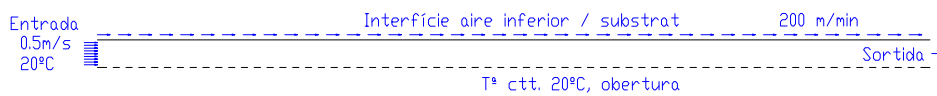


Figura 9.60.: Esquema de les condicions de contorn del domini aire inferior

Com es pot veure a la fig. 9.58, fig. 9.59 i fig. 9.60, el cas és en definitiva exactament el mateix que es mostra a la fig. 9.48, excepte algunes modificacions que es llisten a continuació:

- El substrat té la mateixa longitud que els dominis aire i aire inferior
- El substrat manté la seva posició al llarg del temps (no hi ha moviment relatiu entre els diversos dominis)
- Per tal de reproduir la condició de contorn que implicava que el material (longitud de material sobresortint a la banda esquerra, en el cas de substrat en moviment) es mantingués a una temperatura constant de 20°C, el que es fa és definir una condició de contorn al lateral esquerre del substrat que manté també una temperatura constant igual a 20°C.
- La simulació es fa en estat estacionari enlloc de transitori

-Coeficient de transferència de calor per convecció entre l'aire superior i el substrat:

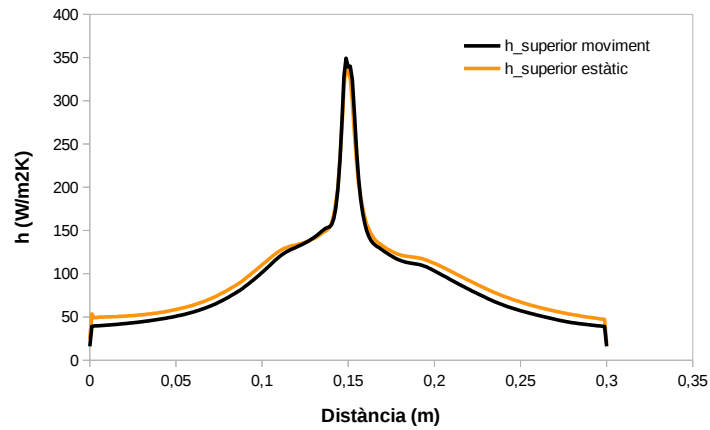


Figura 9.61.: Coeficient de transferència de calor entre els dos dominis (aire i substrat)

$$\bar{h}_{superior} = 96 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-Coeficient de transferència de calor entre l'aire inferior i el substrat:

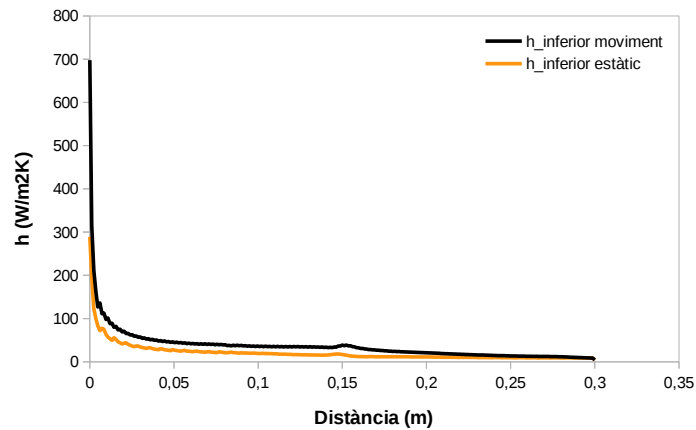


Figura 9.62.: Coeficient de transferència de calor entre els dos dominis (aire inferior i substrat)

$$\bar{h}_{inferior} = 20.94 \text{ W/m}^2\text{K}$$

9.8 Validació teòrica dels resultats obtinguts amb *OpenFOAM*® d'un substrat en moviment sota l'acció d'un jet d'aire

-Temperatura en el punt mig del mallat del substrat, ambdues temperatures obtingudes mitjançant *OpenFOAM*®:

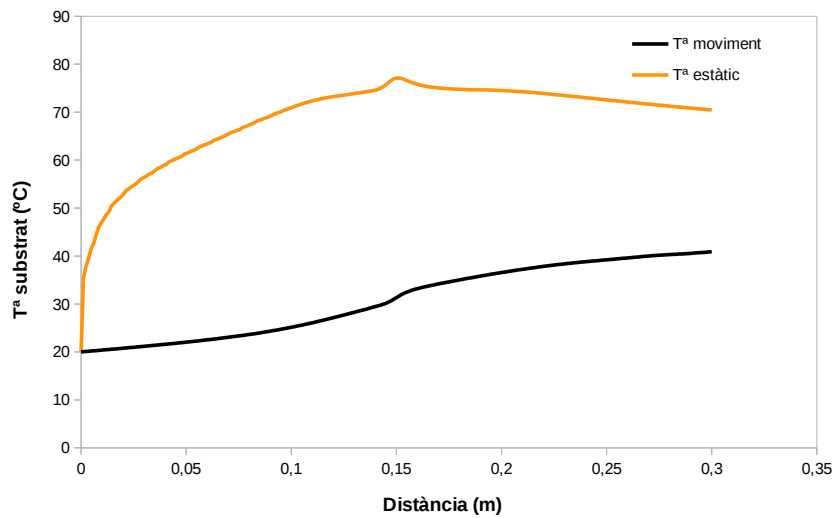


Figura 9.63.: Temperatura al centre del substrat, considerant el substrat estàtic o bé en moviment (resultats obtinguts amb *OpenFOAM*®)

-Distribució de temperatures del material, calculades amb *QtOctave*®, a partir dels coeficients de transferència de calor per convecció:

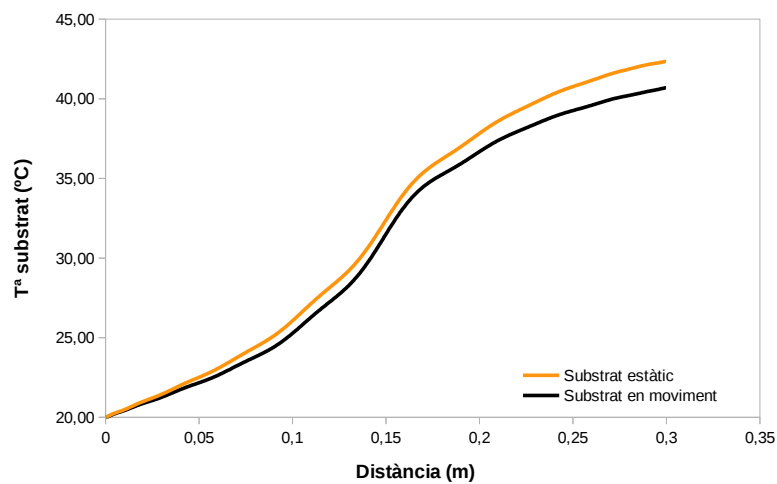


Figura 9.64.: Temperatura calculada per el centre del substrat, considerant un ajustament polinòmic del coeficient de transferència de calor per convecció

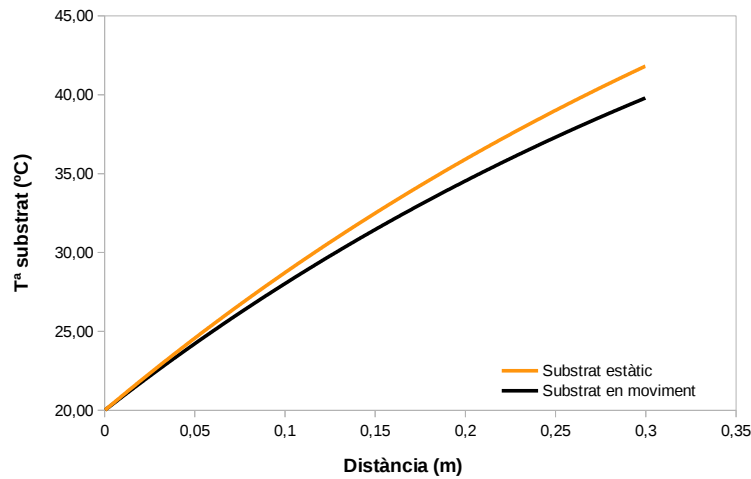


Figura 9.65.: Temperatura calculada al centre del substrat, considerant el valor mig del coeficient de transferència de calor per convecció

T^a final	$h_{instantani}$	h_{mig}
Substrat en moviment	40.7°C	39.7°C
Substrat estàtic	42.3°C	41.8°C
Diferència	3.9%	5.3%

Taula 9.8.: Temperatures assolides per el substrat (considerant que està en moviment o bé estàtic), calculades amb QtOctave®, a partir de les dades del coeficient de transferència de calor per convecció obtingudes per simulació amb OpenOAM®.

A partir dels resultats de la taula. 9.8 no s'aprecia una diferència important a l'hora de calcular la temperatura que assolix un substrat quan passa sota els efectes d'un bufador, segons si es consideren els valors de transferència de calor per convecció mitjans o instantanis, així com si es té en compte o no el moviment del substrat sota les condicions de treball analitzades.

10. Conclusions globals i treballs futurs

En aquest apartat es fa un recull des d'un punt de vista global de les conclusions globals a les quals s'ha arribat en aquesta tesi, i es proposen també una sèrie de treballs futurs a realitzar.

Com a conclusions globals, es destaquen els següents apartats:

1. Capítol 3, Emissions de solvents:

- En aquest capítol s'ha generat un model matemàtic del circuit d'assecatge (no de la capacitat d'assecatge) de la impressora flexogràfica que s'ha implementat a través d'una fulla de càlcul, l'objectiu del qual és quantificar les emissions de solvents que produeix la màquina sota unes determinades condicions de treball que depenen tant de la configuració del propi treball com de les característiques del circuit d'aire que intervé en l'assecat. El model permet visualitzar la interrelació entre els diversos paràmetres que defineixen el circuit d'aire d'assecat (com per exemple cabals, temperatures i recirculacions). Aquestes dades d'emissió de dissolvents poden ésser utilitzades posteriorment com a una primera aproximació per al dimensionament i selecció de l'element *RTO* que ha de tractar els gasos contaminants de la impressora.

- Els resultats que proporciona el model aporten una diferència respecte dels resultats experimentals de l'ordre d'un 30% en mitjana malgrat la gran quantitat de simplificacions i suposicions que s'han hagut de considerar. És per aquest motiu que s'aconsella que aquesta eina sigui utilitzada com a una eina purament estimativa fins que no es faci una caracterització més acurada dels diversos paràmetres que intervenen en el procés d'assecat (com per exemple, introduir al model la capacitat d'assecatge de les pantalles en funció de la seva disposició geomètrica i característiques de l'aire utilitzat per a l'assecat, l'afectació del nivell de *LEL* contingut en l'aire en la capacitat d'evaporació de dissolvent).

2. Capítol 5, Optimització pantalles assecatge del cos impressor:

- Es caracteritza experimentalment el comportament de diverses pantalles

d'assecatge entre tinters que es fabriquen en l'actualitat, i d'aquesta anàlisi se n'extreuen els punts dèbils de la pantalla que cal millor, que són la uniformització de velocitats i temperatures al llarg del llavi de la pantalla, així com millorar-ne el balanç. Les dades experimentals recopilades en aquest punt serveixen alhora per comprovar i ajustar la modelització que es fa de les pantalles amb el software de simulació CFD de codi lliure OpenFOAM.

- Es centra l'optimització de les pantalles d'assecatge entorn el model de pantalla que s'instal·la actualment a la màquina "M4". El comportament d'aquesta pantalla es marca com a referència o punt de partida, i els resultats obtinguts per els nous prototips es comparen amb aquesta pantalla.

Es realitza un estudi paramètric per tal de caracteritzar com afecten les dimensions del caixó d'impulsió, així com el diàmetre de la boca d'impulsió de la pantalla, en l'estabilitat en la velocitat de sortida al llarg de tot el llavi de la pantalla.

A partir de les conclusions de l'estudi paramètric es realitza un primer prototip del caixó d'impulsió de la pantalla (seguint el principi de funcionament de les pantalles d'assecatge actuals) el qual ja millora el comportament de la pantalla actual "M4", però es considera que encara hi ha marge de millora i es continua amb l'evolució del disseny.

Es realitza un altre prototip del caixó d'impulsió a través de desenvolupar un nou principi de funcionament, i amb aquest nou disseny s'aconsegueix una gran estabilitat en la distribució de velocitats i una notable millora en la distribució de temperatura en el llavi de la pantalla en comparació al disseny inicial de la "M4".

- Una vegada finalitzat la part de la pantalla corresponent a la impulsió, es continua desenvolupant el disseny global de la pantalla centrant l'atenció en el comportament de la part corresponent a l'aspiració. Amb el nou disseny s'aconsegueix reduir el balanç de la pantalla a valors experimentals propers al " $B_{prototip} \%$ " (el balanç de la pantalla "M4" tenia un balanç inicial d'un " $B_{M4} \%$ ").

- Es procedeix a estudiar l'industrialització de la pantalla per a poder ésser instal·lada a una màquina en producció a les instal·lacions de Comexi. Actualment les pantalles es troben en fase de validació definitiva abans d'ésser implementades en sèrie.

3. Capítol 6, Estudi de la transferència de calor per convecció d'un bufador:

- Degut a la falta de dades experimentals disponibles a la bibliografia que s'ajustin a les característiques de funcionament de les pantalles d'assecatge que instal·len les impressores flexogràfiques de Comexi, es procedeix a fer un

estudi paramètric del coeficient de transferència de calor per convecció d'un bufador d'una pantalla sota múltiples configuracions de treball. Aquest estudi es porta a terme a través de simulació CFD, també amb el software OpenFOAM; per a la validació del model, es comparen resultats experimentals recollits a la bibliografia amb el resultats extrets de simulació.

- Mitjançant simulació amb OpenFOAM es procedeix a estudiar com afecten al valor del coeficient de transferència de calor per convecció, la variació en els paràmetres de la pantalla com per exemple l'obertura del llavi, la separació llavi-substrat, la velocitat del fluid a la sortida del llavi, la temperatura d'assecat i el moviment del substrat. A partir d'aquest conjunt de casos es poden extreure unes recomanacions a l'hora de dissenyar un nou llavi de majors prestacions que l'actual. Variant la configuració actual del llavi, és possible assolir un major coeficient de transferència de calor per convecció, tot mantenint el cabal impulsat per la pantalla.

- Es fa una breu estudi per estudiar si les configuracions de dos o tres llavis aporten avantatges respecte de la configuració actual d'un llavi.

4. Capítol 7, Validació del coeficient de transferència de calor per convecció:

- A partir d'un muntatge experimental, i del model matemàtic que es proposa en el capítol 9, es valida experimentalment el valor del coeficient de transferència de calor per convecció obtingut mitjançant simulació CFD OpenFOAM per a la disposició constructiva del llavi actual de la pantalla "M4". S'assoleix un molt bon ajustament de resultats entre les dades experimentals i els valors calculats de manera teòrica.

5. Capítol 9, Càlcul de la capacitat d'evaporació d'un jet d'aire:

- Es genera un model matemàtic, que permet valorar la capacitat d'assecatge d'un bufador de ranura en funció dels diversos paràmetres de treball d'una impressora flexogràfica, com per exemple: les propietats del material substrat que s'imprimeix, les propietats de la tinta, les propietats de l'aire utilitzat en l'assecatge, el valor del coeficient de transferència de calor per convecció determinat en el capítol 6 i la velocitat d'impressió.

Tal i com s'ha dit en el paràgraf anterior, s'ha trobat una aproximació molt bona entre els resultats experimentals i els resultats proporcionats per el model matemàtic.

Com a futurs treballs es considera remarcar els següents punts:

1. Fer un estudi del valor que pren el coeficient de transferència de calor per convecció per una pantalla d'assecatge situada en el túnel d'assecat, de la mateixa manera que s'ha fet amb les pantalles del cos impressor, sota diverses condicions de treball i sota diverses configuracions geomètriques.
2. Una vegada determinat el coeficient \bar{h} de l'apartat número 1, caldria validar aquest coeficient que s'ha obtingut a partir de les simulacions, amb mesures experimentals en el túnel. L'estudi es podria fer per exemple mesurant la temperatura a diversos punts del substrat en moviment quan passa sota els efectes del bufador o pantalla.
3. Una vegada superada l'etapa de validació del coeficient de transferència, caldria preparar una bateria de treballs d'impressió amb l'objectiu de determinar la validesa del modelat matemàtic de la capacitat d'assecatge en el túnel, per a diverses configuracions de treball de la màquina (com per exemple velocitat de treball, gruix del substrat, temperatura, quantitat de tinta aportada).
4. Millorar el model matemàtic que s'ha fet de la capacitat d'assecatge, per tal de que pugui comptabilitzar l'assecat de tintes que continguin més d'un dissolvent en la seva formulació (recordar que el model només permet treballar amb un únic solvent).
5. Millorar la pèrdua de càrrega de la pantalla d'assecatge entre tinters, per tal de que el ventilador hagi de proporcionar menys pressió i per tant necessiti una menor potència d'accionament.
6. Fer un estudi del comportament de les pantalles del túnel, i optimitzar-ne la geometria de manera similar al que s'ha fet en el cos impressor.
7. Redissenyar el túnel d'assecat, per tal de garantir un assecat uniforme en tota l'amplada del material imprès, i estudiar la manera de com portar a terme l'aspiració de manera més efectiva sense que provoqui moviments en el material.
8. Millorar la disposició dels conductes d'aire a la màquina, de manera que s'evitin pèrdues de calor, i s'abaixin les pèrdues de càrrega del sistema (col·lector d'impulsió i aspiració, circuit d'impulsió, circuit d'aspiració).
9. Potenciar les pantalles d'assecatge entre tinters, per tal d'obtenir una velocitat en el llavi més gran per així poder imprimir treballs més exigents en assecat, a una major velocitat d'impressió.
10. Adaptar la fulla de càlcul que permet fer una estimació de les emissions d'una màquina, de manera que tinguin en compte que no tot el solvent que s'aplica a la banda impresa s'aconsegueix evaporar.

A. Solucionador `chtMultiRegionFoam_movingSolid`

En aquest annex es detallen les noves instruccions que s'han implementat per a adaptar el solucionador `chtMultiRegionFoam` tenint en compte el desplaçament del material en la direcció de les coordenades 'x'.

```

/*-----*/
=====
\\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      /  O peration  |
\\      /  A nd        | Copyright (C) 2011-2013 OpenFOAM Foundation
\\      /  M anipulation|
-----*/

License
  This file is part of OpenFOAM.

  OpenFOAM is free software: you can redistribute it and/or modify it
  under the terms of the GNU General Public License as published by
  the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
  (at your option) any later version.

  OpenFOAM is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT
  ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or
  FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License
  for more details.

  You should have received a copy of the GNU General Public License
  along with OpenFOAM. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.

Application
  chtMultiRegionFoam

Description
  Combination of heatConductionFoam and buoyantFoam for conjugate heat
  transfer between solid regions and fluid regions. Both regions include
  the fvOptions framework.

  It handles secondary fluid or solid circuits which can be coupled
  thermally with the main fluid region. i.e radiators, etc.

/*-----*/

#include "fvCFD.H"
#include "rhoThermo.H"
#include "turbulenceModel.H"
#include "fixedGradientFvPatchFields.H"
#include "regionProperties.H"
#include "compressibleCourantNo.H"
#include "solidRegionDiffNo.H"
#include "solidThermo.H"
#include "radiationModel.H"
#include "fvIOoptionList.H"
#include "coordinateSystem.H"
#include "fixedFluxPressureFvPatchScalarField.H"

// * * * * *

int main(int argc, char *argv[])
{
    #include "setRootCase.H"
    #include "createTime.H"

    regionProperties rp(runTime);

    #include "createFluidMeshes.H"
    #include "createSolidMeshes.H"

    #include "createFluidFields.H"
    #include "createSolidFields.H"

    #include "initContinuityErrs.H"
    #include "readTimeControls.H"
    #include "readSolidTimeControls.H"

    #include "compressibleMultiRegionCourantNo.H"
    #include "solidRegionDiffusionNo.H"
    #include "setInitialMultiRegionDeltaT.H"

    while (runTime.run())
    {

```

```

#include "read_velocity_solid.H" // Modificat (llegeix la velocitat dintre del diccionari
controldict)

#include "readTimeControls.H"
#include "readSolidTimeControls.H"
#include "readPIMPLEControls.H"

#include "compressibleMultiRegionCourantNo.H"
#include "solidRegionDiffusionNo.H"
#include "setMultiRegionDeltaT.H"

runTime++;

Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;

if (nOuterCorr != 1)
{
    forAll(fluidRegions, i)
    {
        #include "setRegionFluidFields.H"
        #include "storeOldFluidFields.H"
    }
}

// --- PIMPLE loop
for (int oCorr=0; oCorr<nOuterCorr; oCorr++)
{
    bool finalIter = oCorr == nOuterCorr-1;

    forAll(fluidRegions, i)
    {
        Info<< "\nSolving for fluid region "
            << fluidRegions[i].name() << endl;
        #include "setRegionFluidFields.H"
        #include "readFluidMultiRegionPIMPLEControls.H"
        #include "solveFluid.H"
    }

    forAll(solidRegions, i)
    {
        Info<< "\nSolving for solid region "
            << solidRegions[i].name() << endl;
        #include "setRegionSolidFields.H"
        #include "readSolidMultiRegionPIMPLEControls.H"
        #include "solveSolid.H"
    }

    scalar temps = (readScalar(runTime.controlDict().lookup("deltaT"))); // Modificat
    (llegeix el valor de la variable deltaT, que és l'espai temporal entre iteracions consecutives, situat
    dintre del diccionari controDict, i desa el valor com a una nova variable anomenada temps)

    scalar desplaçament = temps*velocity_material; // Modificat (el
    desplaçament és igual a la multiplicació del temps que es deixa entre iteracions consecutives i la
    velocitat del material)

    vector deltaC; // Modificat (es
    genera un vector que contindrà la distància que s'han de moure a cada iteració, els elements que
    componen el domini sòlid)

    deltaC.x() = desplaçament; // Modificat
    (desplaçament en la component x)
    deltaC.y() = 0; // Modificat
    (desplaçament en la component y)
    deltaC.z() = 0; // Modificat
    (desplaçament en la component z)

    vectorField delCentroid(mesh.points().size(), deltaC); // Modificat
    forAll(mesh.points(),i); // Modificat
    { // Modificat
        Info << "mesh.points() " << mesh.points()[i] << nl << endl; // Modificat
    } // Modificat

    vectorField newPoints = mesh.points() + delCentroid; // Modificat
    mesh.movePoints(newPoints); // Modificat
}

```

```
(s'actualitza la nova posició de cada cel·la del domini sòlid, a partir de la posició que tenien les cel·les en la iteració anterior, i s'hi suma l'increment en la direcció x que s'ha calculat a partir de la velocitat del sòlid i l'espai temporal entre iteracions consecutives).
```

```
    }  
  }  
  runTime.write();  
  Info<< "ExecutionTime = " << runTime.elapsedCpuTime() << " s"  
    << "   ClockTime = " << runTime.elapsedClockTime() << " s"  
    << nl << endl;  
}  
Info<< "End\n" << endl;  
return 0;  
}  
  
// ***** //
```

B. Rutines per a QtOctave, per al càlcul de l'evaporació (cos impressor)

Pàgina intencionadament en blanc 1 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 2 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 3 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 4 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 5 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 6 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 7 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 8 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 9 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 10 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 11 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 12 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 13 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 14 de 15

Pàgina intencionadament en blanc 15 de 15

C. Rutines per a QtOctave, per al càlcul de l'evaporació (túnel)

Pàgina intencionadament en blanc 1 de 6

Pàgina intencionadament en blanc 2 de 6

Pàgina intencionadament en blanc 3 de 6

Pàgina intencionadament en blanc 4 de 6

Pàgina intencionadament en blanc 5 de 6

Pàgina intencionadament en blanc 1 de 6

Les subrutines que s'executen en aquest codi són les mateixes que s'han definit en el cos impressor; és per aquest motiu que no s'han repetit.

**D. Configuració de les simulacions
amb OpenFOAM corresponents a
l'estudi de les pantalles
d'assecatge entre tinters**

En aquest capítol es fa un recorregut a través dels diversos diccionaris que s'han utilitzat per a la configuració i definició dels casos (els que es consideren més rellevants), passant des de la definició de les condicions de contorn, la definició de les propietats del fluid així com dels models de turbulència que s'apliquen al model, la selecció dels esquemes de discretització que s'han utilitzat per a la modelització de les equacions diferencials, els paràmetres de control que s'han aplicat a l'hora de resoldre el cas, i finalment també es fa un recorregut en la definició i el refinament del mallat de la geometria a estudiar.

S'ha separat la informació en dos apartats; el primer d'ells, fa referència a la part de la pantalla corresponent a la impulsió, i el segon apartat s'ha dedicat a la part corresponent a l'aspiració de la pantalla (actuant de manera conjunta la impulsió i l'aspiració).

D.1. Estudi de la part corresponent a la impulsió

D.1.1. Condicions de contorn

La nomenclatura de les condicions de contorn es defineix a la fig. D.2, i es poden resumir a continuació:

- La condició de contorn anomenada impulsió, a través de la qual s'introdueix aire a la pantalla.
- Per a la realització d'aquestes simulacions, s'aplica la condició que el llavi de la pantalla aboca l'aire directament a l'atmosfera, per tant, a la condició de contorn anomenada sortida, se li aplica una pressió igual a l'atmosfèrica.
- Les parts que defineixen l'envolupant de la pantalla es consideren com a parets.

U:

```

dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField uniform (0.0 0.0 0.0);
boundaryField
{
    impulsio
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform ("Vinlet m/s" 0 0);
        //type           flowRateInletVelocity;
        //volumetricFlowRate "VFRimpulsio m3/s";
        //value          uniform ("Vinlet m/s" 0 0);
    }

    sortida
    {

```



```

        type          zeroGradient;
    }

    parets
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform (0 0 0);
    }
}

```

p:

```

dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    impulsio
    {
        type          zeroGradient;
        value         uniform 0;
    }

    sortida
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform 0;
    }

    parets
    {
        type          zeroGradient;
        value         uniform 0;
    }
}

```

k:

```

dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 0.062;
boundaryField
{
    impulsio
    {
        type          turbulentIntensityKineticEnergyInlet;
        intensity     0.02;
        value         uniform 0.62;
    }
}

```

```
    sortida
    {
        type          zeroGradient;
    }

    parets
    {
        type          kqRWallFunction;
        value         uniform 1e-10;
    }
}
```

epsilon:

```
dimensions [0 2 -3 0 0 0];
internalField uniform 1.434;
boundaryField
{
    impulsio
    {
        type          turbulentMixingLengthDissipationRateInlet;
        mixingLength  "l";
        value         uniform 14.34;
    }

    sortida
    {
        type          zeroGradient;
    }

    parets
    {
        type          epsilonWallFunction;
        value         uniform 1e-10;
    }
}
```

nut:

```
dimensions [0 2 -1 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    impulsio
    {
```

```

        type          calculated;
        value         uniform 1e-10;
    }

    sortida
    {
        type          calculated;
        value         uniform 1e-10;
    }

    parets
    {
        type          nutkWallFunction;
        value         uniform 1e-10;
    }
}

```

D.1.2. Propietats del fluid i turbulència

transportProperties

En aquest diccionari s'especifica la viscositat cinemàtica del fluid ν , i si es tracta d'un fluid Newtonià o no Newtonià. En aquest cas, el fluid que circula per les pantalles és aire, i es pren un comportament Newtonià.

```

transportModel      newtonian;
nu                  nu [0 2 -1 0 0 0 0] 15.89e-6;

```

turbulenceProperties

Es defineix el tipus de modelització de turbulència que es farà en la simulació. Es pot escollir entre diverses modelitzacions: *laminar* (no s'activen els models de turbulència), *RAS* o *LES*.

```

simulationType      RASmodel;

```

RASProperties

S'escolleix el model de turbulència utilitzat en les simulacions.

```
RASModel          kEpsilon;
turbulence         on;
printCoeffs       on;
```

D.1.3. Discretització

Una vegada es disposa del mallat del volum total del fluid que es desitja analitzar (discretització del domini en volums finits), s'integra l'equació diferencial a resoldre en cadascun dels volums de control en què s'ha dividit el volum total; d'aquesta manera, s'aconsegueix una discretització de l'equació diferencial que regeix el problema.

A mesura que es redueix el la mida de les cel·les en què s'ha fet la discretització del domini total, s'aconsegueix que el resultat obtingut amb aquesta discretització s'aproximi de manera més precisa a la solució del model matemàtic de les equacions diferencials.

fvSchemes

En aquest diccionari, s'especifica al software com ha de fer la discretització en l'espai (en cadascun dels volums de control) i en el temps, de les equacions que governen el cas que es desitja estudiar.

Per tal de seleccionar l'estratègia de discretització, es segueixen les recomanacions proposades per el curs d'OpenFOAM al qual s'ha assistit durant la realització del doctorat [30], en combinació amb els tutorials de què disposa el software de simulació proporcionats en el moment de la instal·lació.

```
ddtSchemes
{
    default          steadyState;
}

gradSchemes
{
    default          cellMDLimited Gauss linear 0.5;
    grad(U)         cellMDLimited Gauss linear 0.5;
}

divSchemes
{
    div(phi,U)      bounded Gauss upwind;
    div(phi,k)      bounded Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) bounded Gauss upwind;
    div((nuEff*dev(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

```

```
laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear limited 0.5;
}
```

```
interpolationSchemes
{
    default      linear;
}
```

```
snGradSchemes
{
    default      limited 0.5;
}
```

```
fluxRequired
{
    default      no;
    p;
}
```

Els esquemes de discretització anteriors presenten l'avantatge que són estables numèricament, però per contra, la precisió obtinguda en els resultats no és la òptima a la que es podria arribar (els esquemes presents a l'apartat *divSchemes* són majoritàriament de primer ordre).

Segons s'ha recollit a la bibliografia, [30], els esquemes de primer ordre s'aconsella utilitzar-los per aconseguir una primera solució aproximada al problema que es desitja estudiar (ja que aporten una major estabilitat numèrica a l'hora de realitzar els càlculs) i posteriorment, es proposa realitzar el canvi a esquemes de segon ordre (tot partint dels resultats obtinguts amb els esquemes de primer ordre) per tal d'aconseguir uns resultats més acurats.

Per tal d'ajustar la discretització a uns esquemes de segon ordre, es proposa realitzar el canvi en el diccionari *fvSchemes* segons es mostra a continuació:

```
ddtSchemes
{
    default      steadyState;
}
```

```
gradSchemes
{
    default      cellMDLimited Gauss linear 1;
    grad(U)      cellMDLimited Gauss linear 1;
}
```

```
divSchemes
{
    div(phi,U)   bounded Gauss linearUpwind grad(U);
}
```

```

        div(phi,k)          bounded Gauss upwind;
        div(phi,epsilon)    bounded Gauss upwind;
        div((nuEff*dev(T(grad(U))))    Gauss linear;
    }

    laplacianSchemes
    {
        default            Gauss linear corrected;
    }

    interpolationSchemes
    {
        default            linear;
    }

    snGradSchemes
    {
        default            corrected;
    }

    fluxRequired
    {
        default            no;
        p;
    }
    
```

Amb aquesta discretització no s'ha aconseguit establir els residuals de la simulació al mateix nivell que l'aconseguit en el cas anterior, i ha estat més costós en quant de temps de simulació de cares a arribar a la solució final.

Tot seguit en l'apartat , es compara per a un mateix cas, la diferència de resultats obtinguts amb la primera discretització o bé amb la segona.

fvSolution

Una vegada es disposa de la discretització del model, cal indicar al software com es portarà a terme la solució del sistema matricial d'equacions; aquesta informació s'engloba dintre del diccionari *fvSolution*.

Per a la selecció dels paràmetres d'aquest diccionari s'han pres com a referència els utilitzats en els diversos tutorials disponibles del software de simulació, i també segons les recomanacions proposades a la referència [30].

```

    solvers
    {
        p
        {
            solver          GAMG;
            tolerance       1e-06;
            relTol          0.1;
        }
    }
    
```

```

        smoother      GaussSeidel;
        nPreSweeps    0;
        nPostSweeps   2;
        cacheAgglomeration    on;
        agglomerator    faceAreaPair;
        nCellsInCoarsestLevel    10;
        mergeLevels     1;
    }

    "(U|k|epsilon)"
    {
        solver      smoothSolver;
        smoother     symGaussSeidel;
        tolerance    1e-05;
        relTol       0.1;
    }
}

SIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors    2;
    pRefCell      0;
    pRefValue     0;

    residualControl
    {
        p      1e-05;
        U      1e-05;
        "(k|epsilon)"    1e-05;
    }
}

relaxationFactors
{
    fields
    {
        p      0.3;
    }
}

    equations
    {
        U      0.5;
        k      0.5;
        epsilon    0.5;
    }
}

```

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"

D.1.4. Paràmetres de control

controlDict

En aquest fitxer s'especifiquen tota aquella sèrie de paràmetres que regeixen l'execució del cas, com per exemple el nombre màxim d'iteracions, el tipus de "solver" que s'utilitza per a la resolució del cas, o cada quantes iteracions consecutives es guardaran resultats intermedis.

```
application          simpleFoam;
startFrom            latestTime;
stopAt              endTime;
endTime             2000;
deltaT              1;
writeControl         timeStep;
writeInterval       250;
purgeWrite          4;
writeFormat         ascii;
writePrecision      6;
writeCompression    off;
timeFormat          general;
timePrecision       6;
runTimeModifiable  true;
```

D.1.5. Definició i refinament del mallat

El mallat s'ha creat a partir de la combinació dels diccionaris *blockMeshDict* i *snappyHexMeshDict*. El primer diccionari, *blockMeshDict*, genera una malla hexaèdrica totalment estructurada que serà la malla base sobre la qual es procedirà posteriorment a refinar el mallat a través de les indicacions del diccionari *snappyHexMeshDict*. Tot i que seria possible realitzar el mallat utilitzant només el diccionari *blockMeshDict*, es descarta aquesta opció ja que per a geometries complexes, com la del cas que es desitja estudiar, complica enormement la generació de la malla; així doncs, la discretització de la geometria s'acaba de modelar a través de *snappyHexMeshDict*. Pel que fa a la generació de la geometria, s'ha fet a través d'un software, també de codi lliure, anomenat *Salome*. La geometria que es genera amb aquest programari s'exporta en format *.stl* i aquesta informació (amb les corresponents zones definides on s'aplicaran les condicions de contorn) es llegeix i es treballa amb el diccionari *snappyHexMeshDict*. Tot i que aquest programari CAD també permet generar un mallat que posteriorment pot ésser convertit a un format compatible a OpenFOAM i ésser utilitzat per a la simulació CFD, s'ha descartat aquesta opció, ja que el mallat tetraèdric que s'obté presenta més dificultats a l'hora de convergir. És aquest el principal motiu pel qual es decideix generar el mallat del cas a través de les eines que incorpora el software de simulació OpenFOAM.

La malla final que s'obté és predominantment hexaèdrica, i es poden aconseguir diversos nivells de refinament de malla a través del diccionari *snappyHexMeshDict*, definint per exemple, zones tridimensionals delimitades per un cilindre o per un caixó rectangular. També és possible generar refinaments de malla superficials en les zones de la geometria que s'han definit quan s'ha importat l'arxiu en format *.stl*. La definició de la tipologia de cadascuna de les zones en què s'ha separat la geometria (com per exemple *wall*, *patch*, *symmetry*), també s'edita en el diccionari *snappyHexMeshDict*.

D.1.5.1. Dimensions globals del domini

a) Per tal d'ajudar a la convergència del model, s'ha optat per allunyar la condició de contorn corresponent a l'entrada de fluid a la pantalla (superfície anomenada *impulsio* segons es pot veure a la fig. D.2) a una distància aproximada de dues vegades el diàmetre de la boca d'impulsió de la pantalla.

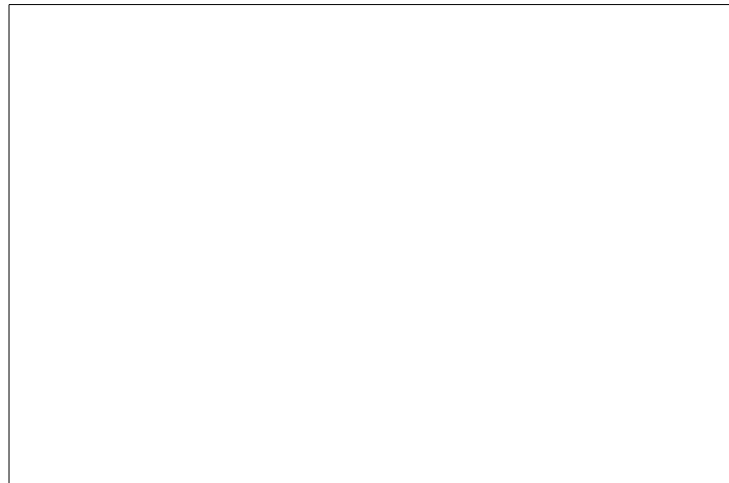


Figura D.2.: Condicions de contorn aplicades al model

b) La sortida del domini en vertical s'ha allunyat respecte de la sortida del llavi de la pantalla (en la direcció del vector de color verd de la fig. D.2, però en sentit contrari) a una distància de 5 vegades el diàmetre de la boca d'impulsió de la pantalla.

c) L'extensió lateral del domini respecte de l'eix de simetria de la pantalla, s'ha considerat igual a 2.5 vegades el diàmetre de la boca d'impulsió de la pantalla (1.25 vegades al diàmetre a cada banda, en la direcció del vector de color groc de la fig. D.2).

D.1.5.2. Comparativa refinament de mallat

En aquest apartat es justifica que el nivell de refinament de malla que s'ha emprat per a realitzar el nou disseny de la part de la pantalla d'assecatge entre tinters, corresponent a la part dedicada a la impulsió, ha estat suficientment acurat.

Per fer-ho, es compara la mateixa geometria (corresponent al disseny definitiu anomenat "*segon prototip*" en la memòria), amb dos nivells de mallat, segons es resumeix a la taula taula.D.1. En ambdós casos, el mallat està format bàsicament per elements hexaèdrics (en percentatges de l'ordre del 90%), tot i que també conté altres tipologies d'elements com prismes, tetràedres i políedres.

<i>Segon prototip</i>	Model 1	Model 2
Nombre de cel·les	6.305.116	11.365.031
hexàedres (%)	90	95

Taula D.1.: Valors del refinament de mallat ("*segon prototip*")

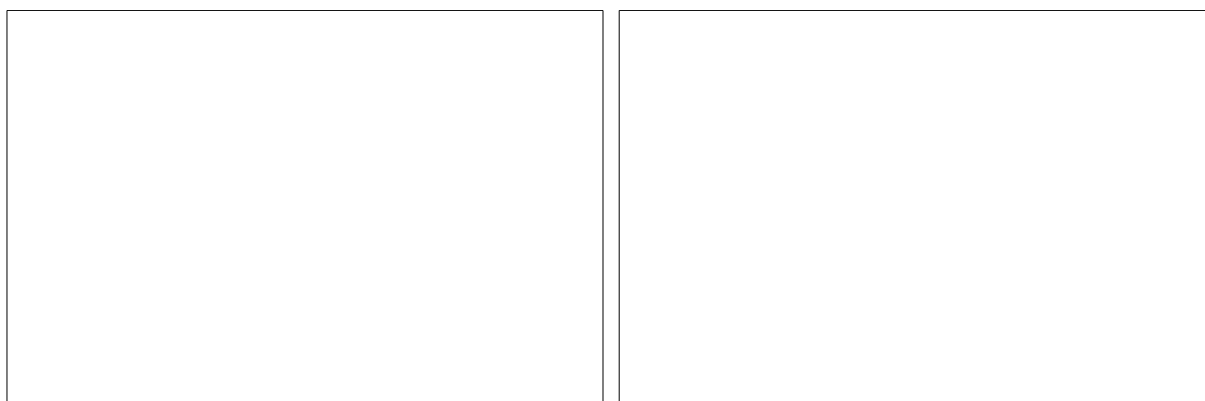


Figura D.3.: Vista general del mallat en una secció transversal - esquerra model 1, dreta model 2

A la fig. D.3 es mostra una secció transversal del model analitzat on el model 2 presenta les següents modificacions respecte del model 1:

- La malla de base generada amb el diccionari blockMeshDict, és més densa en el model 2 que en el model 1 (80.960 cel · les enfront 43.160 cel · les respectivament), fig. D.3.
- En el model 2 s'ha fet un refinament superficial a la cambra interna de la pantalla sobre el qual s'han soldat els tubs guia, fig. D.4.
- En el model 2 s'ha definit una zona de refinament delimitada per una regió cilíndrica situada en la zona dels tubs guia, fig. D.6, fig. D.7 i fig. D.8.
- El mallat a la zona del llavi de la pantalla (ranura de " $W = a\text{ mm}$ " que efectua les funcions de llavi), en el model 1 té un total de 6 cel · les, en canvi el mallat del model 2 s'ha augmentat el nombre de cel · les fins a un total de 10 cel · les, fig. D.5.

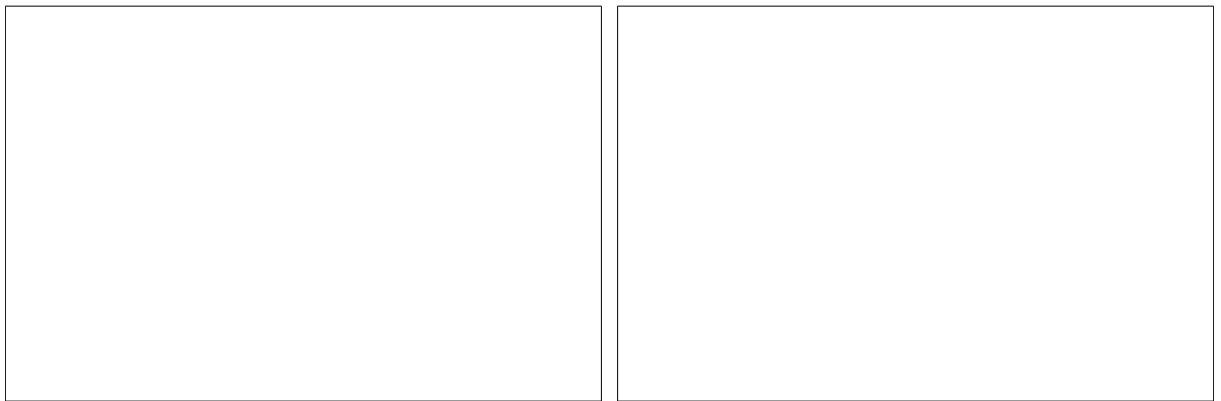


Figura D.4.: Vista detallada del mallat en una secció transversal (zona pantalla)
- esquerra model 1, dreta model 2

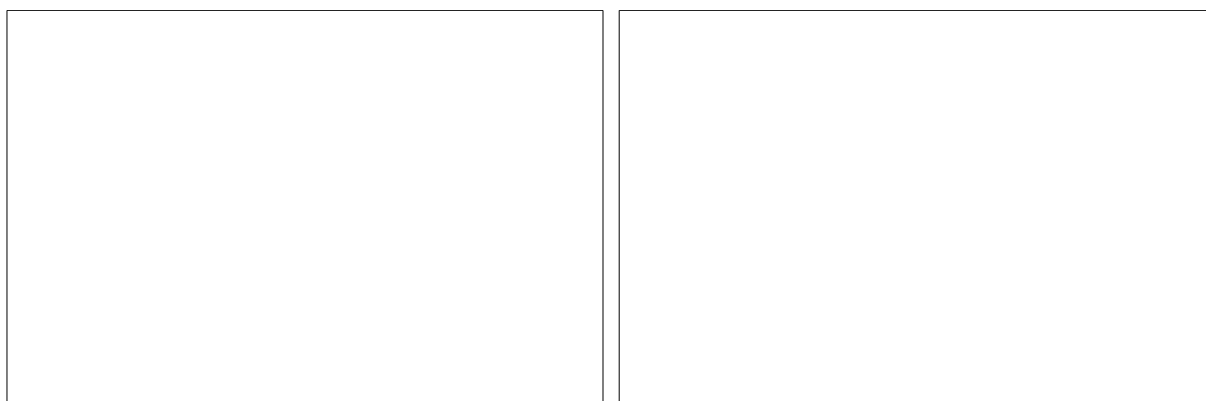


Figura D.5.: Vista detallada del mallat en una secció transversal (zona llavi / deflectors) - esquerra model 1, dreta model 2

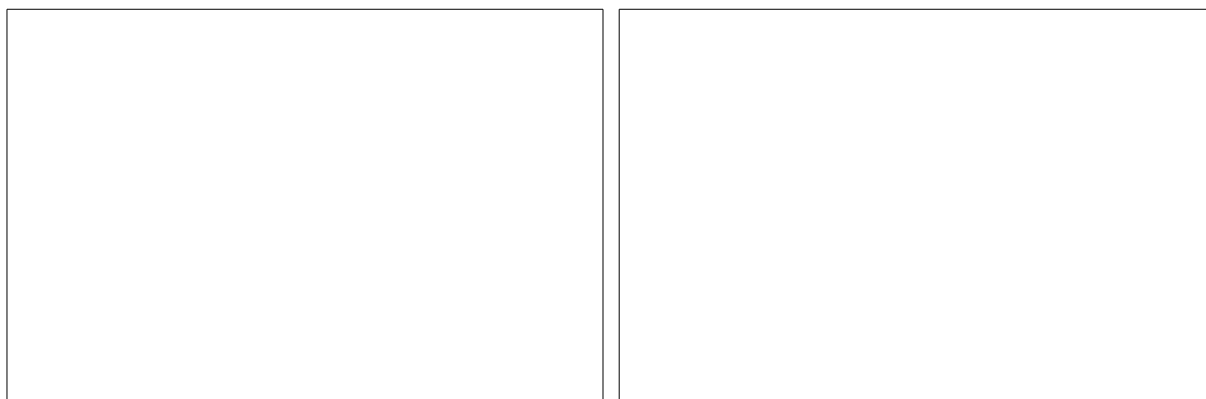


Figura D.6.: Vista detallada del mallat en una secció transversal (zona tubs guia) - esquerra model 1, dreta model 2



Figura D.7.: Vista general del mallat en una secció longitudinal - model 1



Figura D.8.: Vista general del mallat en una secció longitudinal - model 2

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"

D.2. Estudi de la pantalla sencera (impulsió + aspiració)

Respecte del cas anterior, la configuració és pràcticament idèntica; però ara cal tenir en compte que les condicions de contorn han variat al tractar-se d'una geometria diferent. La definició de les condicions de contorn es pot visualitzar a la fig. D.10 i fig. D.11.

Per no fer la descripció de tot el conjunt de diccionaris, i tornar a mostrar alguns d'ells de manera repetitiva, només es mostra la configuració corresponent a la definició de les condicions de contorn adaptades a la nova geometria.

La condició de contorn anomenada tambor, simula la curvatura del tambor central de la impressora flexogràfica.

D.2.1. Condicions de contorn

Les condicions de contorn quan s'estudia la pantalla completa, són les mateixes que s'han aplicat en l'estudi de la part corresponent a la impulsió, però ha estat necessari definir dues condicions de contorn addicionals:

- L'aspiració que és la part de la pantalla encarregada d'aspirar tot l'aire que s'ha impulsat.
- El tambor, que és una paret que exerceix les funcions de tambor central de contrapressió; es tracta de la paret sobre la qual impacta l'aire que surt a través del llavi de la pantalla.

U:

```
dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField uniform (0.0 0.0 0.0);
boundaryField
{
    impulsio
    {
        type          flowRateInletVelocity;
        volumetricFlowRate    "VFRimpulsió m3/s";
        value          uniform ("Vinlet m/s" 0 0);
    }

    aspiracio
    {
        type          flowRateInletVelocity;
        volumetricFlowRate    "VFRaspiració m3/s";
        value          uniform ("Voutlet m/s" 0 0);
    }
}
```



```

    sortida
    {
        type          zeroGradient;
    }

    parets
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform (0 0 0);
    }

    tambor
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform (0 0 0);
    }
}

```

p:

```

dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    impulsio
    {
        type          zeroGradient;
        value         uniform 0;
    }

    aspiracio
    {
        type          zeroGradient;
        value         uniform 0;
    }

    sortida
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform 0;
    }

    parets
    {
        type          zeroGradient;
        value         uniform 0;
    }
}

```

```
tambor
{
    type          zeroGradient;
    value         uniform 0;
}
}
```

k:

```
dimensions [0 2 -2 0 0 0];
internalField uniform 0.062;
boundaryField
{
    impulsio
    {
        type          turbulentIntensityKineticEnergyInlet;
        intensity     0.02;
        value         uniform 0.62;
    }

    aspiracio
    {
        type          zeroGradient;
    }

    sortida
    {
        type          zeroGradient;
    }

    parets
    {
        type          kqRWallFunction;
        value         uniform 1e-10;
    }

    tambor
    {
        type          kqRWallFunction;
        value         uniform 1e-10;
    }
}
```

epsilon:

```
dimensions [0 2 -3 0 0 0];
internalField uniform 1.434;
```

```

boundaryField
{
    impulsio
    {
        type            turbulentMixingLengthDissipationRateInlet;
        mixingLength    "l";
        value            uniform 14.34;
    }

    aspiracio
    {
        type            zeroGradient;
    }

    sortida
    {
        type            zeroGradient;
    }

    parets
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value            uniform 1e-10;
    }

    tambor
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value            uniform 1e-10;
    }
}

```

nut:

```

dimensions [0 2 -1 0 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    impulsio
    {
        type            calculated;
        value            uniform 1e-10;
    }

    aspiracio
    {
        type            calculated;
        value            uniform 1e-10;
    }
}

```

```
sortida
{
    type          calculated;
    value         uniform 1e-10;
}
```

```
parets
{
    type          nutkWallFunction;
    value         uniform 1e-10;
}
```

```
tambor
{
    type          nutkWallFunction;
    value         uniform 1e-10;
}
```

```
}
```



Figura D.10.: Condicions de contorn aplicades al model, tall transversal

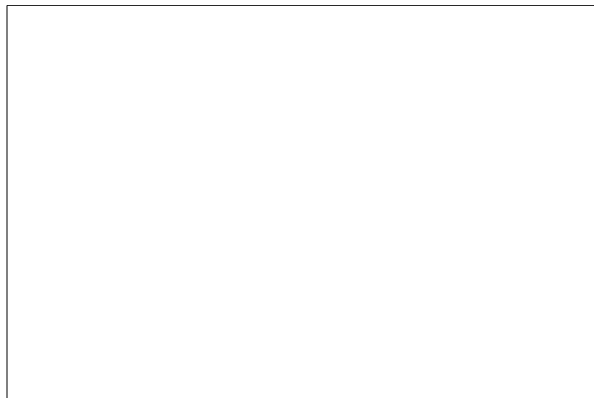


Figura D.11.: Condicions de contorn aplicades al model, tall longitudinal

D.2.2. Mallat del model

Per a l'estudi de la part corresponent a la impulsió i aspiració actuant conjuntament, es poden diferenciar dos casos.

- Un d'ells ha consistit en simplificar el cas tot eliminant la part corresponent a la impulsió que està representada a la fig. D.10 i fig. D.11 i imposant la condició d'entrada just a la sortida del llavi enlloc d'analitzar el comportament del fluid des

de la boca d'impulsió fins a la sortida del llavi. Aplicant aquesta simplificació s'ha aconseguit rebaixar molt el nombre de cel·les del cas, que tot i fent aquesta simplificació oscil·lava entre 10 i 13 milions aproximadament.

- Una altra modelització consisteix en fer un anàlisi tenint en compte tot el global de la pantalla completant tot el circuit que va des de la boca d'impulsió fins a la boca d'aspiració. En aquest cas la geometria analitzada és exactament la que es mostra a la fig. D.10 i fig. D.11. En aquest cas el nombre de cel·les ha arribat a 28 milions d'elements. Tot seguit es mostren exemples del mallat del cas per al cas en què s'ha analitzat la impulsió i l'aspiració conjuntament.

Aquesta modelització tenint en compte tot el conjunt, s'ha aplicat una vegada la primera modelització (eliminació de part de la geometria corresponent a la impulsió) ha aportat un resultat de comportament satisfactori. S'ha optat per procedir d'aquesta manera ja que el nombre de cel·les s'eleva de manera substancial, segons es pot veure a la taula. D.4, i conseqüentment el temps de resolució del cas.

Tal i com es mostra a les fig. D.12, fig. D.13 i fig. D.14, s'ha fet un refinament a la zona del tambor; un refinament de doble nivell, essent més dens en la zona més pròxima a la superfície del tambor, així com també en el llavi de la pantalla.

També s'ha fet un refinament en els orificis superiors de la part corresponent a l'aspiració, i a la zona dels tubs guia situats a la cambra d'impulsió.

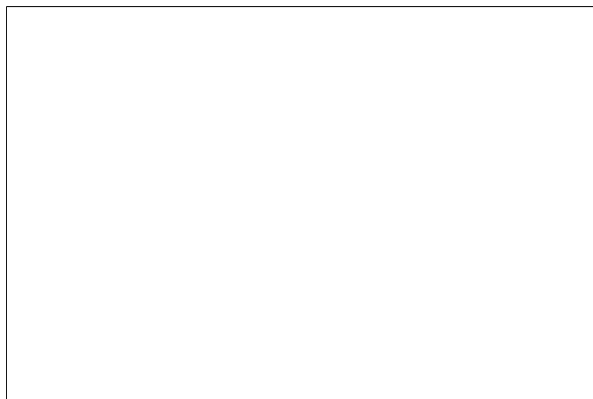


Figura D.12.: Tall transversal de la geometria analitzada

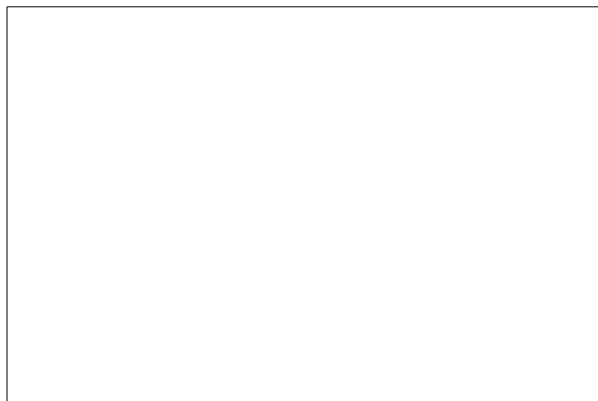


Figura D.13.: Detall de mallat en la secció transversal de la geometria analitzada

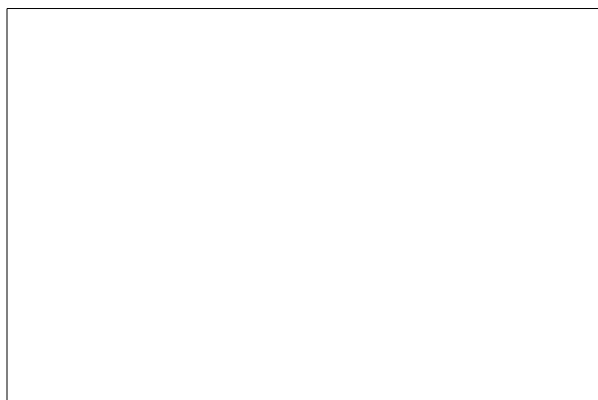


Figura D.14.: Detall de mallat en la secció longitudinal de la geometria analitzada

D.3. Taula resum de mallat i hores de càlcul

En aquest punt es presenta de manera resumida i aproximada el nombre de simulacions que s'han fet de cada tipus, amb el nombre de cel·les de les diverses tipologies de càlculs, i el temps dedicat a les diverses simulacions.

Estudi impulsió	Nombre de simulacions	Nombre de cel·les	Temps per simulació (h)
Estudi paramètric	50	$4 \cdot 10^6$	4
Estudi prototip 1	8	$4 \cdot 10^6$	4
Estudi prototip 2	15	$6,3 \cdot 10^6$	6

Taula D.3.: Nombre de cel·les i temps de càlcul orientatiu per al disseny de la part corresponent a la impulsió

Estudi aspiració	Nombre de simulacions	Nombre de cel·les	Temps per simulació (h)
Model simplificat	52	$12 \cdot 10^6$	10
Model sencer	3	$28 \cdot 10^6$	16

Taula D.4.: Nombre de cel·les i temps de càlcul orientatiu per al disseny de la part corresponent a la aspiració

A la taula. D.3 i taula. D.4 només s'ha tingut en compte el temps que s'ha destinat a la resolució del cas. No s'ha tingut en compte el temps que s'ha dedicat a generar la geometria ni el mallat de la mateixa.

Tampoc s'ha tingut en compte les hores d'aprenentatge del funcionament del propi software de simulació *OpenFOAM* ni les hores dedicades a l'aprenentatge del software per a la generació de les geometries *Salome*.

D.4. Característiques generals de l'estació de treball

A continuació, a la fig. D.15, es presenten aquelles dades més rellevants de l'estació de treball que s'ha utilitzat per a la realització de simulacions amb OpenFOAM.

- **WORKSTATION SIE LADON® INTEL BROADWELL 14 C**

- Procesador Xeon Broadwell E5-2690 V4 a 2,6 GHz catorce (28 procesos), 35 MB de caché y 9,6 GT/s. 135 W TDP máximo
- Placa single Gigabyte MW50-SV0 con 8 bancos de memoria, Tarjeta de sonido 7.1 Realtek® ALC887 controller, 3 PCI-E 3.0 x16, 1 PCI, 3 tarjetas de Red 1000 (Gigabit)
- 2 tarjetas GPU NVidia GTX 1080, 8 GB RAM GDDR5X, 2560 núcleos por tarjeta, consumo máximo 165 W, nueva generación Nvidia Pascal, 9 Tflops en simple precisión y 5 Tflops en doble
- Memoria 128 GB DDR4/2400 en 4 módulos de 32 GB ampliable a 512 GB
- Disco de 3 TB Enterprise Server ST3000NM0033, 7200 rpm 128 Mb de caché 6 Gb/s para sistema operativo y datos
- Disco SSD de 1 TB de Micron 1100 velocidad de escritura 83.000 IOPS y lectura 92.000 IOPS con interface SATA de 6 Gb/s para scratch
- Teclado y ratón USB

Caja Torre de bajo ruido con 28dB de sonido máximo. Con fuente de alimentación de 1200 W Gold certificada y bajo ruido (con capacidad para 8 discos internos). Disco duro extraíble para backup en la parte superior (opcional y disponible hasta 8 TB)

- Configurada como Máquina de Cálculo con UBUNTU 16.04 o Centos 7.2, CUDA 8



Figura D.15.: Dades de l'estació de treball utilitzada per els càlculs

E. Configuració de les simulacions amb OpenFOAM corresponents a l'estudi de la transferència de calor per convecció d'un bufador

E.1. Condicions de contorn

Tot el conjunt de simulacions compreses dintre del capítol dedicat a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció d'un bufador, segueixen un esquema com el que es mostra a la fig. E.1.

- Les parts que defineixen el domini es poden resumir segons es llista a continuació:
- Una entrada d'aire al domini amb unes condicions de velocitat i temperatura conegudes. Per a simplificar el càlcul s'ha considerat que les propietats del fluid (velocitat i temperatura) són uniformes en la condició de contorn considerada (entrada).
 - Les sortides del fluid, tenen lloc a través dels extrems laterals del domini, els quals es considera que es troben a pressió atmosfèrica. A aquestes sortides laterals, les condicions de velocitat i temperatura del fluid són desconegudes.
 - La part superior del domini s'assimila al llavi de la pantalla d'assecatge entre tinters, i per tant es defineix com a paret. A aquesta paret se li aplica una temperatura igual a la temperatura de l'aire quan flueix a través de l'entrada.
 - La part inferior del domini, reproduïx el tambor central de la impressora, que es troba a una temperatura que es considera constant (temperatura de regulació del tambor, fixada a " T_{tambor} °C"), i també s'ha modelat com a paret, de la mateixa manera com s'ha fet amb les parets superiors.
 - A la part frontal i posterior del domini, se li ha donat la condició "empty" al tractar-se de simulacions en dues dimensions (no es té en compte la profunditat del domini).

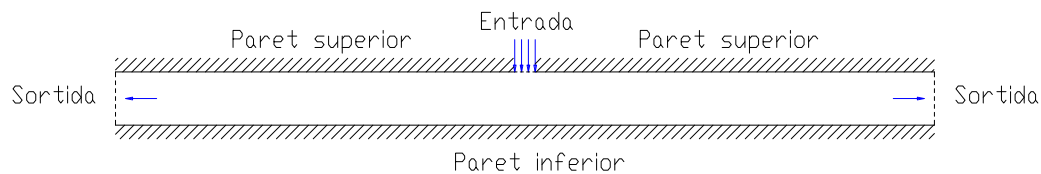


Figura E.1.: Condicions de contorn de la simulació

U:

```
dimensions [0 1 -1 0 0 0];
internalField uniform (0.0 0.0 0.0);
boundaryField
{
    entrada
    {
```

```

        type          fixedValue;
        value          uniform (0 -"Vjet m/s" 0);
        // Es considera una distribució de velocitat uniforme a la sortida del bufador
    }

    paret_superior
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform (0 0 0);
    }

    paret_inferior
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform (0 0 0);
    }

    sortida
    {
        type          zeroGradient;
    }

    davant_darrere
    {
        type          empty;    // Cas 2D
    }
}

```

T:

```

dimensions [0 0 0 1 0 0 0];
internalField uniform 300;
boundaryField
{
    entrada
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform Tjet;
    }

    paret_superior
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform Tjet;
        // Es considera que la paret superior (llavi d'alumini de la pantalla)
        // es troba a la mateixa temperatura que l'aire a la sortida del bufador
    }
}

```

```
    paret_inferior
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform  $T_{tambor}$ ;
        // La paret inferior representa el tambor central de la impressora
        // que es troba a una temperatura constant de  $T_{tambor}$ 
    }

    sortida
    {
        type            zeroGradient;
    }

    davant_darrere
    {
        type            empty;
    }
}
```

p_rgh:

```
dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField uniform 1e5;
boundaryField
{
    entrada
    {
        type            zeroGradient;
    }

    paret_superior
    {
        type            zeroGradient;
    }

    paret_inferior
    {
        type            zeroGradient;
    }

    sortida
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 100000;
    }

    davant_darrere
    {
```

```

        type      empty;
    }
}

```

p:

```

dimensions [0 2 -2 0 0 0];
internalField uniform 1e5;
boundaryField
{
    entrada
    {
        type      calculated;
        value     uniform 1e5;
    }

    paret_superior
    {
        type      calculated;
        value     uniform 1e5;
    }

    paret_inferior
    {
        type      calculated;
        value     uniform 1e5;
    }

    sortida
    {
        type      calculated;
        value     uniform 1e5;
    }

    davant_darrere
    {
        type      empty;
    }
}

```

k:

```

dimensions [0 2 -2 0 0 0];
internalField uniform 0.096;
boundaryField
{

```

```
    entrada
    {
        type            turbulentIntensityKineticEnergyInlet;
        intensity       0.02;
        value           uniform 0.96;
    }

    paret_superior
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 1e-10;
    }

    paret_inferior
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 1e-10;
    }

    sortida
    {
        type            zeroGradient;
    }

    davant_darrere
    {
        type            empty;
    }
}
```

epsilon:

```
dimensions [0 2 -3 0 0 0 0];
internalField uniform 57.2;
boundaryField
{
    entrada
    {
        type            turbulentMixingLengthDissipationRateInlet;
        mixingLength    "0,09 · W";
        value           uniform 572.43;
    }

    paret_superior
    {
        type            zeroGradient;
    }
}
```



```
    paret_inferior
    {
        type          zeroGradient;
    }

    sortida
    {
        type          zeroGradient;
    }

    davant_darrere
    {
        type          empty;
    }
}
```

nut:

```
dimensions [0 2 -1 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    entrada
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }

    paret_superior
    {
        type          nutLowReWallFunction;
        value         uniform 1e-10;
    }

    paret_inferior
    {
        type          nutLowReWallFunction;
        value         uniform 1e-10;
    }

    sortida
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }

    davant_darrere
    {
```

```
        type        empty;
    }
}
```

alphat:

```
dimensions [0 2 -1 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    entrada
    {
        type        calculated;
        value        uniform 0;
    }

    paret_superior
    {
        type        alphasW;
        value        uniform 1e-10;
    }

    paret_inferior
    {
        type        alphasW;
        value        uniform 1e-10;
    }

    sortida
    {
        type        calculated;
        value        uniform 0;
    }

    davant_darrere
    {
        type        empty;
    }
}
```

E.2. Propietats del fluid i turbulència

transportProperties

En aquest diccionari s'especifica la viscositat cinemàtica del fluid ν , el coeficient d'expansió tèrmica β , la temperatura de referència T_{ref} , el número de Prandtl i,

finalment, si es tracta d'un fluid Newtonià o no Newtonià. Per a la introducció de valors, s'ha considerat la temperatura mitjana entre la temperatura de l'aire a la sortida del bufador, i la temperatura de la superfície sobre la qual impacta el jet d'aire; les dades s'han recopilat a partir de la referència bibliogràfica [58].

```
transportModel      newtonian;
nu                  nu [0 2 -1 0 0 0 0]    1.8437e-5;
beta                beta [0 0 0 -1 0 0 0]   3.0474e-03;
TRef                TRef [0 0 0 1 0 0 0]    328;
Pr                  Pr [0 0 0 0 0 0 0]      0.70982;
Prt                 Prt [0 0 0 0 0 0 0]     0.9;
```

RASProperties

S'escolleix el model de turbulència utilitzat en les simulacions.

```
RASModel           LamBremhorstKE;
turbulence          on;
printCoeffs        on;
```

g

S'introdueix la gravetat en el model, i s'especifica la seva direcció.

```
dimensions          [0 1 -2 0 0 0 0];
value               ( 0 -9.81 0 );
```

E.3. Discretització

Els esquemes de discretització que s'han utilitzat per a la realització de les diverses simulacions per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, es llisten a continuació:

fvSchemes

Primer ordre (majoritàriament termes de primer ordre):

```

ddtSchemes
{
    default      steadyState;
}

gradSchemes
{
    default      cellMDLimited Gauss linear 1;
    grad(U)      cellMDLimited Gauss linear 1;
}

divSchemes
{
    default      none;
    div(phi,U)   Gauss upwind;
    div(phi,k)   Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) Gauss upwind;
    div((muEff*dev(T(grad(U)))))) Gauss linear;
    div(phi,T)   bounded Gauss linearUpwind default;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear limited 0.5;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      limited 0.5;
}

fluxRequired
{
    default      no;
    p_rgh;
}
    
```

Tot seguit s'estudia incrementar l'ordre de discretització d'alguns termes del diccionari *fvSchemes*, de la mateixa manera que s'ha fet en el disseny de les pantalles d'assecatge entre tinters, i comparar els resultats del coeficient de transferència de calor per convecció obtingut en els dos casos per determinar si la discretització que es presenta com a primera opció és suficient per a la obtenció de resultats.

El cas d'anàlisi amb el qual es fa la comparativa es correspon amb la configuració actual de les pantalles d'assecatge entre tinters i que es resumeix a continuació:

- Obertura del llavi, " $W = a \text{ mm}$ "
- Distància vertical de separació entre la sortida del llavi, i la superfície d'impacte, " $H = b \text{ mm}$ "
- L'aire surt a través del llavi a una velocitat de " $V_1 \text{ m/s}$ " i a una temperatura de " $T_1 \text{ }^\circ\text{C}$ "
- La superfície d'impacte es troba a una temperatura constant de " $T_{\text{tambor}} \text{ }^\circ\text{C}$ "

Segon ordre (introduir termes de segon ordre):

```
ddtSchemes
{
    default      steadyState;
}

gradSchemes
{
    default      cellMDLimited Gauss linear 0;
    grad(U)      cellMDLimited Gauss linear 1;
}

divSchemes
{
    default      none;
    div(phi,U)   Gauss linearUpwind grad(U);
    div(phi,k)   Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) Gauss upwind;
    div((nuEff*dev(T(grad(U)))) Gauss linear;
    div(phi,T)   bounded Gauss linearUpwind default;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear limited 1;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      limited 1;
}
```

```
}  
  
fluxRequired  
{  
    default    no;  
    p_rgh;  
}
```

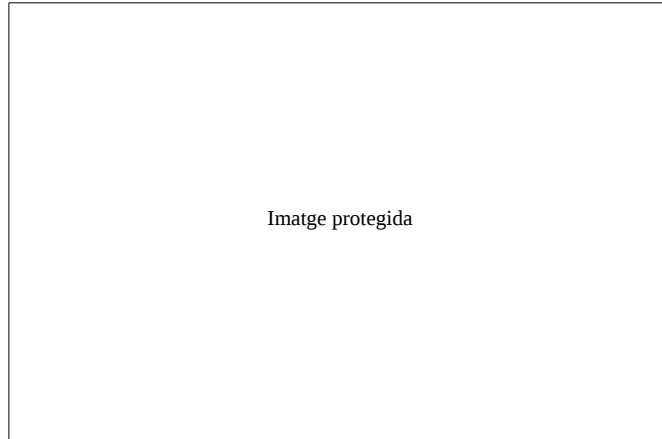


Figura E.2.: Distribució del nombre de Nusselt, per a la comparativa d'esquemes de discretització fvSchemes (primer ordre i segon ordre)

Pel que fa al valor del coeficient de transferència de calor per convecció que s'ha assolit amb les dues discretitzacions, a la fig. E.2 es pot veure com no hi ha diferències destacables amb els resultats obtinguts amb els dos esquemes; de fet, els resultats es resumeixen a la taula. E.1, i les diferències són mínimes.



Taula E.1.: Valor del coeficient de transferència de calor per convecció per a les dues discretitzacions del diccionari *fvSchemes*

La diferència entre ambdós resultats és de l'ordre de un 1%, per tant es considera adequada la utilització dels esquemes de primer ordre per a la realització de les simulacions.

fvSolution

Els paràmetres que s'han imposat en aquest diccionari estan basats en els valors que s'han recollit segons els tutorials de què disposa el propi software.

```

solvers
{
    p_rgh
    {
        solver      PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance    1e-08;
        relTol       0.01;
    }

    "(U|T|k|epsilon)"
    {
        solver      PBiCG;
        preconditioner  DILU;
        tolerance    1e-07;
        relTol       0.1;
    }
}

SIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors      3;
    pRefCell      0;
    pRefValue     0;

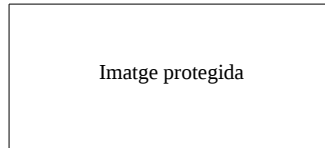
    residualControl
    {
        p_rgh      1e-08;
        U          1e-08;
        T          1e-08;
        "(k|epsilon)"      1e-08;
    }
}

relaxationFactors
{
    fields
    {
        p_rgh      0.3;
    }

    equations
    {
        U          0.3;
        T          0.3;
        "(k|epsilon)"      0.3;
    }
}

```

"Pàgina deixada intencionadament en blanc"



Taula E.2.: Rang de valors de les variables que defineixen les dimensions generals per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció

E.5.2. Dades generals del mallat (1 llavi amb confinament)

El mallat que s'ha utilitzat en les simulacions té les mateixes característiques que el mallat que s'ha utilitzat a l'hora de validar les dades aportades per l'estudi de Adriaan R.P. van Heiningen [6], que han estat recopilades per A. Oliva i altres [4]. Les dades referents a la malla, i seguint la nomenclatura de la fig. 6.8, es mostren a continuació:

	div_a	div_ab	div_bc	div_cd	div_e	div_f
Núm. de cel · les	24	100	175	175	60	60
	a	b	c	d	e	f
Longitud (mm)	$W/2$	13,5	60	150	$H/2$	$H/2$
	grad_a	grad_b	grad_c	grad_d	grad_e	grad_f
Gradient	1	3	2	1	40	0,025

Taula E.3.: Paràmetres definitoris del mallat en l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció

Si s'utilitzen aquests paràmetres de malla, s'obté una malla formada 100% per hexàedres, totalment ortogonal, i amb un nombre total de cel · les igual a 115.656.

El terme gradient de la taula E.3 fa referència al creixement de les cel · les en la direcció especificada. A títol d'exemple, el mallat en la direcció vertical de la cota e de la fig. 6.8, i que té un gradient igual a 40 segons la taula E.3, significa que la cel · la que estigui situada en contacte just sobre la superfície anomenada paret_inferior, segons la fig. E.3 tindrà una alçada 40 vegades menor que la cel · la situada just a la cota e ($H/2$) de la fig. 6.8.

Una vegada obtingut el mallat segons els paràmetres que s'acaben d'enunciar, s'ha procedit a fer un doble refinament a la cel · la adjacent a la paret inferior, per tal de

mantenir el valor de y^+ dintre del rang que s'ha comentat a la memòria ($y^+ \simeq 0, 25$). Segons s'ha vist a la memòria, un tercer refinament de la cel·la més propera a la paret inferior no aportava un canvi significatiu en els resultats obtinguts.

Tot seguit es mostren algunes captures de pantalla del mallat que s'ha utilitzat en la resolució del cas, fig. E.4, fig. E.5, fig. E.6 i fig. E.7:

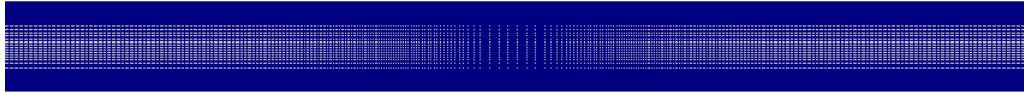


Figura E.4.: Vista general de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi amb confinament

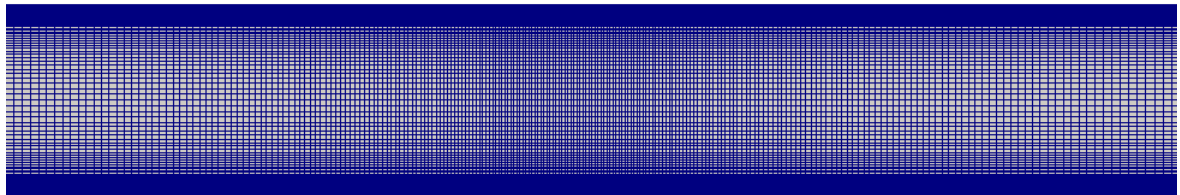


Figura E.5.: Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi amb confinament

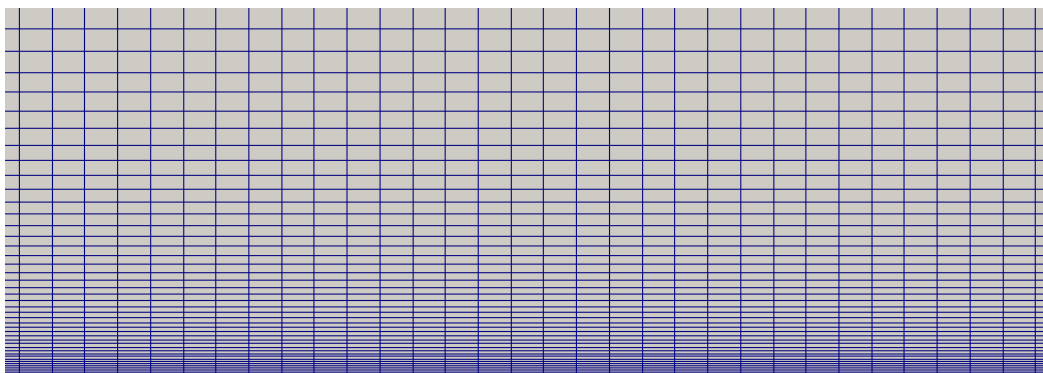


Figura E.6.: Vista general del refinament de la malla a la *paret_inferior* (sortida del bufador) - 1 llavi amb confinament

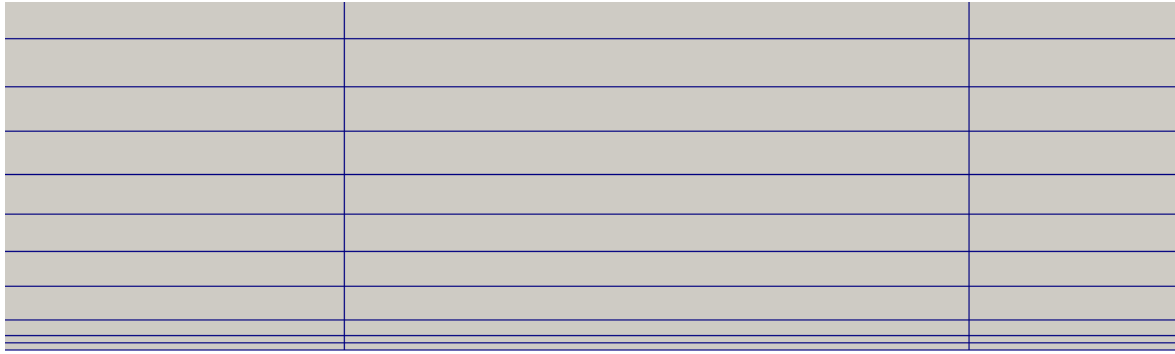


Figura E.7.: Vista en detall del doble refinament de la malla a la *paret_inferior* (sortida del bufador) - 1 llavi amb confinament

E.5.3. Dades generals del mallat (altres casos)

En aquest apartat es mostren unes captures de pantalla del mallat corresponent a les altres configuracions de bufador que s'han analitzat per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció.

Cal dir que no s'entra en el mateix nivell de detall que s'ha fet en la configuració d'un sol llavi, però cal fer èmfasi en el fet que la distribució del mallat en tant que zones amb major densitat de cel·les, gradients i refinaments, pren com a base el cas d'un sol bufador. Els resultats del mallat es mostren a continuació:

Jet sense confinament (1 llavi)



Figura E.8.: Vista general de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi sense confinament

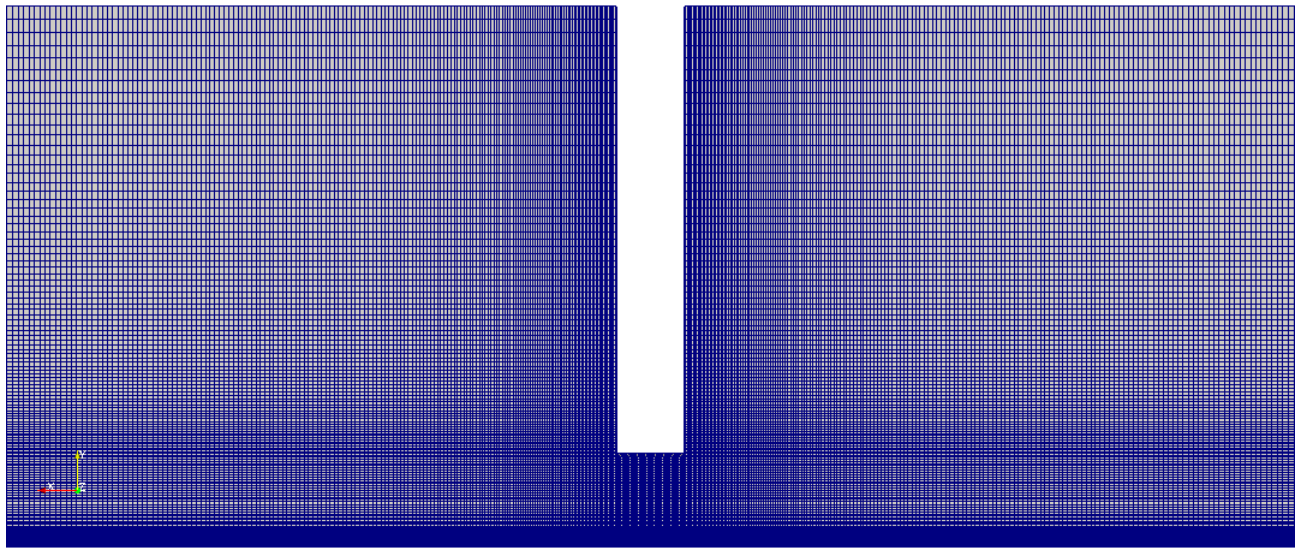


Figura E.9.: Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi sense confinament

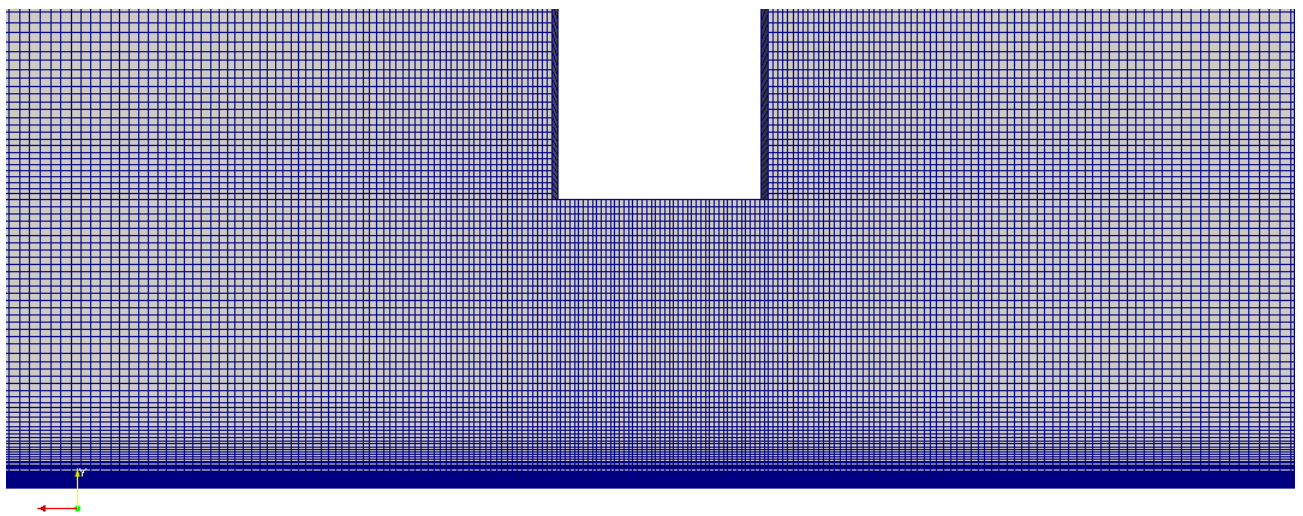


Figura E.10.: Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la sortida del llavi a la zona central (sortida del bufador) - 1 llavi sense confinament

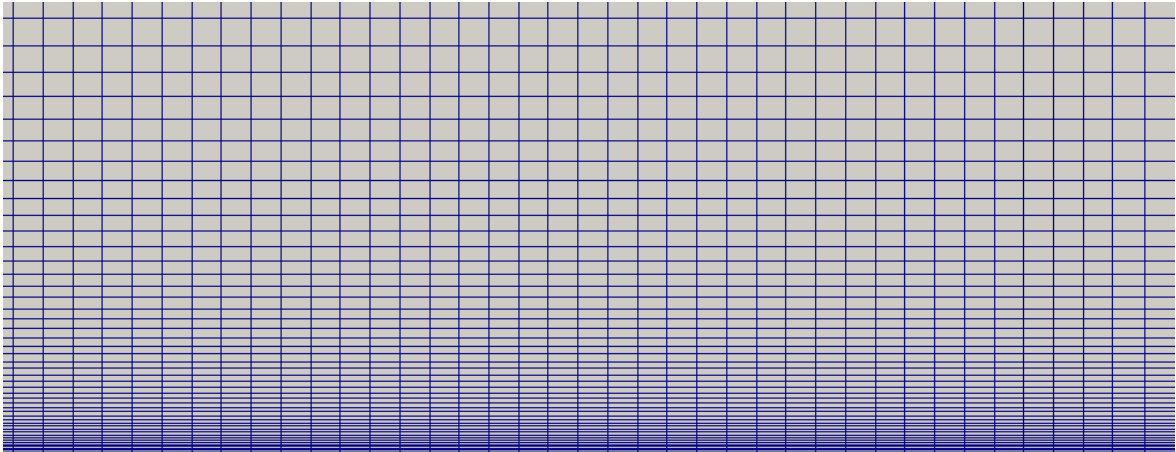


Figura E.11.: Vista general del refinament de la malla a la *paret_inferior* - 1 llavi sense confinament

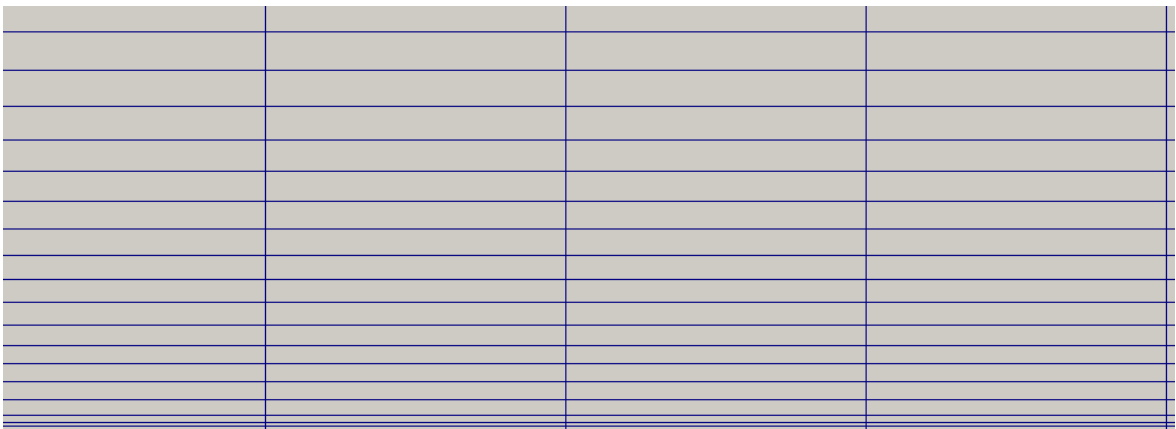


Figura E.12.: Vista en detall del doble refinament de la malla a la *paret_inferior* - 1 llavi sense confinament

Bufador de doble ranura

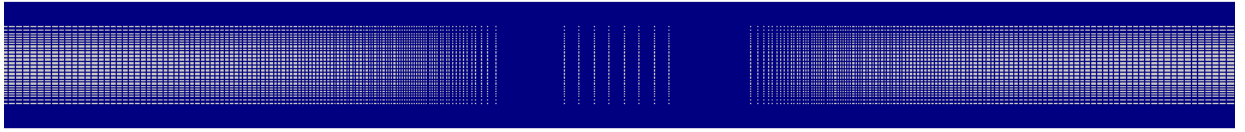


Figura E.13.: Vista general de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 2 llavis amb confinament

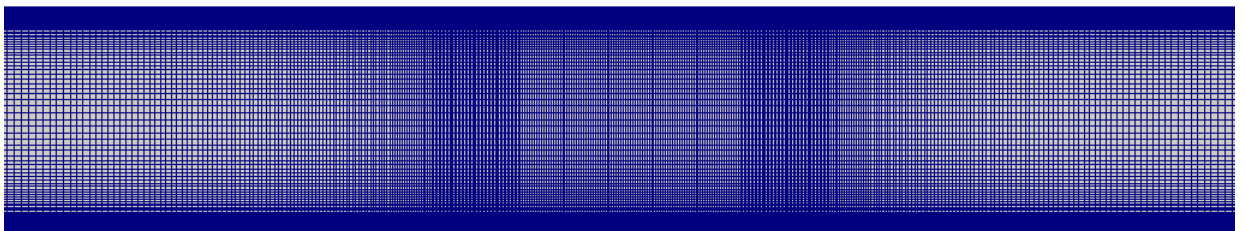


Figura E.14.: Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 2 llavis amb confinament

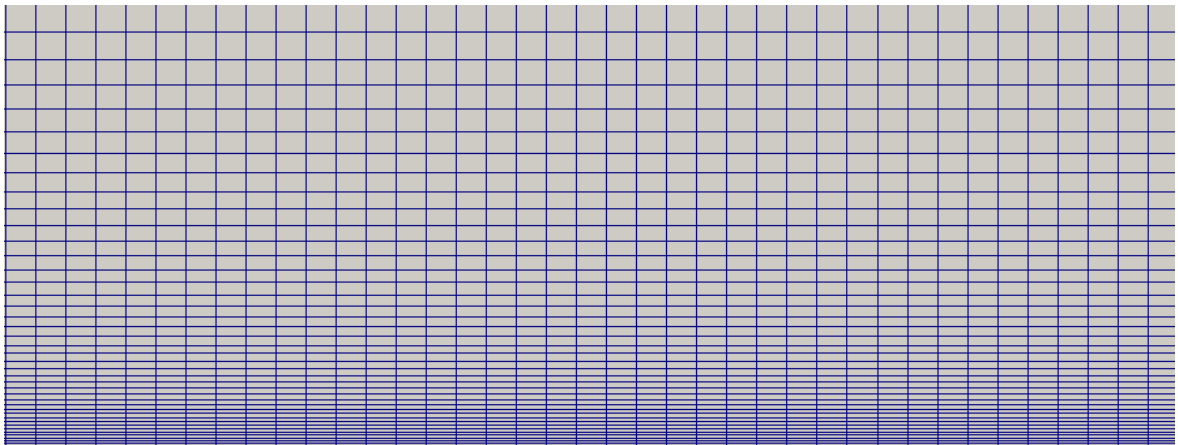


Figura E.15.: Vista general del refinament de la malla a la *paret_inferior* (sortida del bufador) - 2 llavis amb confinament

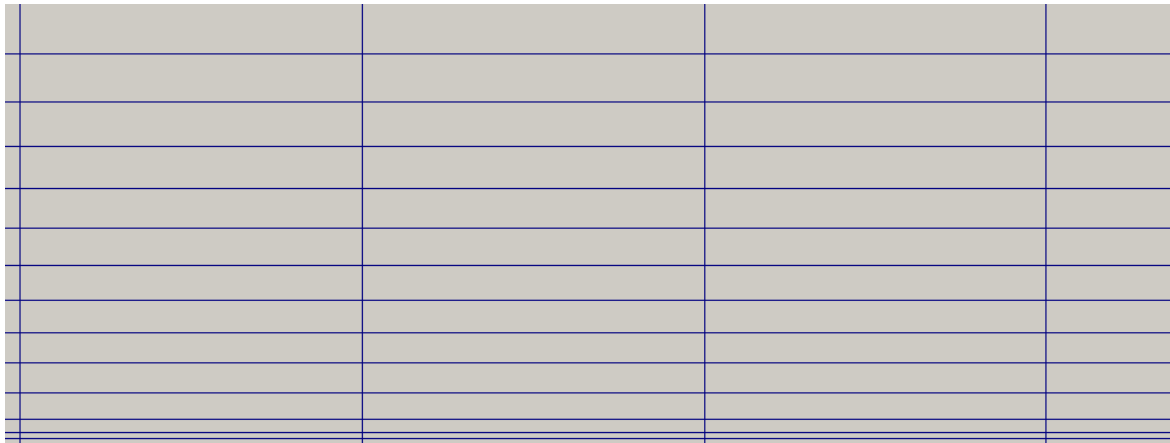


Figura E.16.: Vista en detall del doble refinament de la malla a la *paret_inferior* (sortida del bufador) - 2 llavis amb confinament

Bufador de triple ranura

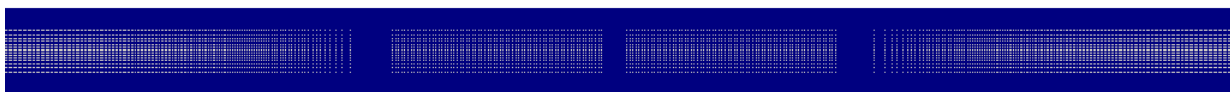


Figura E.17.: Vista general de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 3 llavis amb confinament

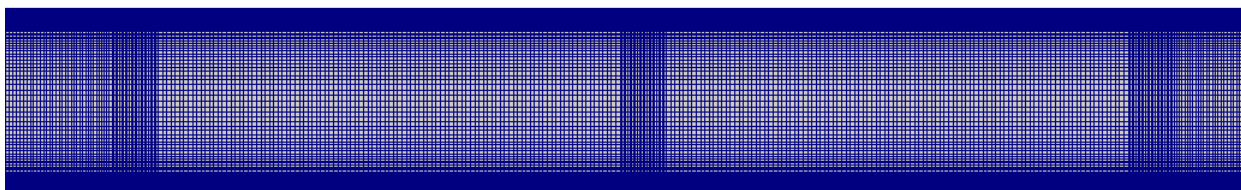


Figura E.18.: Vista més detallada de la part del mallat corresponent a la zona central (sortida del bufador) - 3 llavis amb confinament

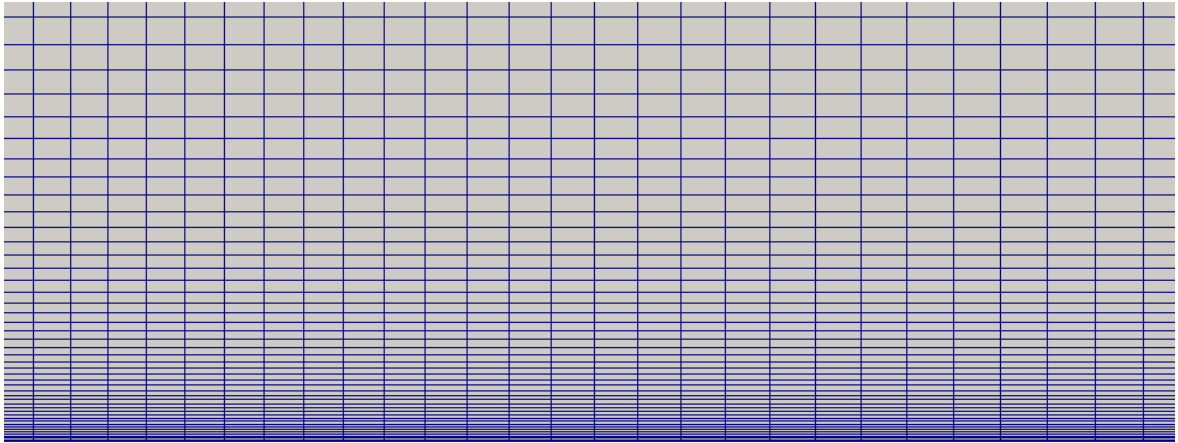


Figura E.19.: Vista general del refinament de la malla a la *paret_inferior* (sortida del bufador) - 3 llavis amb confinament

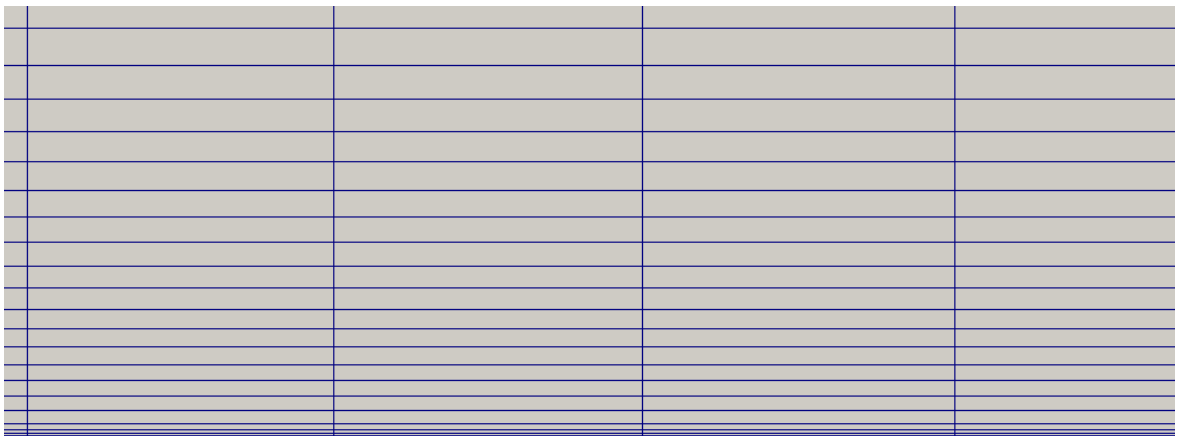
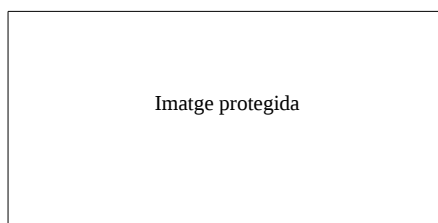
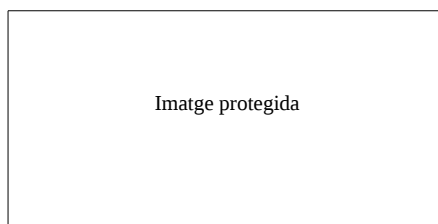
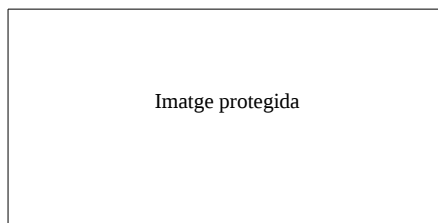
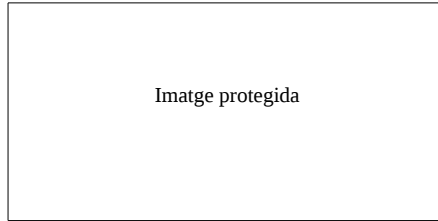
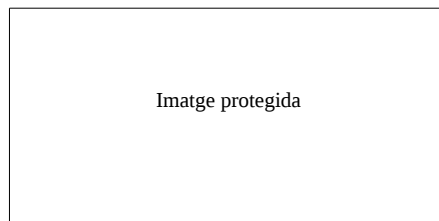
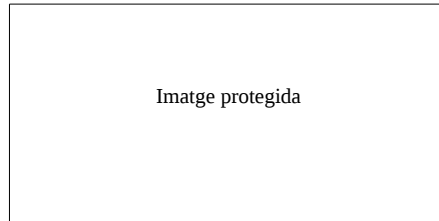


Figura E.20.: Vista en detall del doble refinament de la malla a la *paret_inferior* (sortida del bufador) - 3 llavis amb confinament

E.5.4. Taula resum de de casos estudiats

E.5.4.1. Bufador d'un sol llavi, amb confinament





Taula E.4.: Resum de casos estudiats, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, per un bufador d'una sola ranura amb confinament. Nomenclatura segons fig. 6.7 i fig. E.3.

En tots els casos, la malla tenia el mateix nombre d'elements (115.656 cel · les) i característiques segons s'ha descrit a la sec. E.5.2. S'han realitzat un total de 38 simulacions (sense tenir en compte les passes prèvies per a la preparació del model), i per a cada simulació s'hi han dedicat aproximadament unes 4 hores (152 h en total).

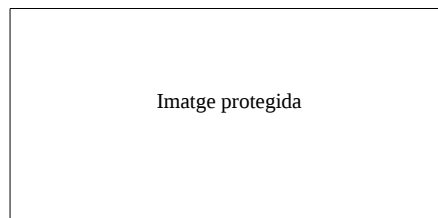
E.5.4.2. Bufador d'una sola ranura, sense confinament



Taula E.5.: Resum de casos estudiats, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, per un bufador d'una sola ranura sense confinament. Nomenclatura segons fig. 6.36.

Nomenclatura segons la fig. 6.36. El mallat es correspon a una malla formada totalment per hexàedres, i totalment ortogonal; el nombre de cel·les és de 125.436 en total. Pel que fa al temps de càlcul, per a cada simulació és d'unes 5h aproximadament (15 h en total).

E.5.4.3. Bufador de doble llavi, amb confinament

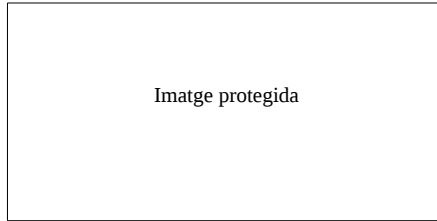


Taula E.6.: Resum de casos estudiats, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, per un bufador de dues ranures amb confinament. Nomenclatura segons fig. 6.41.

El mallat es correspon a una malla formada totalment per hexàedres, i totalment ortogonal; el nombre de cel·les és de 81.984 en total. Pel que fa al temps de càlcul, per a cada simulació és d'unes 3,5h aproximadament (17,5 h en total).

Per a preparar aquestes simulacions s'ha partit de l'adaptació del mateix diccionari *blockMeshDict* que en el cas del bufador d'un sol llavi i s'han efectuat les modificacions corresponents.

E.5.4.4. Bufador de triple llavi, amb confinament



Taula E.7.: Resum de casos estudiats, per a l'estudi del coeficient de transferència de calor per convecció, per un bufador de tres ranures amb confinament. Nomenclatura segons fig. 6.45.

Nomenclatura segons la fig. 6.45. El mallat es correspon a una malla formada totalment per hexàedres, i totalment ortogonal; el nombre de cel·les és de 90.280 en total. Pel que fa al temps de càlcul, per a cada simulació és d'unes 3,5h aproximadament (10,5 h en total).

Per a preparar aquestes simulacions s'ha partit de l'adaptació del mateix diccionari *blockMeshDict* que en el cas del bufador d'un sol llavi i s'han efectuat les modificacions corresponents.

Bibliografia

- [1] Avci, A. & Can, M. The analysis of the drying process on unsteady forced convection in thin films of ink Applied Thermal Engineering , 1999, 19, 641 - 657
- [2] Avci, A.; Can, M. & Etemoğlu, A. B. A theoretical approach to the drying process of thin film layers Applied Thermal Engineering , 2001, 21, 465 - 479
- [3] Bergman, T., Lavine, A., Incropera, P. & Dewitt, D., (2011), Fundamentals of heat and mass transfer. United States of America, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Jaramillo, J.; Pérez-Segarra, C.; Oliva, A. & Claramunt, K. Analysis of different RANS models applied to turbulent forced convection International Journal of Heat and Mass Transfer , 2007, 50, 3749 - 3766
- [5] Colucci, D. & Viskanta, R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet Experimental Thermal and Fluid Science , 1996, 13, 71 - 80
- [6] A. V. Heiningen, Heat transfer under impinging slot jet, Ph.D. thesis, McGill University, 1982.
- [7] S.H. Seyedein, M. Hasan, A.S. Mujumdar, Modelling of a single confined turbulent slot jet impingement using various $k - \varepsilon$ turbulence models, Applied Mathematical Modelling, Volume 18, Issue 10, October 1994, Pages 526-537
- [8] S.J. Wang, A.S. Mujumdar, A comparative study of five low Reynolds number $k - \varepsilon$ models for impingement heat transfer, Applied Thermal Engineering, Volume 25, Issue 1, January 2005, Pages 31-44
- [9] F.Moukalled, et al., The finite volume method in computational fluid dynamics, fluid mechanics and its application 113, Springer International Publishing Switzerland 2016.
- [10] Frank M. White, Fluid Mechanics, fourth edition, McGraw-Hill.
- [11] Benmouhoub, D. & Mataoui, A. Turbulent Heat Transfer From a Slot Jet Impinging on a Flat Plate. Journal of Heat Transfer. 2013;135(10):1022011-1022019. doi:10.1115/1.4024554.
- [12] Benmouhoub, D. & Mataoui, A. Inclination of an impinging jet on a moving wall to control the stagnation point location International Journal of Thermal Sciences , 2015, 89, 294 - 304

- [13] Versteeg H. K. & Malalasekera W. (1995), An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method, Longman Scientific & Technical.
- [14] Markatos, N. The mathematical modelling of turbulent flows Applied Mathematical Modelling, 1986, 10, 190 - 220
- [15] James S. Chickos & William E. Acree, Jr. Enthalpies of vaporization of organic and organometallic compounds 1880-2202, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 32, N^o 2, 2003.
- [16] DDBST, Propietats de components purs, <<http://ddbonline.ddbst.com>>
- [17] Transport Properties of Chemicals and Hydrocarbons, edited by Carl L. Yaws,, William Andrew Publishing, Boston, 2009, Page 597, ISBN 9780815520399, <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2039-9.50019-3>.
- [18] Asociación Española de Normalización y Certificación. Secadoras y hornos en los que se desprenden sustancias inflamables - Requisitos de seguridad. UNE-EN 1539. Madrid-España, 2015.
- [19] Boletín Oficial del Estado. Limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades. «BOE» núm. 33, de 7 de febrero de 2003, páginas 5030 a 5041 (12 págs.)
- [20] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. Real Decreto 681/2003, de 12 de Junio. BOE n^o 145, de 18 de Junio.
- [21] Dräger. 15 Maig 2017, <https://www.draeger.com/es_es/Home>
- [22] Mathesontrigas. 15 Maig 2017, <<https://www.mathesongas.com>>
- [23] Smallwood, Ian M. Handbook of organic Solvent Properties. New York, Arnold, and John Wiley & Sons, Inc. 1196
- [24] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. NTP 379: Productos inflamables: variación de los parámetros de peligrosidad.
- [25] P. Lepík, J. Serafín, M. Mynarz, J. Drgáčová, Effect of temperature on the concentration explosion limits of combustible liquids, Safety and Security Engineering V, 2013, 597-605.
- [26] Xunta de Galicia. 10 Juny 2017, <<http://www.issga.xunta.gal>>, Prevención de riesgos y detección de gas.
- [27] Tomislav Marić, Jens Höpken, Kyle Mooney, The OpenFOAM® Technology Primer, sourceflux UG, 2014.
- [28] Fòrum de mecànica de fluids computacional, <<https://www.cfd-online.com>>, “Manipulation of every single mesh node inside the domain (OpenFoam)”.
- [29] Custom Machine Manufacturing, <<http://www.thecmmgroup.com/>>, “Custom designed regenerative thermal oxidizer”.

- [30] Wolf Dynamics srl, spin off de la Universitat de Gènova, <<https://unige.it/unimprese/WolfDynamicsrsl.shtml>>, “OpenFoam Introductory Training”.
- [31] William Logie, Elimar Frank. A computational fluid dynamics study on the accuracy of heat transfer from a horizontal cylinder into quiescent water. ISES Solar World Congress, 28 August - 2 September 2011, Kassel, Germany.
- [32] Ferziger J. H., Perić M., Computational Methods for Fluid Dynamics, third editions, Springer.
- [33] Farhana Afroz, M.A.R. Sharif, Numerical study of heat transfer from an isothermally heated flat surface due to turbulent twin oblique confined slot-jet impingement, International Journal of Thermal Sciences, Volume 74, 2013, Pages 1-13, ISSN 1290-0729, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.004>.
- [34] Muhammad A.R. Sharif, Heat Transfer from an Isothermally Heated Flat Surface due to Twin Oblique Slot-Jet Impingement, Procedia Engineering, Volume 56, 2013, Pages 544-550, ISSN 1877-7058, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.158>.
- [35] Sánchez J., González J. A., Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas. Proyecto final de carrera, Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Septiembre de 2004.
- [36] Gardin P.; Pericleous K. Heat transfer by impinging jets on a moving strip, Inter Conf on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation, CSIRO, 1997
- [37] OpenFOAM, The open source CFD toolbox, <<https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>>
- [38] M. L. V. Ramires, C. A. Nieto de Castro. Standard reference data for the Thermal conductivity of water, Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1995, 24, 1377-1381
- [39] Carl L. Yaws, Chapter 7 - Thermal Conductivity of Liquid – Organic Compounds, In Transport Properties of Chemicals and Hydrocarbons, William Andrew Publishing, Boston, 2009, Pages 299-395
- [40] Lienhard V John H. & Lienhard IV John H. (2004), A heat transfer textbook, third edition, Phlogiston Press.
- [41] Goodfellow, <<http://www.goodfellow.com/E/Polyethyleneterephthalate.html>>
- [42] Vilamitjana Pujol, J. Comexi, de Girona al món. El llegat de Manel Xifra i Maria Loreto Pagès. Tercera edició.
- [43] Wienand J. Riedelsheimer A. Weigand B. Numerical study of a turbulent impinging jet for different jet-to-plate distances using two-equation turbulence models. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2017, 61, 210 - 217.

- [44] Dutta R. Dewan A. Srinivasan B. Comparison of various integration to wall (ITW) RANS models for predicting turbulent slot jet impingement heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65, 750 - 764.
- [45] Behnia M. Parneix S. Prediction of heat transfer in an axisymmetric turbulent jet impinging on a flat plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, vol. 41, n^o 12, 1845-1855.
- [46] Narayanan V. Seyed-Yagoobi J. Page R.H. An experimental study of fluid mechanics and heat transfer in a impinging slot jet flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47, 1827 - 1845.
- [47] Royne A. Dey C. J. Effect of nozzle geometry on pressure drop and heat transfer in submerged jet arrays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, 800 - 804
- [48] Colucci D. W. Viskanta R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, vol 13, 71 - 80
- [49] OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox. User Guide. Version 2.3.0, OpenFOAM Foundation.
- [50] Hwang Robert R. Jaw Shenq-Yuh. Second-order closure turbulence models: their achievements and limitations. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part A, Vol. 22, N^o. 6, 1998, 703-722.*
- [51] Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd edn. DCW Industries Inc., US
- [52] Munson B. R. Young D. F. Okiishi T. H. *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4th edn. John Wiley & Sons, US
- [53] Fluent user guide, <<http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node294.htm>>
- [54] MSA, The Safety Company, <<http://es.msasafety.com>>
- [55] Amgitec, Tractament de gasos amb contingut de solvent, <<http://www.amgitec.com/en/products/treatment-of-voc-s/regenerative-thermal-oxidizer/>>
- [56] Miranda Barreras, A. L. (1996), *La psicrometría*, Grupo Editorial Ceac
- [57] Braud L. M., Moreira R. G., Castell-Perez M. E. Mathematical modeling of impingement drying of corn tortillas, *Journal of Food Engineering*, 50, 2001, 121-128
- [58] Fluid properties calculator, <<http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop>>
- [59] Comexi. 14 Novembre 2017, <<http://www.comexi.com>>
- [60] Estampa web. Juny 2018, <<https://estampaweb.com/policromia-ou-quadricromia-em-serigrafia-como-fazer/>>

- [61] Xprinta. Juny 2018, <<http://www.xprinta.com/blog/cafe-pantone/>>
- [62] Anguita J. (2011), La flexografía de alta calidad - Factores clave para una impresión flexo de calidad, Technologic Tapes , S.L.
- [63] Ctec Manel Xifra Boada, Technological Center of Flexible Packaging, Packaging - visión del proceso (diapositives de Powerpoint)
- [64] Ctec Manel Xifra Boada, Technological Center of Flexible Packaging, Elementos clave de máquina flexográfica, Luling Y. (diapositives de Powerpoint)
- [65] Illa i Alibés J., Cuchí Oterino J. C., Problemes de termotècnia, Eumo, 1990
- [66] S&P Sistemas de Ventilación, <<https://www.solerpalau.com/es-es/>>

