



EPS

Escola Politècnica

UdG Superior

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Títol: Simulació d'un motor de combustió interna alternatiu monocilíndric 4 temps amb el programari IC Engine d'ANSYS 14

Document: MEMÒRIA I ANNEXOS

Alumne: Kiryl Holubeu

Director/Tutor: Martí Comamala Laguna

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Màquines i Motors Tèrmics

Convocatòria (mes/any): Setembre 2014

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	7
1.1 Antecedents	7
1.2 Objecte	8
1.3 Abast	8
2. MOTORS DE COMBUSTIÓ INTERNA ALTERNATIUS.....	10
2.1 Motivació d'estudi	10
2.2 Teoria del motor 4 temps de cicle Otto	10
2.3 Potència de motor.....	13
2.4 Rendiment volumètric	14
2.5 Rendiment indicat	16
3. DISSENY DE MOTORS: CONDUCTES DE CULATA I VÀLVULES	18
3.1 Coeficient de descàrrega.....	18
3.2 Moviments característics dins de cilindre.....	20
3.2.1 <i>Swirl</i>	21
3.2.2 <i>Tumble</i>	21
3.2.3 Camp de velocitats	22
3.3 Estudi de vorticitat de flux.....	23
4. PARTS CARACTERÍSTIQUES DE MOTOR: ADMISSIÓ.....	25
4.1 Àrea i forma del conducte d'admissió	25
4.2 Vàlvula d'admissió	27
5. ESTUDI AMB EL IC ENGINE.....	30
5.1 Geometria del motor	30
5.2 Anàlisi <i>Port Flow</i>	31
5.2.1 Descripció	31
5.2.2 <i>Port Flow</i> : geometria original resultats.....	32

5.2.3	Conducte modificat	38
5.2.4	Vàlvula modificada.....	43
5.2.5	Vàlvula modificada i conducte modificat	49
5.2.6	Anàlisi dels resultats	55
5.3	Anàlisi <i>Cold Flow</i>	63
5.3.1	Descripció	63
5.3.2	Resultats de la geometria original.....	64
5.3.3	Geometria modificada resultats.....	67
5.3.4	Avaluació dels resultats	70
6.	RESUM DEL PRESSUPOST	73
7.	CONCLUSIONS.....	74
7.1	Avaluació del <i>software</i>	74
7.2	Avaluació del disseny original del motor	75
7.3	Propostes de millora	75
8.	RELACIO DE DOCUMENTS	77
9.	BIBLIOGRAFIA.....	78
	ANNEXOS	80
	ANNEX A. DADES DEL MOTOR.....	81
A.1	Introducció	81
A.2	Geometria i model 3D	82
A.2.1	Presa de mides.	82
A.2.2	Conductes d'admissió i escapament	82
A.2.3	Vàlvules, cambra de combustió i pistó	84
A.2.4	Programari utilitzat i metodologia.....	84
A.2.5	Dimensions de referència	86
A.3	Dades per la simulació <i>Cold Flow</i>	90
A.3.1	Mides geomètriques de diferents components del motor	90

A.3.2 Angles d'obertura i tancament i alçades de les vàlvules.....	90
ANNEX B. RENDIMENT VOLUMÈTRIC I INDICAT	93
B.1 Introducció	93
B.2 Rendiment volumètric.....	93
B.3 Rendiment indicat.....	94
ANNEX C. COEFICIENT DE DESCÀRREGA EXPERIMENTAL.....	97
C.1 Introducció.....	97
C.2 Dades banc de flux	97
C.3 Càlcul de coeficient de descàrrega.....	98
ANNEX D. DESCRIPCIÓ DE PROCESSOS CARACTERÍSTICS EN MOTOR	99
D.1 Flux en cilindre	99
D.2 Etapes de flux en cilindre	99
D.2.1 Primera part de la fase d'admissió	99
D.2.2 Segona part de la fase d'admissió	100
D.2.3 Fase de compressió.....	100
D.2.4 Inicialització de combustió	100
D.3 Comportament de moviments característics	101
D.4 Mètodes per a induir el <i>swirl</i>	101
D.4.1 Port recte.....	101
D.4.2 Port amb paret deflectora	102
D.4.3 Vàlvula emmascarada	102
D.4.4 Conductes helicoidals	103
D.5 Mètodes d'avaluació de <i>swirl</i> i <i>tumble</i>	104
D.5.1 Assaigs dinàmics	104
D.5.2 Assaigs estàtics	105
ANNEX E. DISSENY DELS MOTORS D'ALTA EFICIÈNCIA.....	107
E.1 Introducció	107

E.2 Cambra de combustió i forma de pistó	107
E.3 <i>Squish</i>	108
E.4 Relació de compressió	108
E.5 Disseny pel baix règim de revolucions	109
E.6 El <i>timing</i> de la ignició i injecció	109
ANNEX F. SEGUIMENT PORT FLOW	111
F.1 Introducció	111
F.2 Inicialització de l'entorn ANSYS	111
F.2.1 Flux de treball	113
F.3 Importació de la geometria	114
F.4 Mallat de la geometria	120
F.5 <i>Set up</i> de la simulació	125
F.5.1 <i>General and Models</i> (ajustos generals i models utilitzats)	125
F.5.2 <i>Materials</i>	126
F.5.3 <i>Phases</i>	127
F.5.4 <i>Cell zone conditions</i>	127
F.5.5 <i>Boundary conditions</i> (condicions del contorn)	128
F.5.6 <i>Mesh Interfaces</i>	130
F.5.7 <i>Dynamic Mesh</i>	130
F.5.8 <i>Reference Values</i>	131
F.5.9 <i>Solution</i>	131
F.5.10 <i>Solutions methods</i>	131
F.5.11 <i>Solution Controls</i>	132
F.5.12 <i>Monitors</i>	133
F.5.13 <i>Solution Initialization</i> (Inicialització de la solució)	135
F.5.14 <i>Calculation activities</i>	135
F.5.15 <i>Run Calculation</i>	135

F.5.16 Obtenció de resultats.	135
ANNEX G. GENERACIÓ DE REPORT	138
G.1 Introducció.....	138
G.2 Generació de <i>Report</i>	138
G.3 <i>Results</i>	140
ANNEX H. MILLORES DEL DISSENY ORIGINAL	142
H.1 Introducció.....	142
H.2 Fases de l'estudi	142
H.3 Breu descripció teòrica.....	143
H.3.1 Conducte d'admissió.....	143
H.3.2 Vàlvula d'admissió	147
ANNEX I. SEGUIMENT <i>COLD FLOW</i>	151
I.1 Introducció.....	151
I.2 Inicialització entorn ANSYS	151
I.2.1. Preparació anàlisi <i>Cold Flow</i>	151
I.2.2 <i>Set up</i> de la simulació del motor	153
I.3 Importació de la geometria	156
I.3.1 <i>ICE-DesignModeler</i>	157
I.3.2 Descomposició de geometria	157
I.3.3 Anàlisi de descomposició	162
I.3.4 Animació de vàlvules i pistó	164
I.4 Mallat de la geometria	165
I.4.1 Definició dels paràmetres del mallat	166
I.4.2 Mallat i inspecció de resultats	167
I.5 <i>Set up</i> de la simulació.....	172
I.5.1 Inicialització del programa	172
I.5.2 <i>General and Models</i> (ajustos generals i models utilitzats)	174

I.5.3 <i>Materials</i>	175
I.5.4 <i>Phases</i>	177
I.5.5 <i>Cell zone conditions</i>	177
I.5.6 <i>Boundary conditions</i> (condicions del contorn)	177
I.5.7 <i>Mesh Interface</i>	179
I.5.8 <i>Dynamic Mesh</i>	180
I.5.9 <i>Reference Values</i>	184
I.5.10. <i>Solution</i>	184
I.5.11 <i>Solutions methods</i>	184
I.5.12 <i>Solution Controls</i>	185
I.5.13 <i>Monitors</i>	187
I.5.14 <i>Solution Initialization</i> (<i>Inicialització de la solució</i>)	189
I.5.15 <i>Calculation activities</i>	190
I.5.16 <i>Run Calculation</i>	191

1. INTRODUCCIÓ

En aquest apartat s'inclou tota la informació necessària que permet entendre la motivació per la realització del projecte, els objectius de l'estudi i tots els requisits específics que s'ha de complir.

El següent document conté dues parts diferenciades: Memòria i Annexos. En la Memòria es descriuen diferents etapes del projecte i la solució adoptada de manera breu i concisa. A més, es desenvolupen les conclusions d'acord amb els objectius establerts. L'apartat dels Annexos inclou tota la informació de caràcter tècnic necessària per a justificar els continguts de la Memòria.

1.1 Antecedents

L'àrea de màquines i motors tèrmics i mecànica de fluids disposa d'un software de simulació de motors 4T de combustió interna alternatius - IC Engine d'ANSYS 14. Aquest programari permet estudiar la dinàmica complexa de fluids en contacte amb les parts en moviment (exemple: vàlvules, parets del cilindre, pistó) passant per conductes d'admissió i escapament. Així mateix, cal destacar la complexitat dels fenòmens que tenen lloc en el cilindre del motor: interacció del flux d'aire d'admissió i el flux d'injecció, evaporació de líquid, barreja turbulent, reaccions químiques – igual que la simultaneïtat d'aquests processos.

El procediment clàssic d'anàlisi consisteix en fer proves en el banc de flux sobre la culata de motor. Les pèrdues de càrrega produïdes en conductes de la culata, degudes al disseny inapropiat d'aquestes o la forma de vàlvules, originen pèrdua de potència del motor. La conseqüència és l'augment de consum. Una millora introduïda en la culata permet millorar radicalment el rendiment del motor.

Avui en dia existeix la possibilitat de simular aquests processos mitjançant els programes CFD. Però l'inconvenient que presenten aquests consisteix en la programació de parts en moviment (condicions de contorn), partició de la regió en parts estàtiques i en moviment, condicions del flux transitori – tots aquests aspectes fan que la programació de la simulació

tingui una complexitat considerable. Així mateix, l'obtenció de les dades de càlcul i el seu anàlisi posterior a la simulació també requereix una dedicació del temps considerable.

Amb l'objectiu de simplificar aquest procés i millorar l'eficiència d'estudi juntament amb la disminució de la possibilitat d'error s'ha decidit provar el programari especialment desenvolupat per aquesta tasca – IC Engine.

Per l'estudi es disposa de les dades obtingudes en el banc de flux i simulacions realitzades sobre la culata del motor monocilíndric KINLON, 4 temps, admissió amb carburador i refrigerat per aire. Aquest fet permet comparar els resultats obtinguts durant el desenvolupament del treball amb les dades reals i valorar l'eficàcia de la metodologia utilitzada.

1.2 Objecte

Aquest TFG proposa l'estudi d'un motor monocilíndric des de la perspectiva termodinàmica, flux d'aire, els fenòmens de propagació d'ones per tal d'obtenir les seves prestacions i si s'escau proposar mesures per augmentar el seu rendiment. També s'avaluarà el programari utilitzat, la seva eficiència, flexibilitat, facilitat d'ús, possibilitats de càlcul i limitacions. Finalment, es farà un anàlisi de les dades obtingudes simulades i la seva comparació amb les dades del banc de flux.

1.3 Abast

El motor serà estudiat amb el *software* especialitzat disponible al laboratori de mecànica de fluids computacional.

En primer lloc es procedirà a obtenir les dades geomètriques del motor. Les condicions del contorn, condicions atmosfèriques i les restriccions a imposar s'ajustaran d'acord amb les dades obtingudes del banc de flux.

Per a continuar, es farà la simulació del motor segons dues metodologies diferents: *Port Flow Analysis* (Anàlisi del conducte) i *Cold Flow Analysis* (Anàlisi de flux en fred).

Les dades obtingudes seran analitzades i validades segons l'estudi real en el banc de flux. Després es farà la visualització del flux d'aire a través de conductes i vàlvules, comptabilització del flux màssic d'aire i representació de totes les dades que siguin pertinents.

Posteriorment, s'avaluarà la possibilitat de millorar el disseny actual.

Per l'anàlisi *Port Flow* es proposarà la millora de la vàlvula d'admissió i el conducte d'admissió per separat i del conjunt. La geometria modificada serà analitzada amb el programari segons la metodologia anterior. Finalment, es farà l'anàlisi dels resultats obtinguts.

L'anàlisi *Cold Flow* és realitzarà sobre la geometria original i la geometria modificada. La fase final serà comparar les ràtios de *swirl* i *tumble* amb les conclusions pertinents.

Per a acabar, s'avaluarà la metodologia utilitzada i les millores proposades per la geometria original.

2. MOTORS DE COMBUSTIÓ INTERNA ALTERNATIUS

2.1 Motivació d'estudi

Avui en dia en el camp de disseny i producció de motors de combustió interna hi ha la necessitat de introduir unes millores radicals. En primer lloc, això és degut a que els motors elèctrics en el camp d'automoció com alternativa poden oferir unes prestacions comparables i al mateix temps presenten certes característiques que els dona la preferència en el sector.

A més, la generació nova de motors ha de ser més compacte, proporcionar més potència, flexibilitat, produir menys contaminació i utilitzar menys combustible. Es necessiten uns dissenys innovadors i com a conseqüència les eines d'anàlisi per determinar de manera ràpida, eficient i fiable les característiques dels motors a estudiar.

Amb l'objectiu d'entendre els possibles aspectes a millorar s'ha d'introduir la teoria de funcionament dels motors de 4 temps de cicle Otto. El motor que s'estudia en el treball és d'aquest tipus.

2.2 Teoria del motor 4 temps de cicle Otto

El cicle de funcionament d'un motor 4 temps de cicle Otto es divideix en les etapes següents:

- **Admissió**
- **Compressió**
- **Expansió**
- **Escapament**

Admissió: Durant aquesta fase l'aire atmosfèric barrejat amb el combustible entra pel conducte d'admissió a través de la vàlvula d'admissió dins del cilindre degut a la diferència de pressió provocada pel moviment del pistó cap al punt mort inferior. El volum de la cambra augmenta fins al seu màxim. El combustible no necessàriament entra de forma gasosa.

Compressió: Les vàlvules d'admissió i escapament estan tancades. El pistó fa el moviment cap al punt mort superior, disminuint al mínim el volum de la barreja aire-combustible. La disminució brusca del volum provoca l'augment de la temperatura i de pressió. El combustible passa a l'estat gas. Al final del cicle de compressió s'inicia l'encesa de la barreja gràcies a l'acció de la bugia. En un instant relativament curt es produeix l'augment de la temperatura i pressió dins del cilindre.

Expansió: La pressió provocada per la combustió actua sobre la superfície del pistó, provocant el seu desplaçament al punt mort inferior. Durant aquesta fase és quan s'obté l'energia mecànica per funcionament del motor.

Escapament: Aquesta fase s'inicia quan s'obre la vàlvula d'escapament i el pistó és mou al punt mort superior expulsant els gasos produïts durant la fase de combustió. Al final de la fase el pistó queda en la posició del PMS (punt mort superior) començant un nou cicle.

Cal remarcar que aquest és el cicle teòric on no es té en compte la possibilitat d'injecció directa dins del cilindre, tampoc es descriu en quin moment (referint als angles de cigonyal) s'obren i es tanquen les vàlvules (avanç/retard en admissió i escapament).

A la *Figura 1* es pot observar la representació gràfica del cicle:

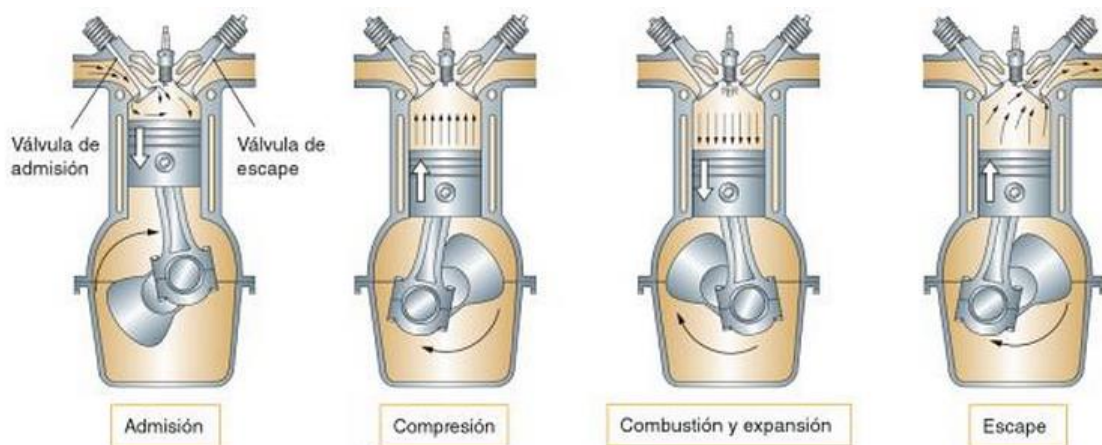


Figura 1: Representació de les 4 fases del motor de cicle Otto (SANZ, 2011)

El cicle representat permet veure les parts del motor que intervenen en cada fase. Com a conseqüència es pot determinar els punts claus de disseny del motor.

La fase que s'estudiarà amb molta atenció en el treball és la fase d'admissió. Malgrat això, durant l'anàlisi *Cold Flow* intervé la fase d'escapament, però la informació que aporta és irrellevant.

La fase d'admissió determina la potència màxima que pot desenvolupar el motor, ja que aquesta és proporcional a la quantitat de combustible (gasolina) i comburent (aire, oxigen en concret) que s'introdueix. Aleshores, és imprescindible dissenyar el motor de manera que durant la fase d'admissió es pugui introduir la màxima quantitat de la barreja aire-combustible amb la mínima despesa energètica possible.

A la *Figura 2* es mostren els conductes d'admissió i escapament juntament amb les vàlvules corresponents. L'element que integra aquestes dues parts d'importància és la culata. Aleshores, el disseny del conjunt culata – vàlvules és la base de millora en motors 4 temps de combustió interna alternatius. L'especial interès es concentra sobre la vàlvula i el conducte d'admissió.

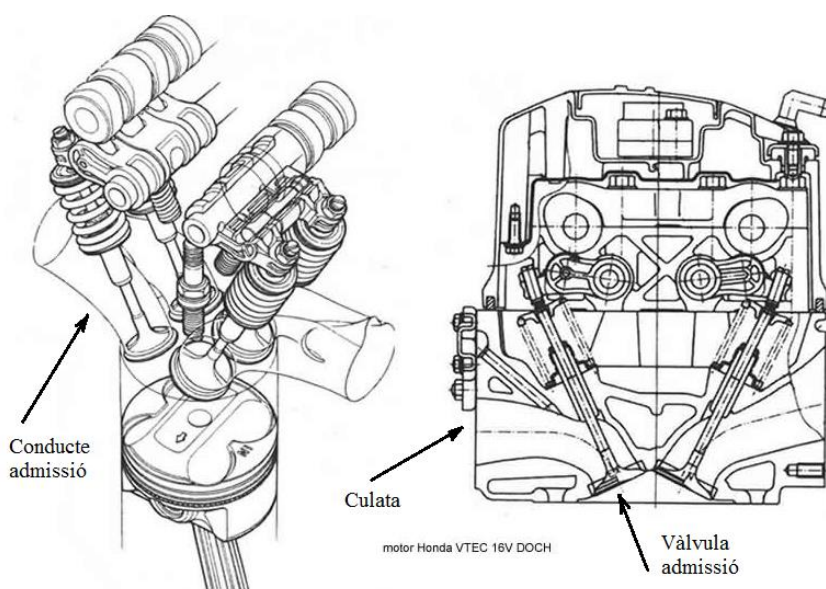


Figura 2: Representació esquemàtica del motor 4 temps i secció de la culata (SHERWOOD, 2014)

2.3 Potència de motor

Tal i com es comentava en l'apartat anterior, la potència efectiva de motor té la següent explicació (*Equació 1*):

$$P_e = \frac{N \cdot V_t \cdot C \cdot \rho_a \cdot \eta_v \cdot F_r F_e \cdot C_{inf} \cdot \eta_m \cdot \eta_i}{X} \quad [\text{W}] \quad (\text{Eq. 1})$$

On:

N – velocitat rotacional en revolucions/s

V_t – cilindrada del motor en m^3

C – relació entre el volum ocupat per l'aire i ocupat per la barreja admesa (per gasolina aproximadament igual a 1).

ρ_a – densitat d'aire d'admissió en kg/m^3

η_v – rendiment volumètric

F_r – dosat relatiu

F_e – dosat estequiomètric

C_{inf} – poder calorífic inferior del combustible (PCI) per unitat de massa KJ/kg

η_m – rendiment mecànic

η_i – rendiment indicat

X – numero de revolucions pel cicle (2 – en motors 4T)

De tots aquest paràmetres introduint modificacions en la culata s'aconsegueix variar els rendiments volumètrics i indicat.

2.4 Rendiment volumètric

Rendiment volumètric es defineix com la massa d'aire proporcionada a través de la vàlvula d'admissió durant la fase d'admissió comparada amb la massa de referència, que representa la quantitat d'aire necessària per omplir perfectament el volum del cilindre en condicions atmosfèriques dominants (*Equació 2*). En l'Annex B s'expliquen tots els paràmetres que intervenen amb més detall.

$$\eta_v = \frac{m_{asp}}{m_{ref}} \quad (\text{Eq. 2})$$

On:

m_{asp} – massa d'aire aspirat en kg

m_{ref} – massa de referència en kg

L'experiència en el camp de disseny de motors de combustió interna identifica el rendiment volumètric com un dels més importants i on el dissenyador pot incidir. La seva variació (augment) afecta directament la potència efectiva. Això és degut a que la potència depèn bàsicament de la quantitat de combustible que es pot cremar en cada cicle. Perquè la combustió sigui eficient i correcta des del punt de vista químic hi ha una relació establerta entre les quantitats de combustible/aire en la combustió.

La quantitat mínima d'aire necessària s'anomena aire estequiomètric i és directament proporcional a la massa del combustible. Per exemple, en els motors de gasolina

necessitem de 13,5 a 15,5 kg d'aire per cada kg de combustible (la variació és deguda a les composicions diferents de gasolina).

Aleshores, si s'aconsegueix introduir més aire en cada fase d'admissió, posteriorment, cremar més combustible i com a conseqüència directa augmentar la potència eficient.

Gasos en moviment segueixen el comportament regit per lleis de mecànica de fluids i de termodinàmica. Aquest moviment té lloc a velocitats molt altes de cigonyal, com a conseqüència, pèrdues, refluxos i les ones de pressió fan que sigui impossible omplir el cilindre el 100% de la capacitat.

En molts casos és interessant representar la variació de rendiment volumètric segons el règim de gir del motor. A la *Figura 3* estan representats diferents motors amb rendiments volumètrics corresponents:

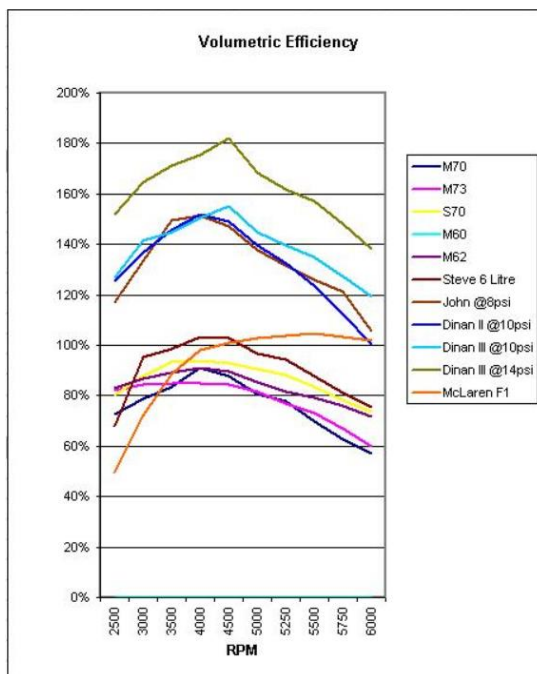


Figura 3. Eficiències volumètriques de motors atmosfèrics i amb turbocompressors (FUSTON, 2014)

S'observa que el rendiment volumètric agafa valors relativament petits a baixes revolucions. Això és perquè hi ha el fenomen de reflux durant la fase d'obertura i tancament de l'admissió.

A continuació, quan el règim de revolucions augmenta, el rendiment també creix fins al màxim i posteriorment torna a decreixer, degut a que el temps de la fase d'admissió es redueix i no permet omplir el cilindre de manera eficient.

El valor de rendiment volumètric en motors atmosfèrics es troba al voltant del valor 70%. La sobrealimentació (turbocompressor) permet augmentar-lo i sobrepassar el valor de 100%.

2.5 Rendiment indicat

Rendiment indicat és defineix com la relació entre la potència indicada (obtinguda durant la fase d'expansió) i el valor de l'energia consumida de la combustió (*Equació 3*). En l'Annex B s'expliquen tots els paràmetres que intervenen amb més detall.

$$\eta_i = \frac{\dot{W}_i}{\dot{m}_c \cdot C_{inf}} \quad (\text{Eq. 3})$$

On:

\dot{W}_i – potència indicada en W

\dot{m}_c – flux màssic de combustible en kg/s

C_{inf} – poder calorífic inferior del combustible en KJ/kg

Aquest rendiment engloba el conjunt de processos de combustió i expansió dels gasos dins del cilindre. Si s'introdueix la modificació que pugui millorar el procés de combustió des de

l'encesa de combustible fins la combustió de tot el combustible i el seu escapament – es pot aconseguir millorar el valor del rendiment indicat.

Un dels punts que es pot estudiar amb el programari CFD és l'escapament dels gasos i el posterior disseny de les vàlvules d'escapament i els conductes corresponent. Però en aquest treball l'estudi es concentra sobre la fase d'admissió i els components que hi intervenen.

3. DISSENY DE MOTORS: CONDUCTES DE CULATA I VÀLVULES

Amb l'objectiu d'avaluar l'eficiència del disseny de culata, com un dels elements principals del motor des del punt de vista fluidodinàmic, existeixen molts paràmetres, però hi ha dos que són dominants i s'estudiaran en aquest treball. Aquests són la capacitat de conduir el flux que es caracteritza amb el coeficient de descàrrega i el moviment del fluid (barreja aire/combustible) dins del cilindre durant el cicle de funcionament, caracteritzat per *swirl*, *tumble* i *cross tumble*.

El programari utilitzat permet avaluar últims paràmetres descrits anteriorment de forma exhaustiva.

3.1 Coeficient de descàrrega

Per poder avaluar pèrdues de pressió degudes al conducte d'admissió, vàlvula i la fricció amb les parets del cilindre s'utilitza el coeficient de descàrrega C_D . Aquest coeficient està directament relacionat amb el rendiment volumètric de motor.

El coeficient de descàrrega és la relació que existeix entre el flux màssic real de l'aire, que entra durant la fase d'admissió, i el flux màssic ideal en les mateixes condicions. Quan es parla de flux ideal això correspon al flux sense pèrdues de pressió degudes a la fricció amb els components interns del motor, desprendiments de capes ni estrenyiments de flux.

L'*Equació 4* mostra la fórmula del coeficient de descàrrega:

$$C_D = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (Eq. 4)$$

On:

\dot{m}_{ideal} – flux màssic d'aire ideal en kg/s

\dot{m}_{real} – flux d'aire mesurat en kg/s

El flux real es determina en el banc de flux o fent simulacions mitjançant el programari especialitzat, com és ANSYS FLUENT.

El flux ideal es calcula fent servir la hipòtesi del flux isentròpic adiabàtic passant a través de la tovera convergent-divergent (*Equació 5*):

$$\dot{m}_{ideal} = A \cdot \frac{P_0}{T_0^{0,5}} \sqrt{\frac{2}{R} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (Eq. 5)$$

On:

A – àrea de flux de la vàlvula en m²

T_0 – temperatura de la zona estanca, correspon a temperatura atmosfèrica en K

P_0 – pressió de la zona estanca, correspon a pressió atmosfèrica en Pa

γ – exponent adiabàtic d'aire, igual a 1,4

P – pressió mesurada sobre el pla localitzat sota la vàlvula a distància de dos diàmetres de cilindre. Mesurada en Pa

R – constant de l'aire igual a 287 J/kg·K

L'àrea a utilitzar es considera igual a l'àrea de la cortina perifèrica de vàlvula i depèn del seu diàmetre i l'alçada d'obertura (*Equació 6*):

$$A = \pi \cdot d_v \cdot L_v \quad (\text{Eq. 6})$$

On:

d_v — diàmetre de la vàlvula en m

L_v — alçada d'obertura de la vàlvula en m

Aleshores, podem representar el coeficient de descàrrega en funció d'obertura de la vàlvula d'admissió fent servir les dades obtingudes en el banc de flux (Annex C) com els valors de cabal experimental (*Figura 4*):

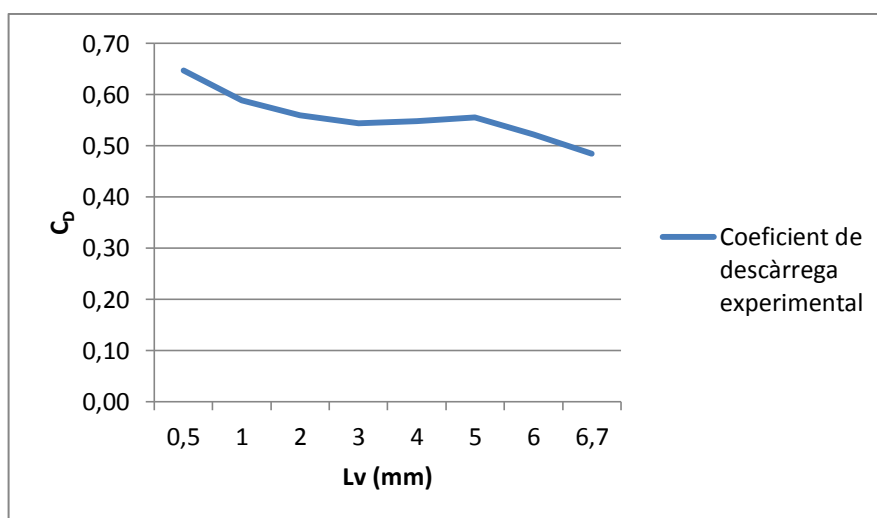


Figura 4. Coeficient de descàrrega experimental del conducte d'admissió

3.2 Moviments característics dins de cilindre

L'eficiència global de motor depèn dels fenòmens dinàmics de fluid que tenen lloc durant el procés d'admissió.

L'aire impulsat a la cambra de combustió passa per la superfície entre el seient de la vàlvula i la vàlvula d'admissió. En aquest moment el flux se separa de la superfície de la vàlvula i el conducte d'admissió formant un raig tangencial. Aquest raig impacta contra les parets del cilindre i es desvia en l'espai entre les vàlvules i el pistó. El moment angular associat al raig és conegut com *swirl* i *tumble*.

3.2.1 *Swirl*

Swirl és un moviment macroscòpic de càrrega típic en motors amb dues vàlvules per cilindre, on la càrrega es mou al voltant d'un eix paral·lel a l'eix del cilindre. Aquest moviment ajuda al desenvolupament del nucli de la flama (*kernel*), reduint l'etapa compresa entre el 0 -10% de la fracció de massa cremada, coneguda com retard de la ignició. Aleshores, s'augmenta l'eficiència del motor i com a conseqüència es redueixen les emissions.

3.2.2 *Tumble*

Tumble representa el moviment de rotació macroscòpic de la càrrega al voltant d'un eix contingut en el pla normal a l'eix del cilindre. Aquest moviment és característic en motors amb 4 vàlvules per cilindre i té lloc durant quasi tota l'etapa de compressió, distorsionant la seva forma degut al moviment ascendent del pistó. Aproximadament 30° abans del PMS el vèrtex es desplaça fins el centre de la cambra, on degut a la geometria d'aquesta es produeix una degradació ràpida del *tumble* en micro-vèrtexs, com a conseqüència incrementant l'energia cinètica turbulenta.

L'increment de l'energia cinètica turbulenta genera un augment en la velocitat del front de flama durant el període del 10 al 90% de la fracció de la massa cremada, denominada duració de la flama.

A la *Figura 5* estan representats aquests dos moviments. La *Figura 6* mostra la fracció de massa cremada i l'influència dels moviments característics sobre aquesta.

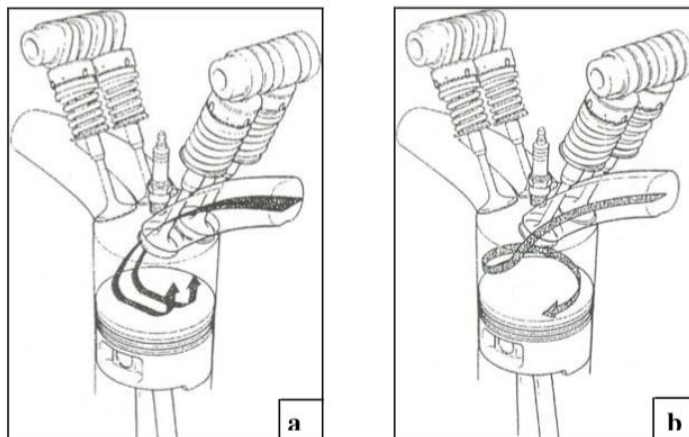


Figura 5. Moviments característics: a. Tumble i b. Swirl (ALBANESI, 2005)

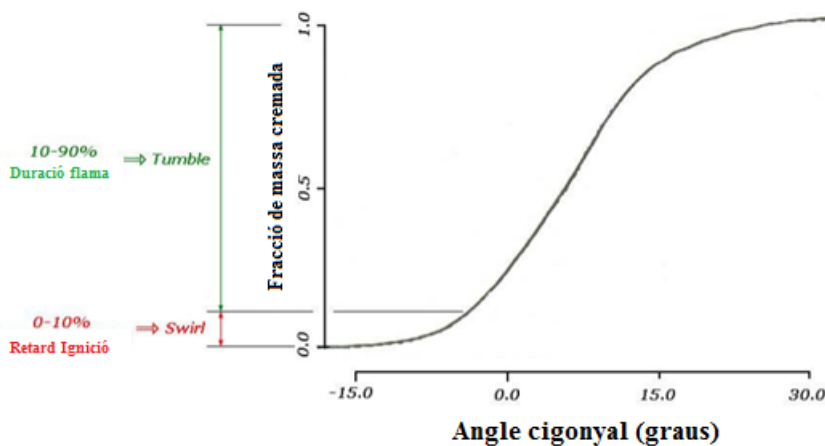


Figura 6. Fracció de massa cremada (ALBANESI, 2005)

3.2.3 Camp de velocitats

Hi ha dos enfocaments per analitzar i predir el flux a l'interior del cilindre. Un d'ells és l'enfocament global que es basa en models simples proporcionant la informació limitada però útil sobre els processos implicats. Per exemple, els models unidimensionals de compressió-expansió, el model simètric del moviment radial en cavitats situats en el cap de pistó que permet avaluar el *squish*, o el vòrtex centrat en l'eix del cilindre.

L'enfocament multidimensional és més complex i dona la informació del camp de velocitats en les direccions radial, axial (estudis bidimensionals) i tangencial (tridimensional).

El procés de identificació quantitativa del flux en el cilindre multidimensional necessita aplicació de tècniques especials: anemometria del fil calent (HWA) o anemometria làser Doppler (LDA) i les tècniques de velocimetria de la trajectòria de partícules (PTV) i velocimetria de la imatge de partícula (PIV).

3.3 Estudi de vorticitat de flux

L'interès principal d'estudiar els dos moviments anteriors es basa en la seva influència sobre el procés de combustió que té lloc en el cilindre.

El procés de combustió en el motor de combustió interna té lloc en el camp de flux turbulent, que es genera durant el procés d'admissió i es modifica durant el procés de compressió.

La importància de la turbulència ha sigut estudiada durant anys amb la conseqüència de que la seva influència sobre l'estructura de la combustió i la velocitat de propagació del front de flama és important.

En els motors d'injecció directa o externa la duració del període de formació de la barreja aire/combustible és crítica, ja que el temps disponible per aconseguir la homogeneïtat de la barreja no és suficient. Aquesta manca del temps augmenta el consum de combustible amb totes les conseqüències negatives provocades.

La solució és augmentar la vorticitat de flux en el cilindre durant el procés d'admissió i el procés de combustió.

Les tècniques utilitzades per l'estudi i comprensió de les característiques del flux en la culata i el cilindre del motor són de tres tipus: experimentals, teòriques i les que els seus resultats depenen de la solució dels plantejaments teòrics utilitzats.

Entre les tècniques experimentals es destaquen:

- Probes amb mesures instantànies a l'interior del motor en funcionament. Presenten la dificultat associada a les temperatures i pressions en el motor funcionant.
- Probes en el banc d'assaigs que permeten avaluar les prestacions del motor. Útil per l'avaluació dels dissenys experimentals i prototips dels elements. Permeten obtenir les dades necessàries i avaluar prediccions dels models.
- Assaigs en el banc de flux estacionari. S'avaluen les pèrdues provocades en conductes d'admissió, escapament, vàlvules i tots els components en general que ofereixen la resistència al pas del fluid gasós. Permet obtenir dades per la posterior avaluació amb el programari CFD.
- Tècniques especials: anemometria làser Doppler (LDA) – per la caracterització del moviment d'aire incloent distribucions de velocitats i turbulències.

Uns dels paràmetres més utilitzats pel l'avaluació de turbulències experimentalment és el coeficient de *swirl*, ja que aquest representa el moviment sobre l'eix del cilindre i aquest és pot mesurar amb certa facilitat.

La mesura experimental del *swirl* s'efectua situant el molinet dins del cilindre a una distància determinada, per exemple 1.15 del diàmetre del cilindre. Amb la freqüència de rotació del molinet i la freqüència angular del motor obtenim el coeficient desitjat.

En aquest treball l'objectiu no és comparar el coeficient *swirl* experimental amb el *swirl* teòric calculat pel programari, sinó estudiar la possibilitat del programa per l'avaluació d'aquest paràmetre i la posterior comparació d'aquest per diferents dissenys de conductes i vàlvules.

Per més informació sobre els moviments característics consultar l'Annex D.

4. PARTS CARACTERÍSTIQUES DE MOTOR: ADMISSIÓ

Segons els objectius del treball hem d'estudiar el comportament de flux, concentrant l'esforç sobre la fase d'admissió.

En aquesta fase els components que hi intervenen i que necessiten ser analitzades:

- Culata del motor. En concret el conducte d'admissió
- Vàlvula d'admissió

4.1 Àrea i forma del conducte d'admissió

Per la major quantitat de flux el sistema d'admissió ideal hauria de tenir un sol carburador pel cilindre amb la seva respectiva papallona i un venturi igual a 0.85 vegades el diàmetre de la vàlvula d'admissió.

Per sota del venturi, el diàmetre del carburador ha d'augmentar-se gradualment fins a igualar-se al diàmetre de la vàlvula d'admissió i gradualment disminuir al valor de 0.85 vegades el diàmetre en un punt a mitja polzada sota del seient de la vàlvula (*Figura 7*)

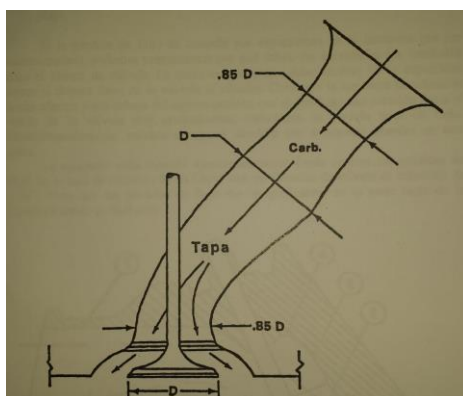


Figura 7. Dimensions del conducte ideal (Manual de operaci3n fluj3metro D-600, 2014)

Hi ha aspectes que s'ha de tenir en compte:

- Les pèrdues de flux tenen lloc en els canvis de direcció i disminució de la velocitat (curvatures i expansions).
- L'àrea de conductes ha de ser entre 65 i 100% de l'àrea de les vàlvules
- La longitud del conducte i el seu acabat superficial no afecten de forma important sobre el flux.
- La major pèrdua de flux en el conducte d'admissió és deguda a l'expansió de l'aire fora de la vàlvula. Aleshores, la zona limitada per mitja polzada per sobre i per sota de la vàlvula correspon a la part més crítica del disseny.
- La forma del seient de la vàlvula té l'efecte essencial sobre la pèrdua de flux

La *Figura 8* representa els punt on es localitzen les pèrdues de flux:

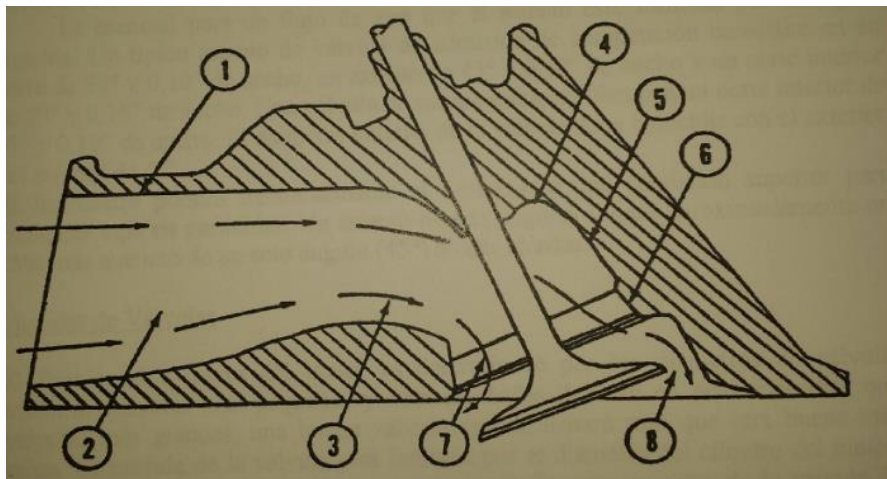


Figura 8. Localització de pèrdues en el conducte (Manual de operació flujómetro D-600, 2014)

En la *Taula 1* podem veure alguns valors característics que corresponen al motor Chevy amb el diàmetre de la vàlvula 1.94 polzades:

Punts corresponents a la pèrdua	% de pèrdua (sobre el 100%)
Fricció en les parets	4%
Contracció en el conducte	2%
Curvatura en la guia de la vàlvula	11%
Expansió després de la guia	4%
Expansió 25°	12%
Expansió 30°	19%
Curvatura a la sortida de la vàlvula	17%
Expansió a la sortida de la vàlvula	31%

Taula 1. Quantificació de les pèrdues en admissió (Manual de operació flujómetro D-600, 2014)

Es pot observar que el disseny del seient de la vàlvula i la zona adjunta presenta principal interès per dissenyador.

4.2 Vàlvula d'admissió

El disseny adequat de la vàlvula d'admissió és important per un funcionament òptim de motor, ja que la geometria física de la vàlvula juntament amb el seient i l'alçada d'obertura determinen l'àrea efectiva per pas del fluid (*Figura 9*).

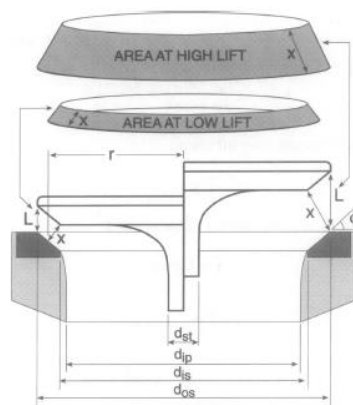


Figura 9. Àrea de pas per diferents obertures de la vòlvula d'admissió (BLAIR, 1999)

Els aspectes on s'ha d'incidir en l'estudi de les vòlvules:

- Dimensionament de les vòlvules
- Incliació dels seients
- Alçada de les vòlvules
- Formes característiques de les copes.

Totes les dimensions es calculen en funció del diàmetre del cilindre i règim de gir aplicant les formules corresponents.

La forma del cap de la vòlvula depèn bàsicament de la funció que se'ls atribueix

A la *Figura 10* es presenten les formes bàsiques de les copes:



Figura 10. Formes de les copes (Estudio del motor: la distribución, 2014)

Si es vol donar als gasos d'admissió el moviment de rotació s'utilitza la vàlvula amb deflectors (*Figura 11*):

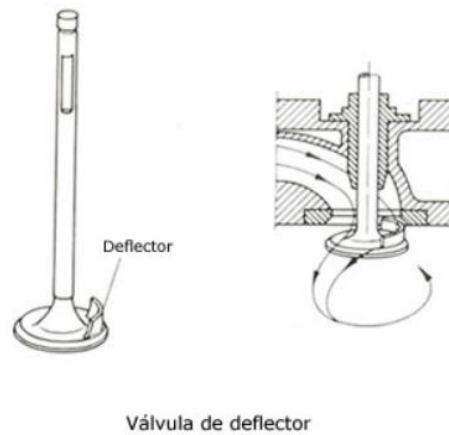


Figura 11. Vàlvula amb deflector (*Estudio del motor: la distribución, 2014*)

A més, s'ha de tenir en compte que l'obertura i tancament de les vàlvules no és instantània, sinó s'adequa d'acord amb l'angle del cigonyal i es divideix en diferents fases.

En aquest treball es proposarà el disseny alternatiu de la vàlvula d'admissió, conservant el seu diàmetre i la inclinació del seient, introduint canvis en la forma del cap de la vàlvula, amb l'objectiu de augmentar el coeficient de descàrrega.

5. ESTUDI AMB EL IC ENGINE

5.1 Geometria del motor

Per l'estudi s'ha fet el model 3D corresponent als conductes d'admissió i escapament de la culata, la cambra de combustió, les vàlvules, pistó i el cilindre del motor monocilíndric KINLON.

La geometria del conducte d'admissió, al ser molt complexa i difícil de mesurar es va determinar fent servir la silicona en estat líquid que s'afegia dins del conducte i posteriorment es procedia amb la seva extracció després de la solidificació. Això va permetre determinar el negatiu del conducte i mesurar la seva geometria.

De la manera similar s'ha obtingut les dimensions del conducte d'escapament, fent servir la plastilina.

La vàlvula d'admissió, escapament, la cambra de combustió, pistó i el cilindre van ser mesurades fent servir el peu de rei, galgues de radis diferents i el regle.

Fa falta dir que a l'hora de determinar aquestes mides vam assumir la presència de possibles errors de mesura que podien influir en resultats. La possible solució per tal de disminuir-los podria ser l'ús de les màquines de mesura de coordenades o els escàners 3D.

La major importància per l'anàlisi té la forma del conducte d'admissió i la vàlvula corresponent, ja que les seves geometries determinen la quantitat de flux màxima i les seves característiques dinàmiques.

A la *Figura 12* es mostren dues geometries originals: una per l'anàlisi *Cold Flow*, i altra per *Port Flow*. La principal diferència entre les configuracions anteriors és que la geometria per *Cold Flow* inclou el cap del pistó, mentre que la geometria per *Port Flow* no necessita especificar aquesta part. A més, l'inici del conducte d'admissió és modificat, amb l'objectiu de millorar l'acoblament automàtic del dipòsit tranquil·litzador de flux.

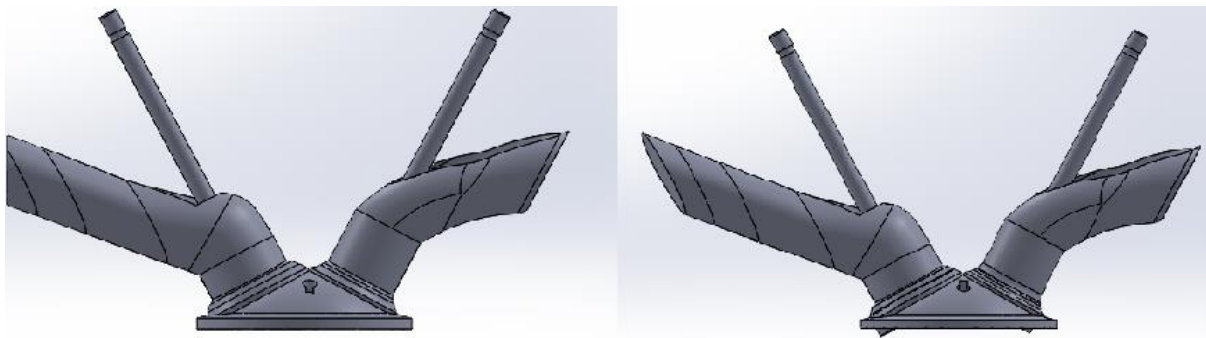


Figura 12. Geometries: Esquerra - configuració Port Flow, dreta - configuració Cold Flow

En els Annexos A, F i I es pot trobar més informació sobre les geometries anteriors.

5.2 Anàlisi Port Flow

5.2.1 Descripció

Bàsicament, aquest anàlisi consisteix en quantificació del flux màssic, *swirl* (de manera aproximada) amb la geometria estàtica en diferents posicions durant el cicle de funcionament del motor.

Concretament, la geometria de les vàlvules és congelada en els punts crítics durant el cicle del motor i s'analiza mitjançant el CFD el flux d'aire que hi circula. Això permet determinar la velocitat de circulació a través de la culata i dins del cilindre, quantificar els fenòmens de turbulència i visualitzar la dinàmica del fluid en general: separació de capes, xocs amb la vàlvula, refluxos i fenòmens secundaris.

El *software* proporciona eines de visualització que permeten captar la dinàmica del fluid en qualsevol posició i seleccionar els paràmetres que cal representar: velocitats, pressions, temperatura, etc.

Els resultats obtinguts s'utilitzen com a base per l'anàlisi posterior i la referència si l'objectiu és la modificació de la geometria per l'obtenir el comportament desitjat del flux d'aire.

Per avaluar els resultats de la simulació es disposa de les dades obtingudes en el banc de flux sobre la culata real. La comparació permet determinar el grau de fiabilitat del model de geometria i els models de càlcul utilitzats.

Com a contrapartida, els resultats obtinguts no reflecteixen els fenòmens termodinàmics com l'expansió i la compressió d'aire deguts al moviment del pistó.

En general, la realització d'anàlisis no requereix una capacitat computacional alta, ja que la geometria és estàtica. A més, la programació de la simulació és bastant senzilla. No obstant això, si augmentem el nombre de posicions crítiques el nombre de cassos també augmenta, com a conseqüència, augmentant el temps dedicat a la configuració. El programari IC Engine permet simplificar el procés de configuració, automatitzant les operacions repetitives.

El procediment general consisteix en: importar la geometria, configurar la posició particular per l'estudi, crear la malla, especificar les condicions del contorn (bàsicament, la diferència de pressió), especificar els model matemàtics de turbulència i altres paràmetres necessaris, calcular la solució i fer l'avaluació de resultats obtinguts.

5.2.2 Port Flow: geometria original resultats

La primera fase d'estudi consisteix en repetir l'experiment realitzat en el banc de flux mitjançant el *software* IC Engine. En l'Annex F s'exposa el seguiment a seguir per programar la simulació.

La simulació es fa per les obertures de vàlvula següents: **0.5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 6.7 mm**. Els cabals màssics obtinguts i el *swirl* en el pla situat a 71.3 mm es mostren a la *Taula 2*:

Lv (mm)	\dot{m} (kg/s)	swirl flow ratio
0,5	3,1057E-03	3,00E-08
1	6,2787E-03	1,00E-07
2	1,1622E-02	0
3	1,5927E-02	4,00E-07
4	2,0728E-02	1,40E-06
5	2,6284E-02	2,50E-06
6	3,0988E-02	2,60E-06
6,7	3,3304E-02	1,60E-06

Taula 2. Resultats simulació de la geometria original

La distribució de pressions i velocitats per les obertures baixes (0.5 mm), mitges (3mm) i màximes (6.7 mm) es presenten a continuació. La representació es fa sobre el pla central.

Pressions (Figura 13, Figura 14, Figura 15). La distribució de pressions mostra la tendència de flux a ser aspirat dins del cilindre. A obertures petites hi ha poca massa d'aire que entra, i la pèrdua de càrrega és important degut a la superfície de pas limitada. A mesura que es va obrint la vàlvula, la diferència de pressió es redueix i el flux adquireix la velocitat.

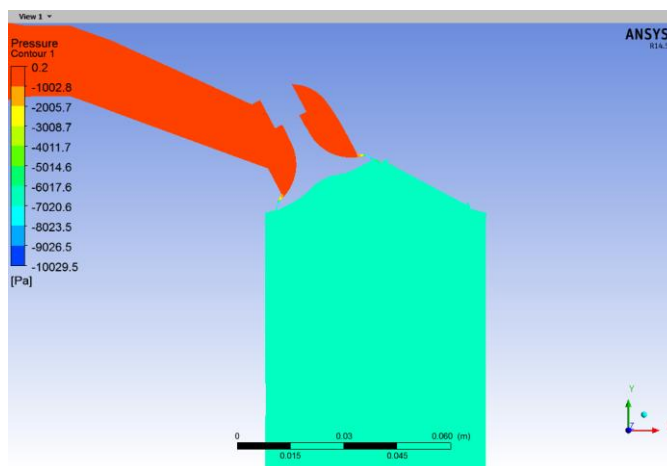


Figura 13. Pressions geometria original 0.5 mm

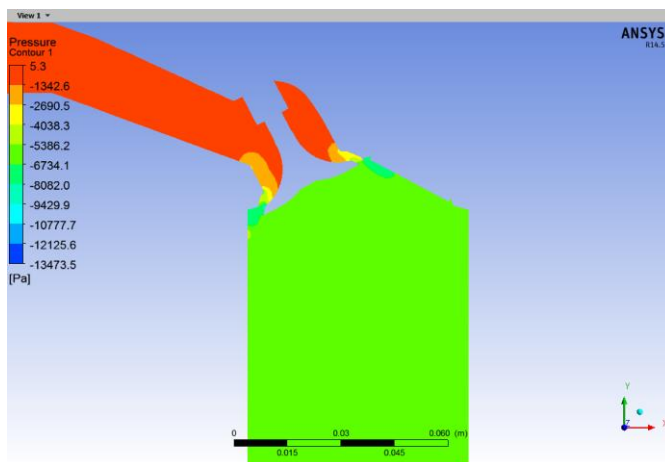


Figura 14. Pressions geometria original 3 mm

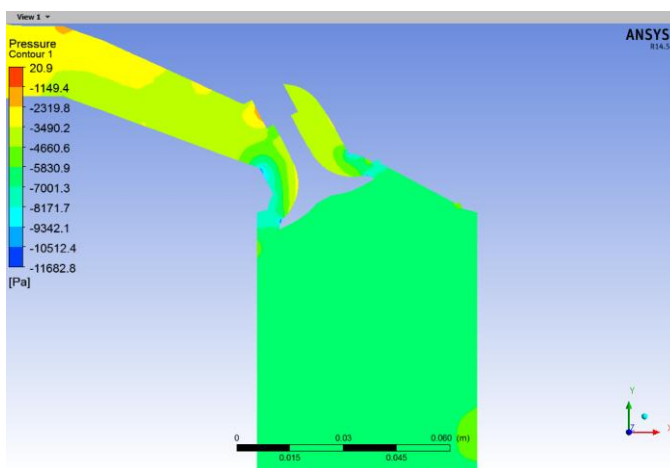


Figura 15. Pressions geometria original 6.7 mm

Velocitats (Figura 16, Figura 17, Figura 18). S'observa que a baixes obertures la superfície de pas és el factor limitant. Les zones estretes entre la vàlvula i el seu seient permeten l'entrada de flux màssic reduït caracteritzat per la velocitat alta. Al mateix temps, aquesta quantitat reduïda no permet generar grans moviments rotacionals de *swirl* i *tumble*. A mesura que la vàlvula s'obre, el raig format per l'aire que entra en el cilindre va creixent, disminuint la seva velocitat. Malgrat això, el seu efecte turbulent ja és més pronunciat. Com a conseqüència, podem observar el remoli generat en la cambra de combustió.

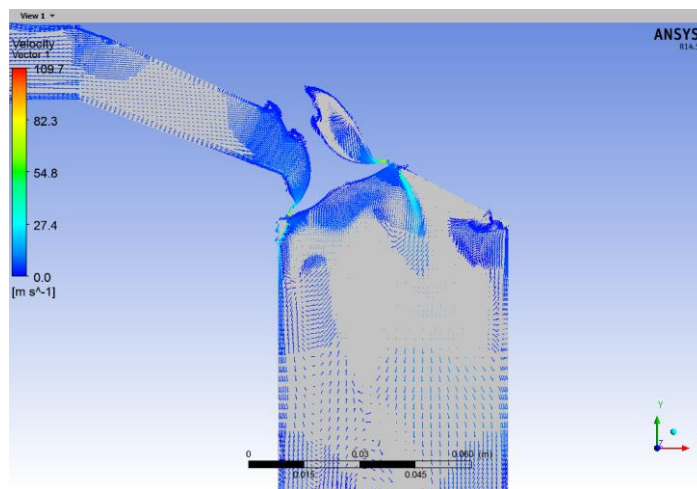


Figura 16. Vectors de velocitat geometria original 0.5 mm

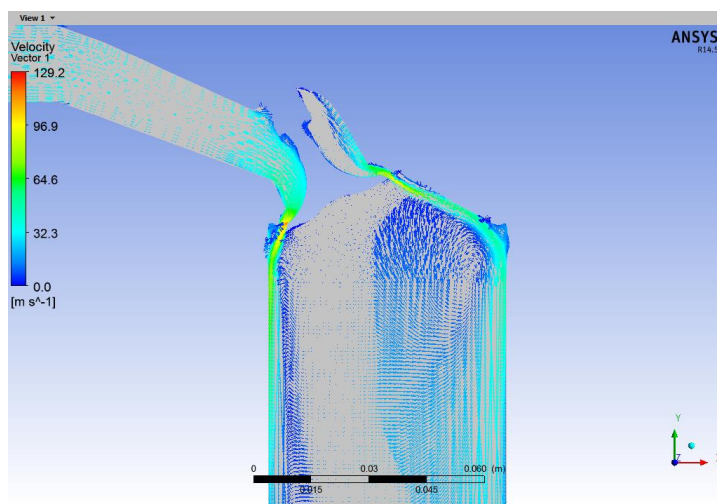


Figura 17. Vectors de velocitat geometria original 3 mm

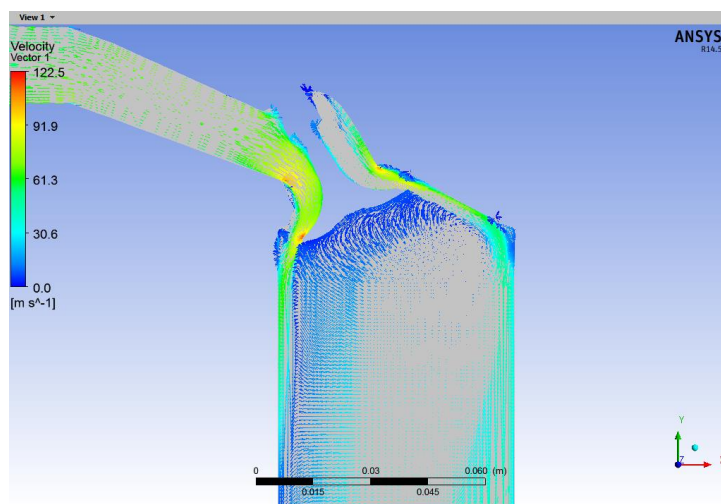


Figura 18. Vectors de velocitat geometria original 6.7 mm

Els moviments corresponents a *swirl* que tenen lloc en el cilindre es pot visualitzar fent servir l'opció de les línies de flux. El pla vermell representa el pla de mesura de *swirl* que es compara en diferents dissenys.

Línies de flux (Figura 19, Figura 20, Figura 21). Tal i com s'observa en la Taula 2 el valor de *swirl* a obertures grans de vàlvula és més gran comparant amb obertures petites. L'anàlisi vectorial de velocitat permet preveure aquesta dependència. Si observem atentament les línies de flux, podem veure que en la part central del cilindre es crea un moviment rotacional de *swirl*, fàcilment identificable per l'obertura de 6.7mm.

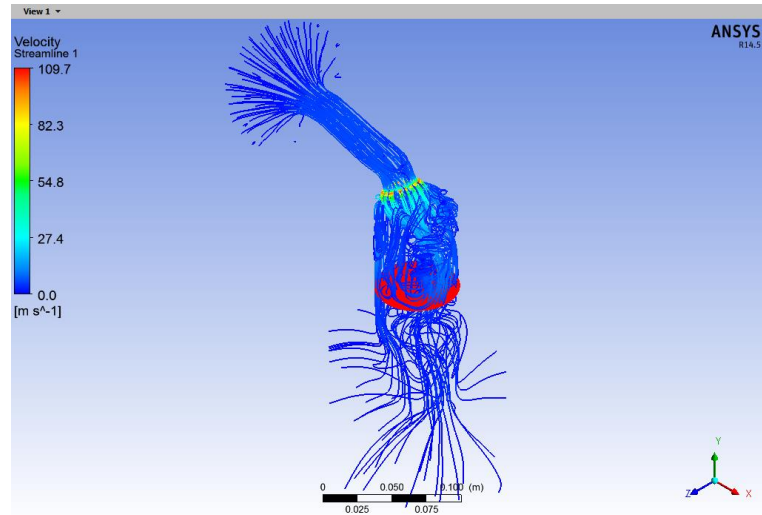


Figura 19. Línies de flux geometria original 0.5 mm

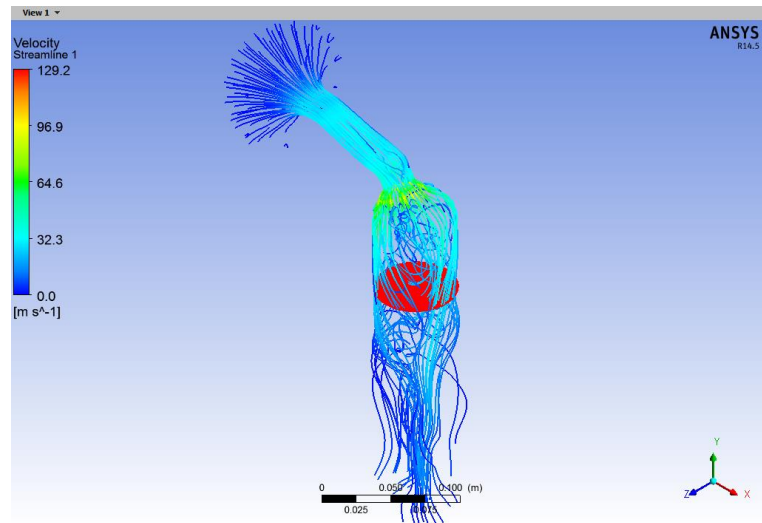


Figura 20. Línies de flux geometria original 3 mm

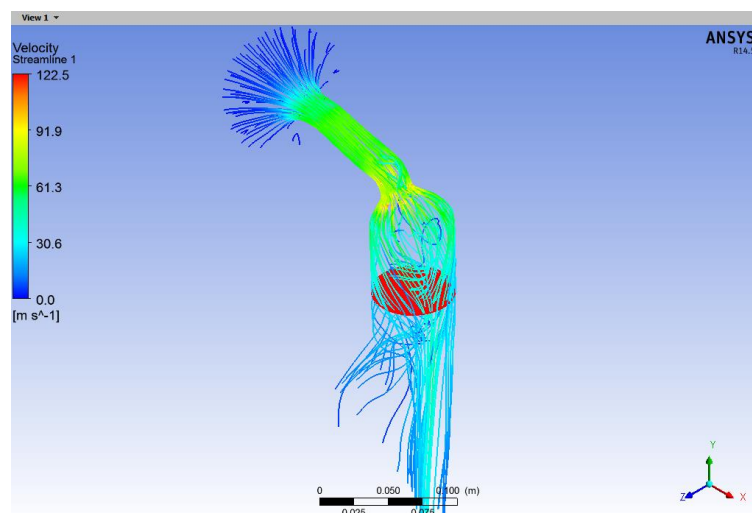


Figura 21. Línies de flux geometria original 6.7 mm

5.2.3 Conducte modificat

Els resultats numèrics de cabal en el conducte modificat es mostren a la *Taula 3*:

Lv (mm)	\dot{m} (kg/s)	swirl flow ratio	% millora
0,5	3,1527E-03	7,00E-08	1,52
1	6,4855E-03	2,40E-07	3,29
2	1,2152E-02	9,00E-07	4,56
3	1,6488E-02	1,50E-07	3,52
4	2,1636E-02	2,40E-06	4,38
5	2,7555E-02	2,00E-06	4,84
6	3,3253E-02	3,50E-06	7,31
6,7	3,6537E-02	3,50E-06	9,71

Taula 3. Resultats conducte modificat

Podem veure que s'ha afegit la columna que quantifica la millora comparant amb el conducte original. Aquesta es calcula a partir de les dades simulades en el conducte original fent servir l'Equació 7:

$$\% \text{ millora} = \frac{\dot{m} \text{ simulat port nou} - \dot{m} \text{ simulat port original}}{\dot{m} \text{ simulat port original}} * 100 \quad (\text{Eq.7})$$

Els resultats obtinguts permeten avaluar la millora del disseny com a satisfactòria.

Pressions (Figura 22, Figura 23, Figura 24). Comparant amb el port original es pot dir que s'ha reduït la pèrdua de pressió en les zones modificades i l'efecte d'aspiració és més pronunciat. Com a conseqüència, la quantitat de flux d'admissió s'ha augmentat en tot el rang obertures.

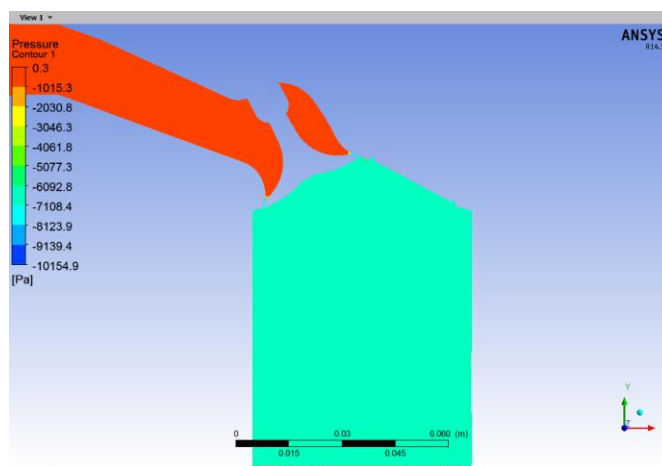


Figura 22. Pressions conducte modificat 0.5 mm

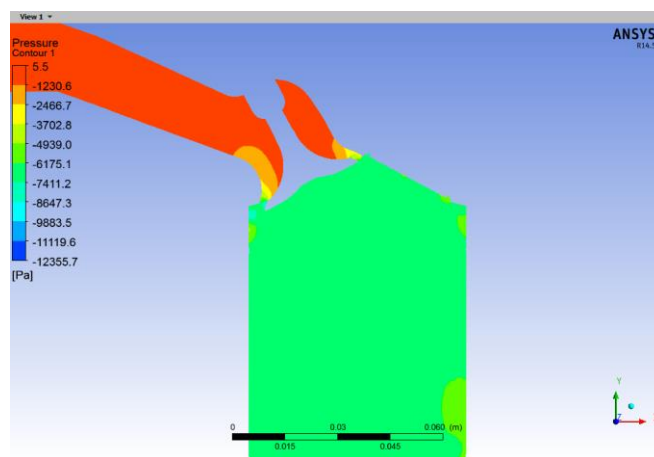


Figura 23. Pressions conducte modificat 3 mm

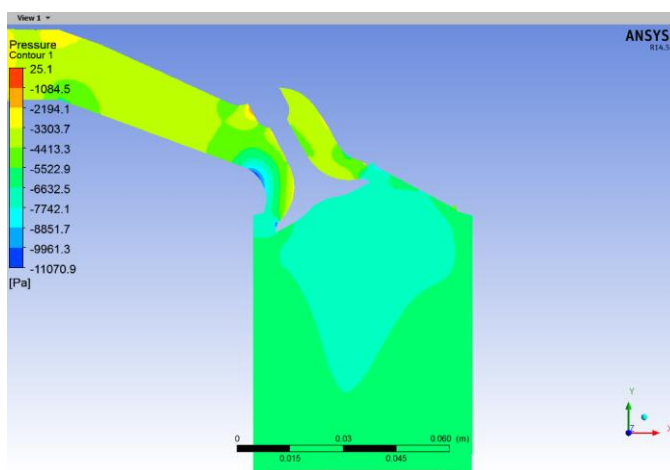


Figura 24. Pressions conducte modificat 6.7 mm

Velocitats (Figura 25, Figura 26, Figura 27). S'observa que el conducte més aerodinàmic permet millorar el comportament de flux i eliminar la major part dels efectes perjudicials, per exemple, remolins.

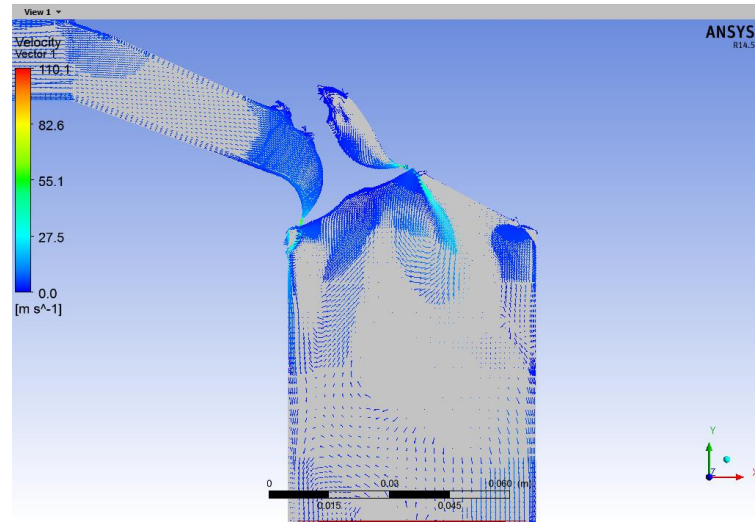


Figura 25. Vectors de velocitat conducte modificat 0.5 mm

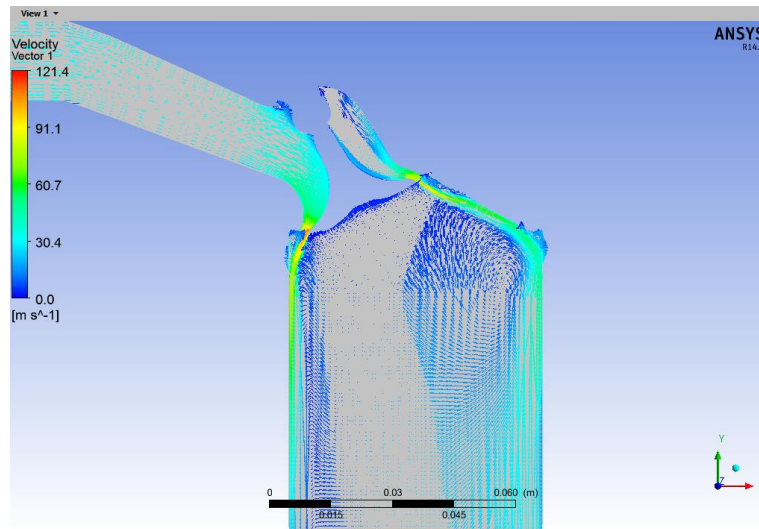


Figura 26. Vectors de velocitat conducte modificat 3 mm

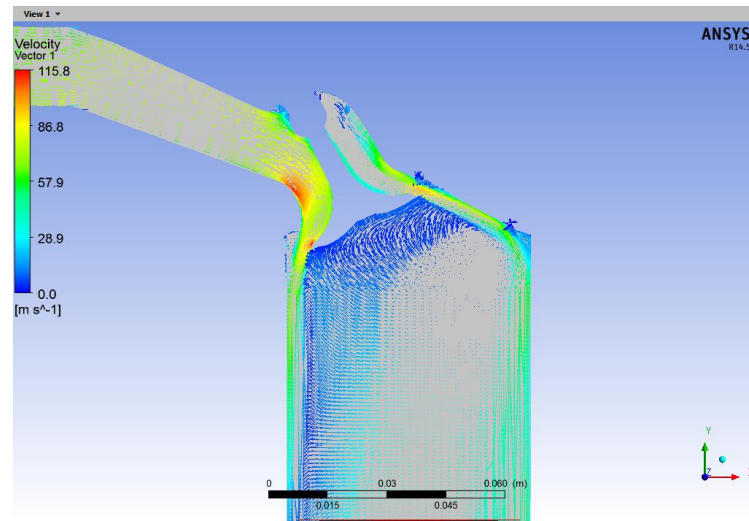


Figura 27. Vectors de velocitat conducte modificat 6.7 mm

Línies de flux (Figura 28, Figura 29, Figura 30):

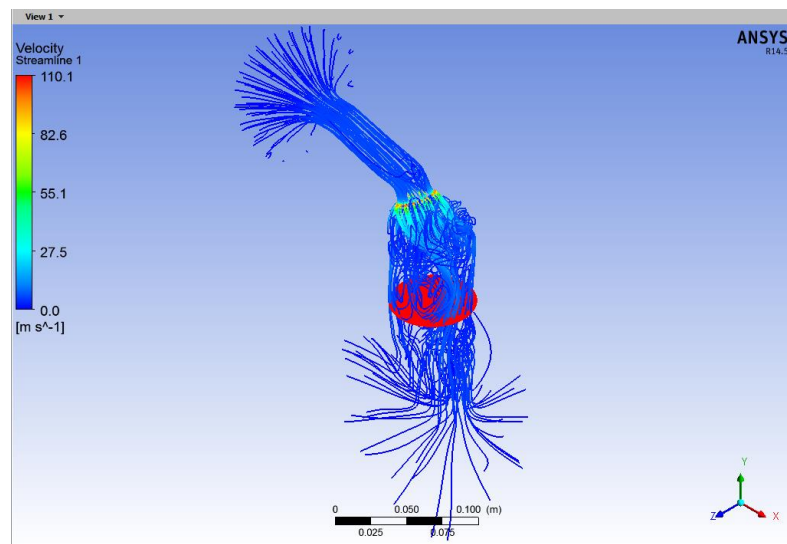


Figura 28. Línies de flux conducte modificat 0.5 mm

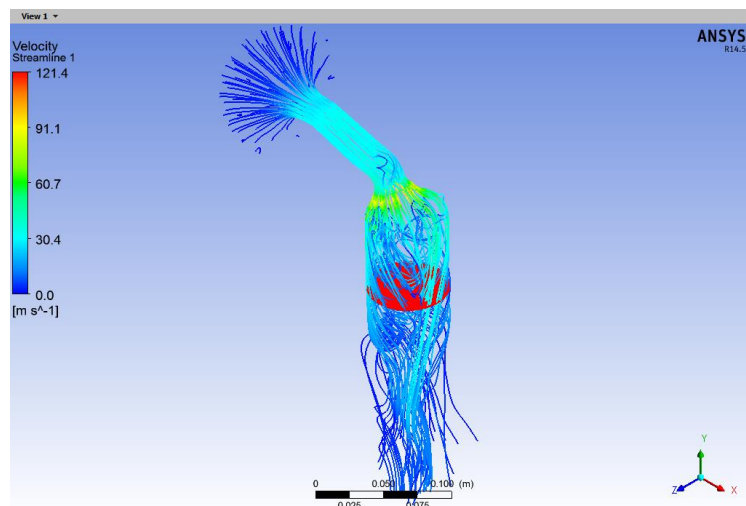


Figura 29. Línies de flux conducte modificat 3 mm

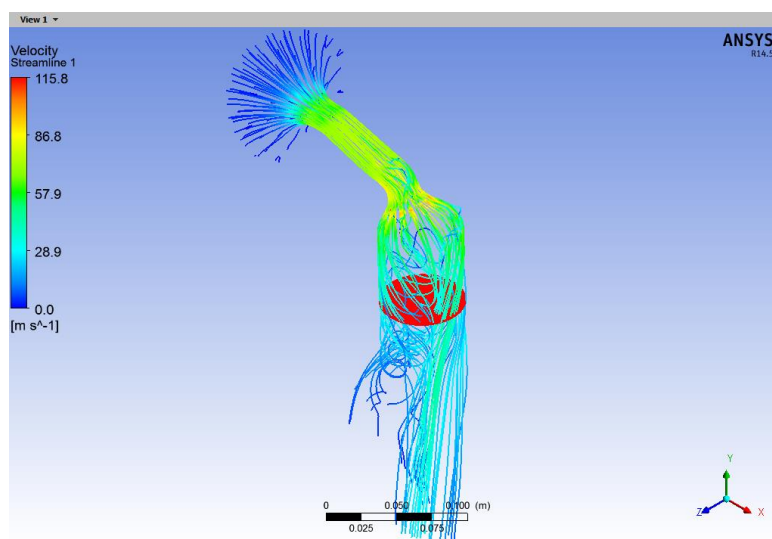


Figura 30. Línies de flux conducte modificat 6.7 mm

5.2.4 Vàlvula modificada

Els valors de cabal màssic i monitor de *swirl* per la vàlvula modificada i el conducte original (*Taula 4*):

Lv (mm)	\dot{m} (kg/s)	<i>swirl flow ratio</i>	% millora
0,5	3,0847E-03	5,00E-08	-0,67
1	6,2556E-03	5,00E-07	-0,37
2	1,1674E-02	2,00E-07	0,45
3	1,5916E-02	9,50E-07	-0,07
4	2,0717E-02	1,60E-06	-0,06
5	2,6309E-02	2,80E-06	0,09
6	3,1136E-02	2,10E-06	0,48
6,7	3,3502E-02	1,60E-06	0,60

Taula 4. Resultats vàlvula modificada

Per que fa a la vàlvula, els resultats de la simulació mostren una tendència molt interessant.

En obertures petites, la vàlvula nova dona pitjors resultats que la vàlvula original, en obertures mitges la diferència és menyspreable i per obertures grans obtenim la millora en el flux d'admissió.

Els resultats obtinguts confirmen la hipòtesi de que el disseny del conducte d'admissió és un dels punts claus de millora del rendiment del motor, mentre que la vàlvula original té la forma adequada des del punt de vista aerodinàmic.

Cal comentar que durant el procés d'investigació s'han provat molts dissenys alternatius de les vàlvules i aquesta és la que dona el millor resultat.

En tot cas el pas següent a la simulació hauria de ser la construcció del prototip i el seu assaig en el banc de flux.

A continuació es mostren els contorns de pressió, velocitat i línies de flux.

Pressions (Figura 31, Figura 32, Figura 33):

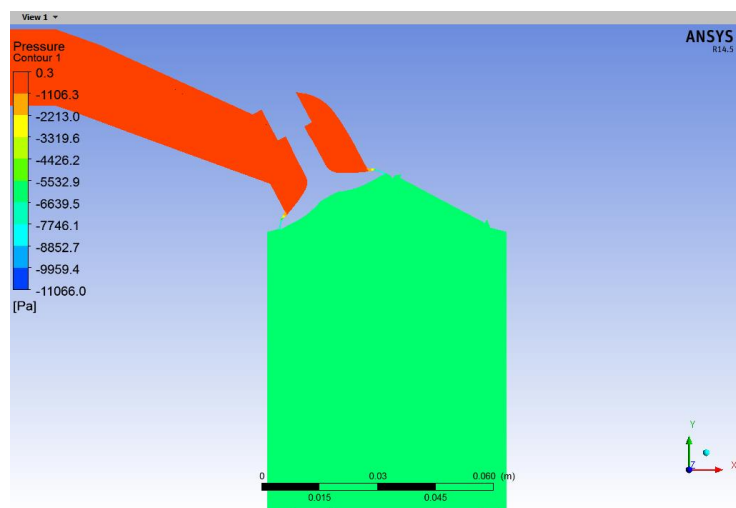


Figura 31. Pressions vàlvula modificada 0.5 mm

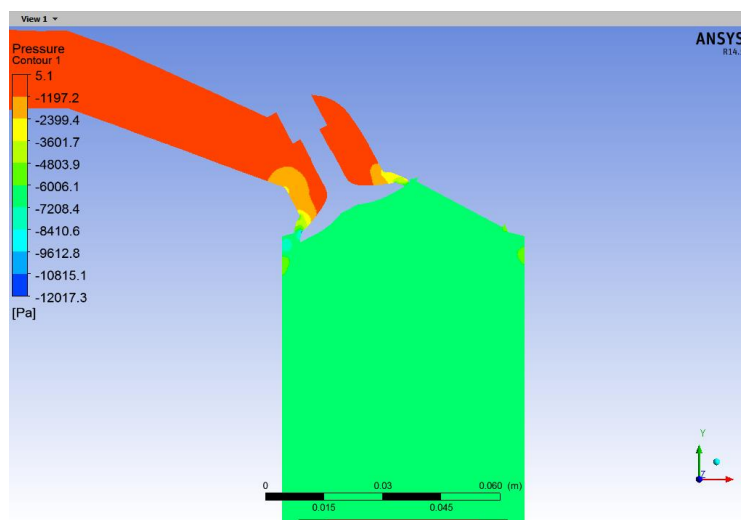


Figura 32. Pressions vàlvula modificada 3 mm

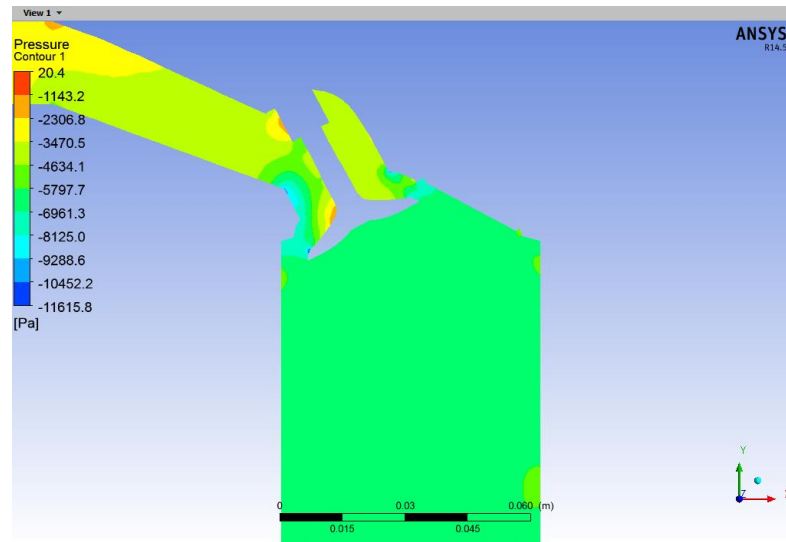


Figura 33. Pressions vàlvula modificada 6.7 mm

Velocitats (Figura 34, Figura 35, Figura 36):

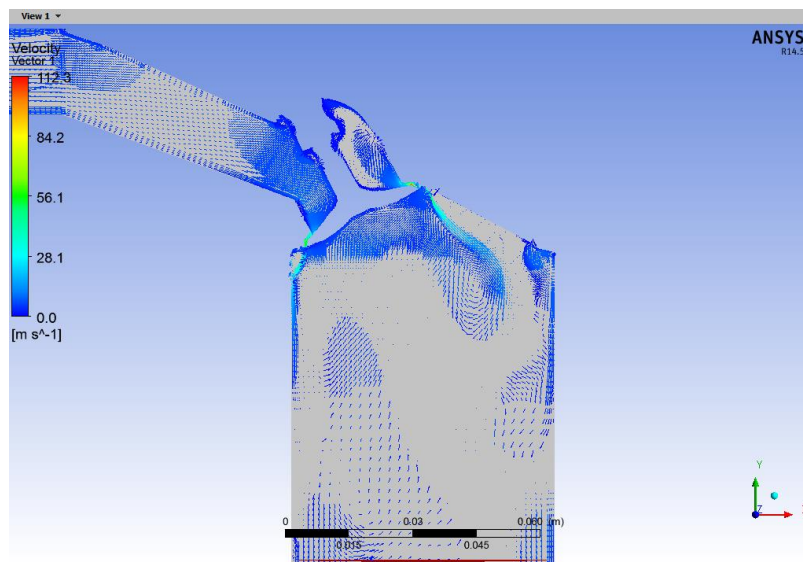


Figura 34. Vectors de velocitat vàlvula modificada 0.5 mm

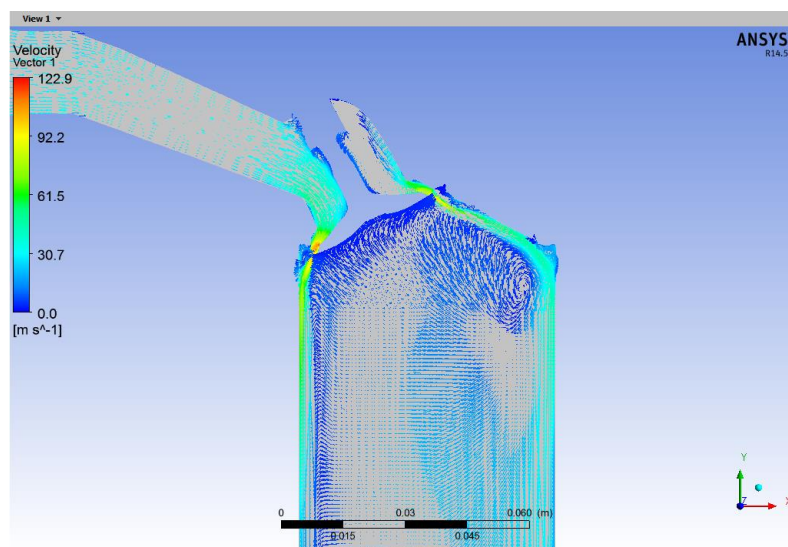


Figura 35. Vectors de velocitat vàlvula modificada 3 mm

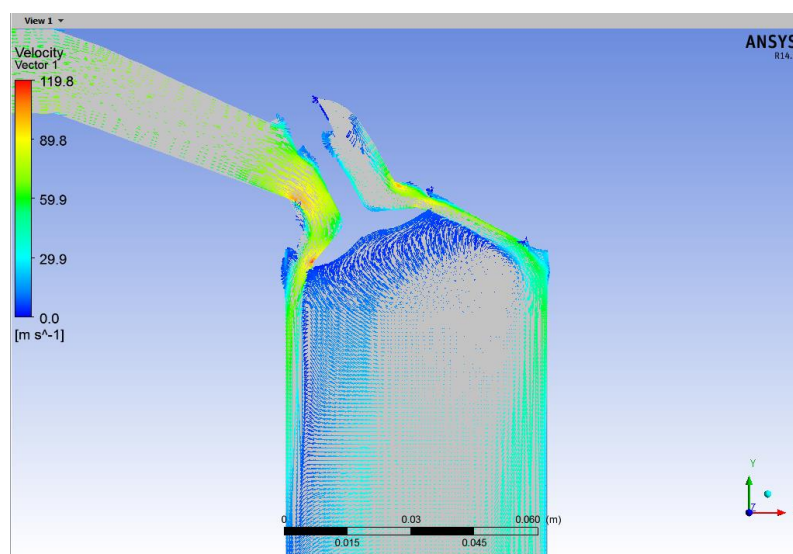


Figura 36. Vectors de velocitat vàlvula modificada 6.7 mm

Línies de flux (Figura 37, Figura 38, Figura 39):

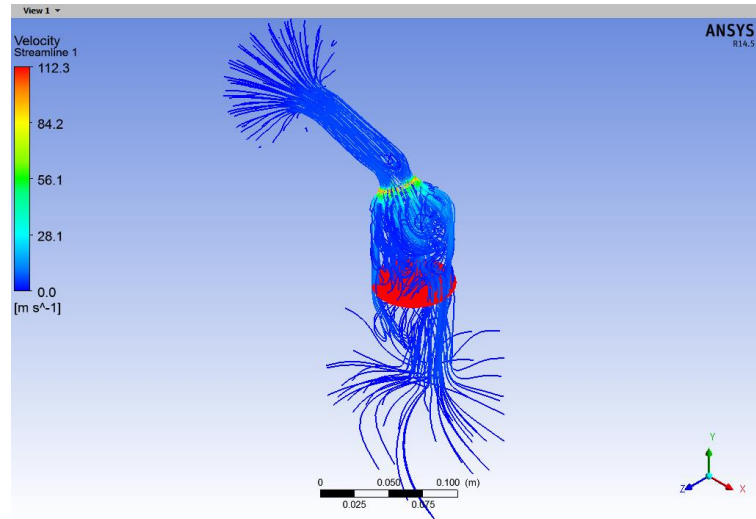


Figura 37. Línies de flux vàlvula modificada 0.5 mm

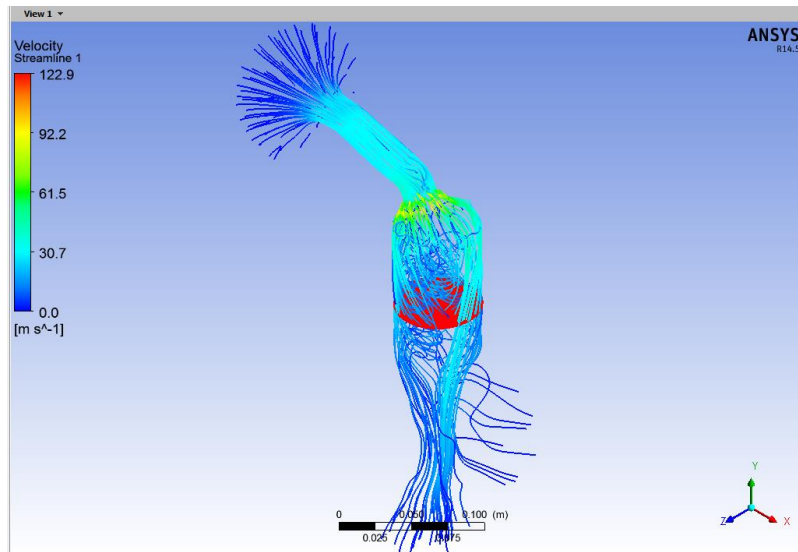


Figura 38. Línies de flux vàlvula modificada 3 mm

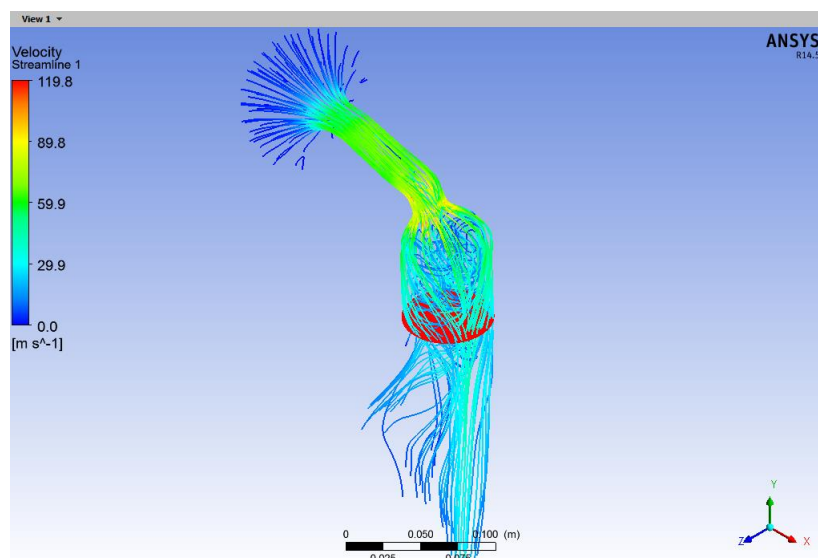


Figura 39. Línies de flux vàlvula modificada 6.7 mm

5.2.5 Vàlvula modificada i conducte modificat

La última configuració correspon a la combinació de la vàlvula nova i el port modificat. La idea és comparar l'eficiència del conjunt i cada modificació per separat. El pas final serà comparar tots els dissenys i triar un d'ells per la simulació *Cold Flow*. Els resultats es mostren a continuació en la *Taula 5*:

Lv (mm)	\dot{m} (kg/s)	swirl flow ratio	% millora
0,5	3,1214E-03	2,00E-08	0,51
1	6,4290E-03	4,00E-08	2,39
2	1,1977E-02	4,00E-07	3,06
3	1,6399E-02	3,50E-07	2,96
4	2,1532E-02	1,50E-06	3,88
5	2,7456E-02	3,30E-06	4,46
6	3,3187E-02	3,40E-06	7,10
6,7	3,6614E-02	3,50E-06	9,94

Taula 5. Resultats vàlvula nova i conducte modificat

La conclusió és següent: la combinació de conducte i vàlvula nous també proporcionen una millora de flux, però la vàlvula original i el port modificat proporcionen una millora de flux més gran.

La justificació és senzilla: la vàlvula nova s'ha modificat amb l'objectiu de donar més superfície de pas al flux, és a dir, s'ha eliminat el material en la zona de la copa. Però s'ha comprovat que la limitació principal consisteix en el disseny del conducte i la vàlvula original està dissenyada de manera correcta. Només per les obertures grans pròximes a 6 mm la vàlvula modificada permet guanyar una quantitat de flux apreciable.

Pressions (Figura 40, Figura 41, Figura 42):

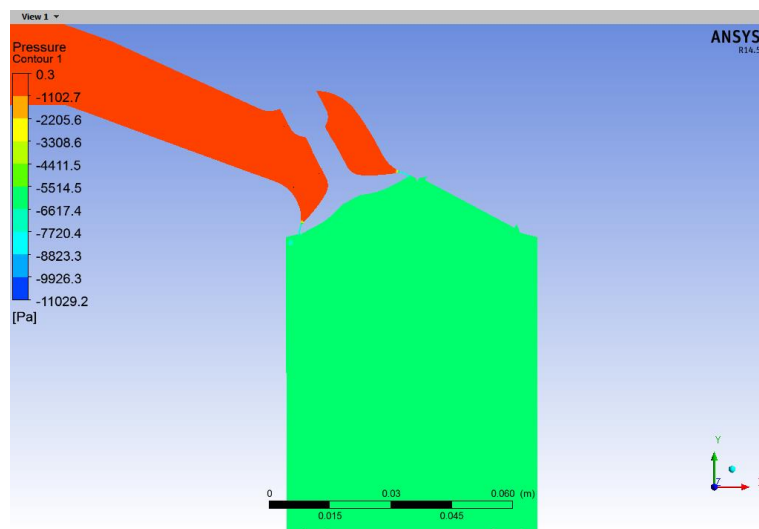


Figura 40. Vàlvula i conducte modificats 0.5 mm

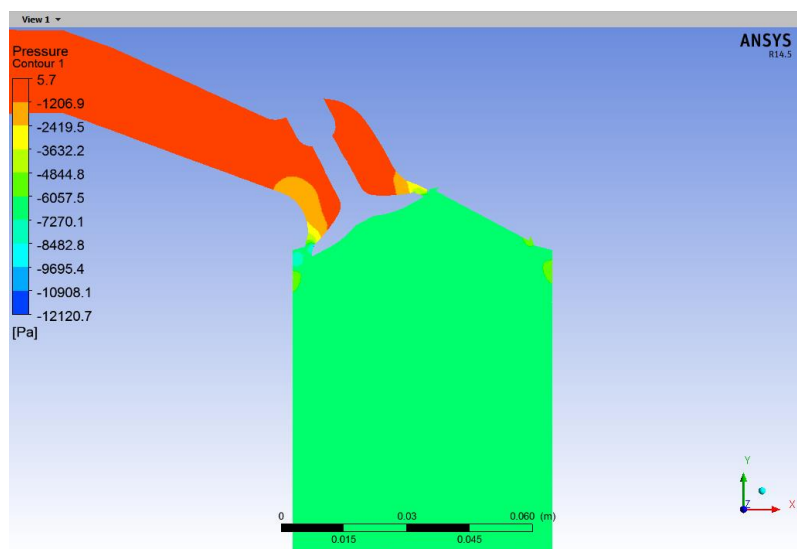


Figura 41. Vàlvula i conducte modificats 3 mm

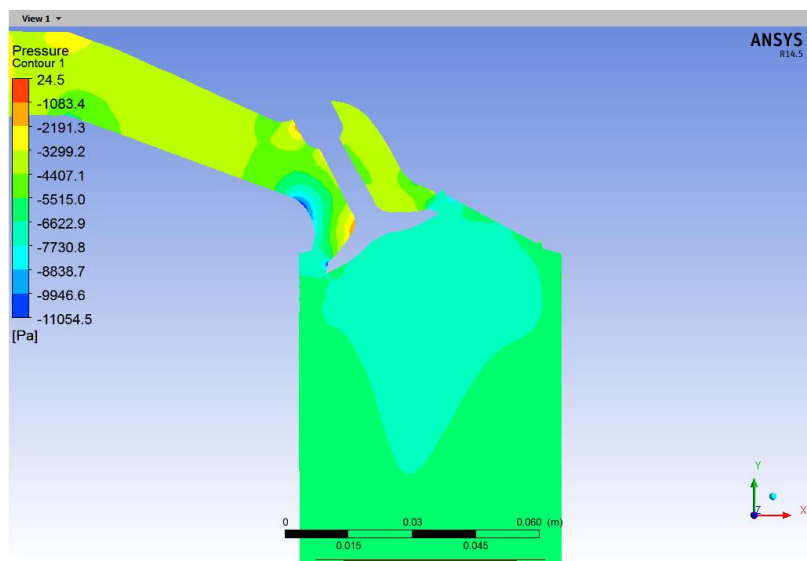


Figura 42. Vàlvula i conducte modificats 6.7 mm

Velocitats (Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46):

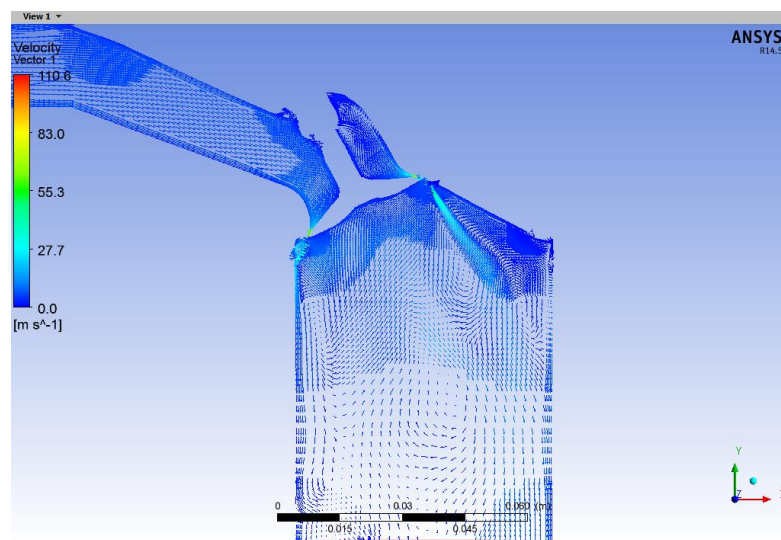


Figura 43. Vectors de velocitat vàlvula i conducte modificats 0.5 mm

Ampliant la zona d'interès podem observar que s'ha eliminat gairebé totalment els fenòmens aerodinàmics no desitjats (refluxos) i el comportament del flux és més uniforme (*Figura 44*):

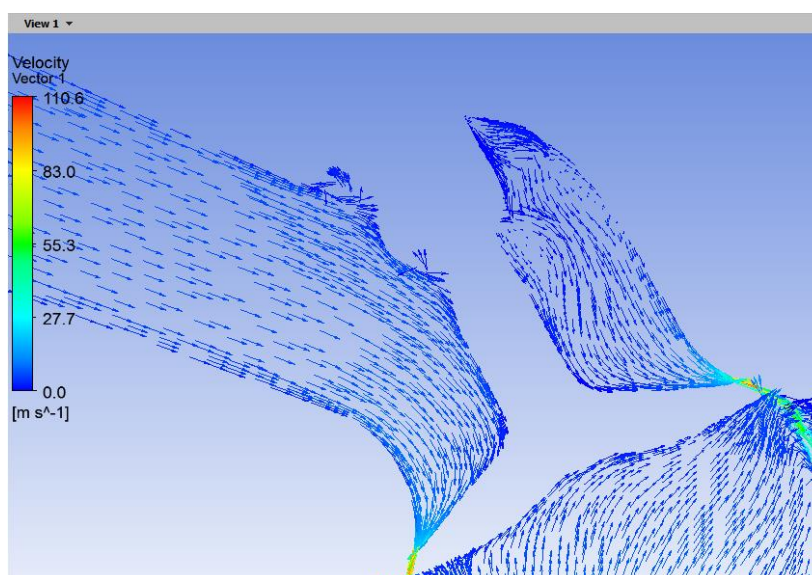


Figura 44. Vectors de velocitat vàlvula i conducte modificats 0.5 mm vista ampliada

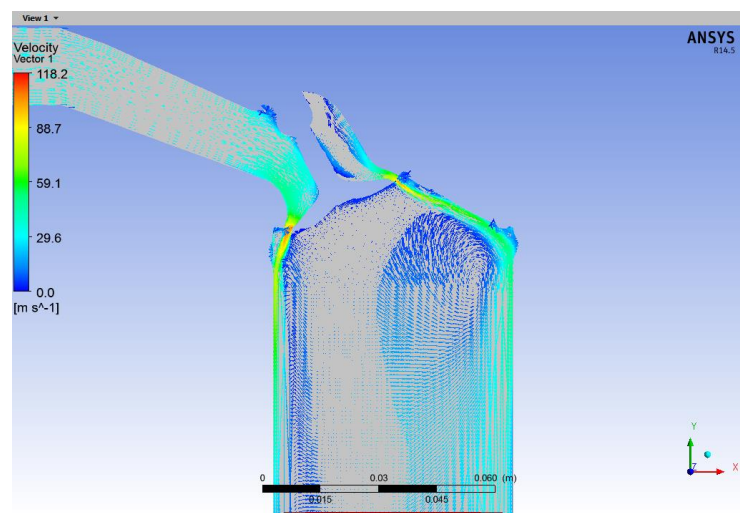


Figura 45. Vectors de velocitat vàlvula i conducte modificats 3 mm

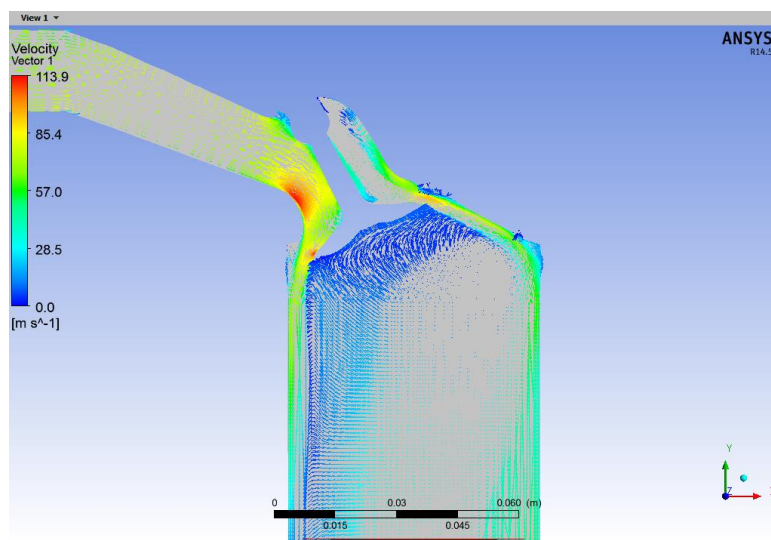


Figura 46. Vectors de velocitat vàlvula i conducte modificats 6.7 mm

Línies de flux (Figura 47, Figura 48, Figura 49):

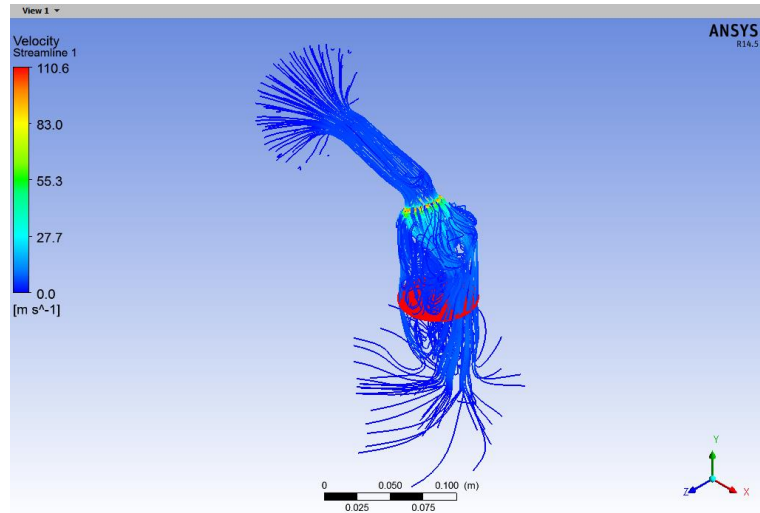


Figura 47. Línies de flux vàlvula modificada 0.5 mm

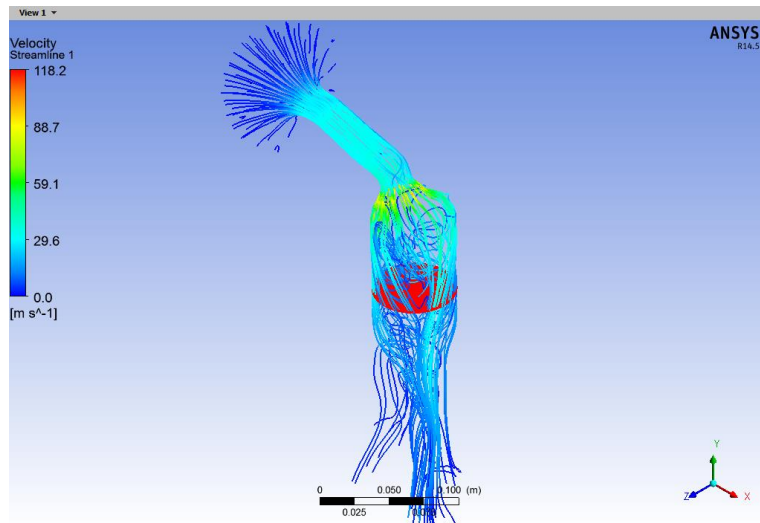


Figura 48. Línies de flux vàlvula modificada 3 mm

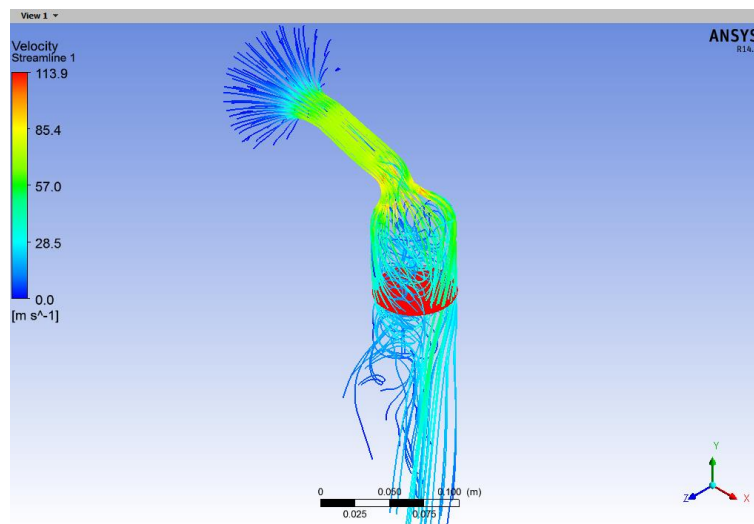


Figura 49. Línies de flux vàlvula modificada 6.7 mm

5.2.6 Anàlisi dels resultats

Anàlisi geometria original

Per començar, es comparen els resultats de simulació de la geometria original i les dades obtingudes en el banc de flux. Es calcula el coeficient de descàrrega fent servir les dades del flux màssic ideal. Les dades del coeficient de descàrrega experimental i el flux màssic ideal es pot trobar en l'Annex C . El coeficient de descàrrega experimental i simulat de la geometria original es representen en la *Taula 6*:

Lv (mm)	\dot{m} ideal (kg/s)	\dot{m} real (kg/s)	\dot{m} simulat (kg/s)	C _D exp.	C _D simulat
0,5	5,5980E-03	3,6212E-03	3,1057E-03	0,65	0,55
1	1,1196E-02	6,5916E-03	6,2787E-03	0,59	0,56
2	2,2392E-02	1,2535E-02	1,1622E-02	0,56	0,52
3	3,3588E-02	1,8262E-02	1,5927E-02	0,54	0,47
4	4,4784E-02	2,4529E-02	2,0728E-02	0,55	0,46
5	5,5980E-02	3,1053E-02	2,6284E-02	0,55	0,47
6	6,7175E-02	3,5049E-02	3,0988E-02	0,52	0,46
6,7	7,5013E-02	3,6360E-02	3,3304E-02	0,48	0,44

Taula 6. Coeficient de descàrrega simulat i experimental

I la representació gràfica del coeficient de descàrrega en funció d'obertura (*Figura 50*):

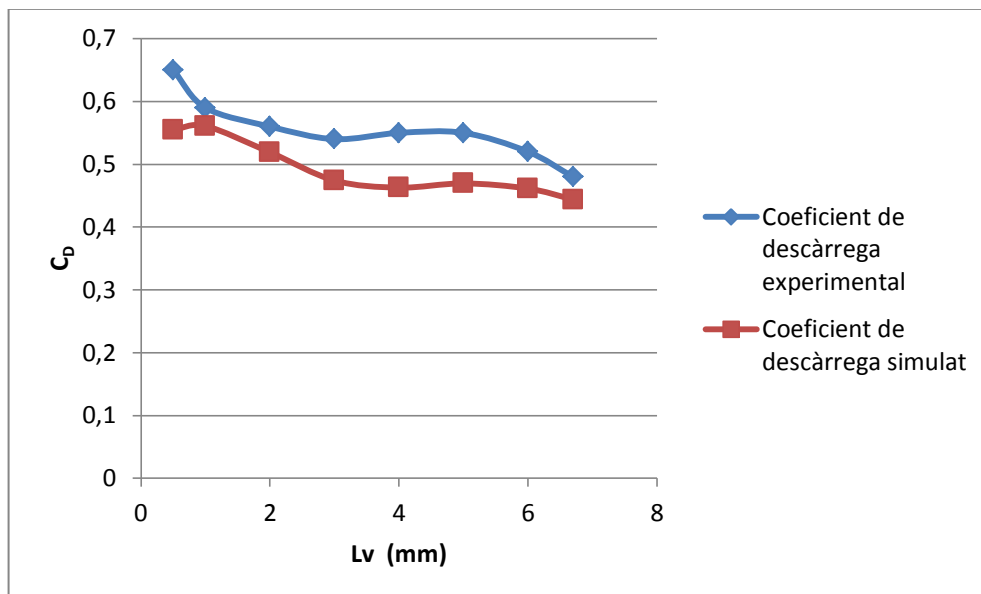


Figura 50. Coeficient de descàrrega experimental i simulat en funció d'obertura de la vàlvula

Podem veure que els resultats de la simulació i els valors teòrics se correlacionen i es pot utilitzar el coeficient de descàrrega de la simulació com la referència per la posterior avaluació de nous dissenys.

Si calculem l'error relatiu fent servir l'Equació 8:

$$error = \frac{\dot{m} \text{ real} - \dot{m} \text{ simulat}}{\dot{m} \text{ real}} * 100 \quad (Eq.8)$$

Observem a la *Taula 7* que l'error relatiu en el cas més desfavorable no supera el 15 %. La mitjana d'error relatiu és de 11.23 %

Lv (mm)	\dot{m} real (kg/s)	\dot{m} simulat (kg/s)	error (%)
0,5	3,6212E-03	3,1057E-03	14,24
1	6,5916E-03	6,2787E-03	4,75
2	1,2535E-02	1,1622E-02	7,28
3	1,8262E-02	1,5927E-02	12,79

4	2,4529E-02	2,0728E-02	15,50
5	3,1053E-02	2,6284E-02	15,36
6	3,5049E-02	3,0988E-02	11,59
6,7	3,6360E-02	3,3304E-02	8,40

Taula 7. Error relatiu comparant els cabals màssics

No obstant això, podem considerar els resultats obtinguts com acceptables i utilitzar les dades de simulació com a referència.

En l'apartat de conclusions es farà la valoració general del programa i es proposaran millores per augmentar la precisió dels resultats obtinguts.

Anàlisi de modificacions en el disseny original

Primerament, s'ha de numerar totes les simulacions realitzades:

- Conducte modificat i vàlvula original: el disseny del conducte d'admissió s'ha modificat per millorar les seves característiques aerodinàmiques.
- Conducte original i vàlvula modificada: el disseny de la vàlvula s'ha modificat amb l'objectiu d'augmentar el flux d'entrada. Prèviament, s'ha provat diferents dissenys i la vàlvula modificada representa la millor configuració que hauria de ser estudiada fent el prototip.
- Conducte modificat i vàlvula modificada: s'avalua l'efecte acumulatiu de dos canvis descrits anteriorment.

La idea de simular cada un dels cassos anteriors per separat s'ha realitzat per avaluar la magnitud d'importància de cada component citat anteriorment sobre el flux i el potencial de la seva millora.

A continuació, es presenten els cabals màssics obtinguts en cada cas comparats amb les dades de la simulació realitzada amb el disseny original (*Taula 8*):

	<i>original</i>	<i>conducte</i>	<i>valvula</i>	<i>conducte i valvula</i>
Lv (mm)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/s)
0,5	3,1057E-03	3,1527E-03	3,0847E-03	3,1214E-03
1	6,2787E-03	6,4855E-03	6,2556E-03	6,4290E-03
2	1,1622E-02	1,2152E-02	1,1674E-02	1,1977E-02
3	1,5927E-02	1,6488E-02	1,5916E-02	1,6399E-02
4	2,0728E-02	2,1636E-02	2,0717E-02	2,1532E-02
5	2,6284E-02	2,7555E-02	2,6309E-02	2,7456E-02
6	3,0988E-02	3,3253E-02	3,1136E-02	3,3187E-02
6,7	3,3304E-02	3,6537E-02	3,3502E-02	3,6614E-02

Taula 8. Cabals màssics en funció d'obertura de la vàlvula d'admissió

Si representem els cabals de la *Taula 8* visualitzem la diferència (*Figura 51*):

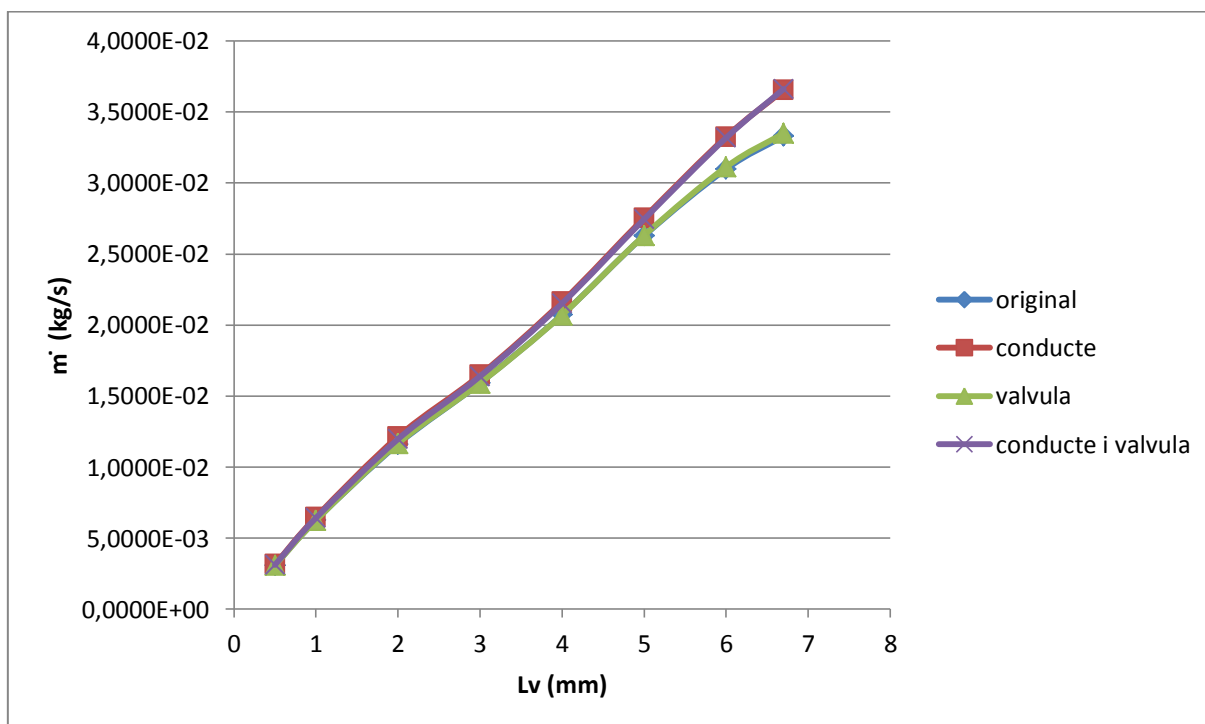


Figura 51. Cabals màssics de cada disseny en funció d'obertura

A primera vista es pot determinar que les línies corresponents a la millora en el conducte (color vermell) i el conjunt de conducte i vàlvula nous (color lila) se solapen. Això és perquè l'efecte del conducte millorat és dominant i la vàlvula nova no introdueix una millora radical. Aquest fet és visible, ja que la corba de la vàlvula nova (verd) se sobreposa a la corba original (blava).

Els coeficients de descàrrega corresponents (*Taula 9*):

	<i>original</i>	<i>conducte</i>	<i>valvula</i>	<i>conducte i valvula</i>
Lv (mm)	C _D	C _D	C _D	C _D
0,5	0,55	0,56	0,55	0,56
1	0,56	0,58	0,56	0,57
2	0,52	0,54	0,52	0,53
3	0,47	0,49	0,47	0,49
4	0,46	0,48	0,46	0,48
5	0,47	0,49	0,47	0,49
6	0,46	0,50	0,46	0,49
6,7	0,44	0,49	0,45	0,49

Taula 9. Coeficients de descàrrega per diferents dissenys

I la representació gràfica (*Figura 52*):

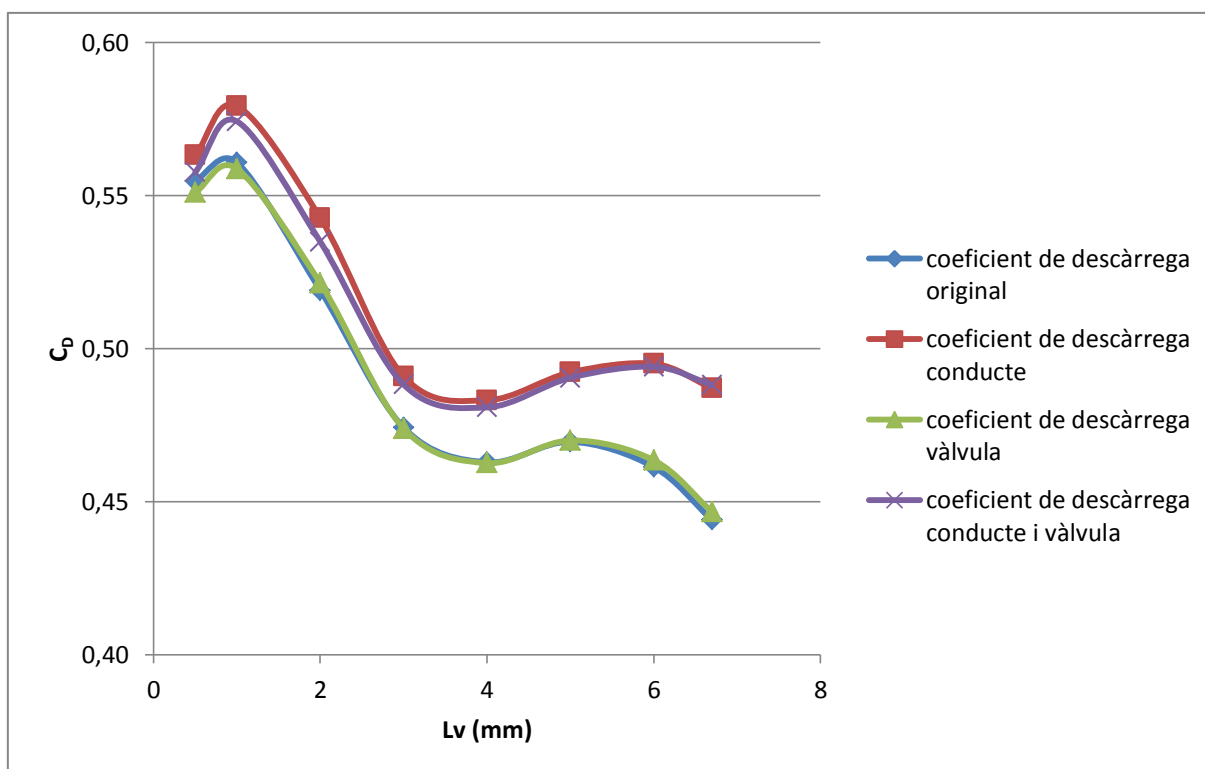


Figura 52. Representació gràfica del coeficient de descàrrega de cada disseny

Numèricament, aquest diferència (millora) es calcula fent servir l'Equació 7 i els valors corresponents són (*Taula 10*):

	conducte	valvula	conducte i valvula
Lv (mm)	% millora	% millora	% millora
0,5	1,52	-0,67	0,51
1	3,29	-0,37	2,39
2	4,56	0,45	3,06
3	3,52	-0,07	2,96
4	4,38	-0,06	3,88
5	4,84	0,09	4,46
6	7,31	0,48	7,10
6,7	9,71	0,60	9,94
mitjana ponderada	6,14	0,24	5,79

Taula 10. Millora en el flux segons la geometria emprada

Analitzant les dades obtingudes podem destacar els aspectes següents:

- El conducte modificat i la vàlvula original presenten les millors característiques des del punt de vista de dinàmica de fluid i permeten obtenir una millora de flux que varia de 1.5 % a obertures petites fins a 9.7 % a obertures màximes. El percentatge de millora ponderat és de 6.14 %. La mitjana ponderada es calcula fent servir els fluxos màssics com a pesos i el percentatge de millora com a sèries de dades per la mitjana.
- La vàlvula nova a obertures de 0.5mm i 1mm genera pèrdua de flux comparant amb la vàlvula original. En l'interval de 2 mm a 5 mm podem dir que el flux és equivalent al flux amb la vàlvula original (obertura de 2 mm mostra l'augment de flux. La manera de comprovar-lo seria construint el prototip i fer assaigs). Per obertures de 5 mm a l'obertura màxima de 6.7 la massa d'aire admesa és més gran que per la vàlvula original. El percentatge de millora ponderat és de 0.24 %
- El conjunt conducte-vàlvula nous en general dona resultats similars al cas del conducte modificat, proporcionant menys flux en baixes obertures i més per l'obertura gran. El percentatge de millora ponderat és de 5.79 %
- El disseny del conducte d'admissió és el factor de major importància per l'eficiència d'admissió.

El pas següent és analitzar el monitor de *swirl* en el pla de control per cada geometria. S'ha de comentar que aquest paràmetre sense unitats és calcula internament per programari i serveix com aproximació per avaluar aquest paràmetre posteriorment.

Per l'avaluació del *swirl* durant la fase de preprocés es pot definir un numero de plans de mesura il·limitat i avaluar-lo en cada un d'aquest. Per l'estudi només controlarem aquest paràmetre en el pla definit anteriorment, tal i com s'especifica en l'Annex F.

A continuació representem el valor absolut del monitor de *swirl* segons l'obertura de la vàlvula de la geometria original i els dissenys proposats (*Taula 11*):

	original	conducte	valvula	conducte i valvula
Lv (mm)	<i>swirl flow ratio</i>	<i>swirl flow ratio</i>	<i>swirl flow ratio</i>	<i>swirl flow ratio</i>
0,5	3,00E-08	7,00E-08	5,00E-08	2,00E-08
1	1,00E-07	2,40E-07	5,00E-07	4,00E-08
2	0	9,00E-07	2,00E-07	4,00E-07
3	4,00E-07	1,50E-07	9,50E-07	3,50E-07
4	1,40E-06	2,40E-06	1,60E-06	1,50E-06
5	2,50E-06	2,00E-06	2,80E-06	3,30E-06
6	2,60E-06	3,50E-06	2,10E-06	3,40E-06
6,7	1,60E-06	3,50E-06	1,60E-06	3,50E-06

Taula 11. Monitor de swirl en el pla de control

I la representació gràfica (*Figura 53*):

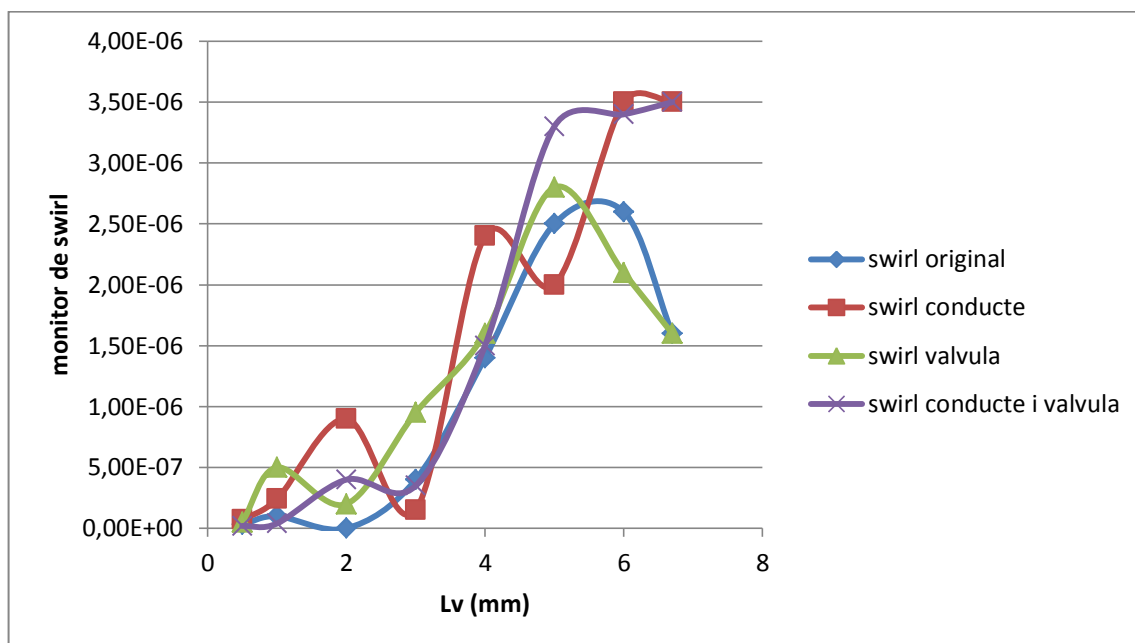


Figura 53. Monitor de swirl de cada disseny en funció de l'obertura de la vàlvula

- El disseny corresponent al conducte modificat juntament amb el del conducte i vàlvula nous permet generar el *swirl* més intensiu en tot el rang d'obertures si es compara amb el disseny original.
- La vàlvula nova millora la generació de swirl a obertures petites (fins a 5 mm) comparant amb la geometria original.

Tal i com s'ha comentat abans, aquests monitor permet obtenir una idea aproximada del *swirl*, mentre que altres moviments característics com *tumble* i *cross tumble* no s'avaluen.

Malgrat això, a partir de les dades aproximades podem triar la geometria per ser avaluada en l'anàlisi *Cold Flow*. Anteriorment s'ha comentat que el conducte modificat sense introduir els canvis en la vàlvula ja comporta la millora considerable de les prestacions del motor. Però la proposta serà avaluar el conjunt conducte i vàlvula nous.

5.3 Anàlisi *Cold Flow*

5.3.1 Descripció

L'anàlisi *Cold Flow* consisteix en la modelització de flux d'aire i la injecció de combustible durant el cicle transitori de funcionament de motor sense reaccions químiques ni combustió. L'objectiu és capturar el moment de formació de la barreja (si hi ha injecció directa) dins del cilindre en condicions de la geometria en moviment o estudiar flux d'aire que entra en el cilindre en condicions turbulentes per conducte d'admissió, interaccionant amb la vàlvula corresponent amb la posterior compressió. Durant el cicle de funcionament l'estudi es concentra en el control i avaluació de la turbulència a l'entrada i durant la compressió, juntament amb el procés entremig.

Aquesta informació és essencial si es vol assegurar que les condicions en el cilindre al final de la compressió són adequades per a la combustió eficient. Tal i com s'explicava en els capítols anteriors, els nivells de turbulència alts faciliten la propagació de flama i resulten en una combustió completa durant la fase de potència. A més, l'aire ben barrejat és fonamental per garantir la relació aire/combustible al llarg del procés de combustió.

Hi ha l'opció d'estudiar el procés de barreja de combustible/aire per motors amb la injecció directa dins del cilindre, igual que els processos d'estratificació de la càrrega.

Com a limitacions s'ha de destacar que en la simulació no s'inclouen els canvis significatius termodinàmics corresponents a la combustió, aleshores la part del cicle corresponent a la combustió i escapament no reflecteixen els processos reals. A més, repetir aquest anàlisi en condicions reals per la validació de resultats no és fàcil. Els procediments experimentals per determinar la velocitat de partícules (PIV) i altres dades requereixen unes tècniques molt complexes, com l'ús de pistons i cilindres transparents, repetició pels règims de gir diferents.

Configuració del model en CFD per a l'anàlisi de flux en fred implica treball addicional en configurar el moviment de vàlvules i de pistó, juntament amb el procediment clàssic.

Atès que el volum en el cilindre està canviant de forma en tot el cicle del motor, el mallat també pateix el canvi. Això comporta la creació de zones de malla dinàmica.

A més, aquest anàlisi és un problema computacional transitori. Tot el moviment geomètric és una funció d'un sol paràmetre: la posició del cigonyal en la seva rotació, o d'angle del cigonyal.

El pre-processament de la geometria en general sol ser lent i difícil. Aquí, s'ha de separar o descompondre la geometria en parts mòbils i fixes. Qualsevol error en aquesta etapa pot conduir a errors durant el procés de càlcul o directament alterar la solució. El temps d'execució pot ser bastant llarg, ja que el moviment es resol normalment amb molts passos que representen un temps relativament petit i en general corresponen a 0.25 graus d'angle del cigonyal. Per obtenir resultats precisos la simulació s'executa durant dos o tres cicles per eliminar els transitoris inicials.

Finalment, s'ha de poder extreure la informació útil de tot el conjunt de dades generat.

En conclusió, l'anàlisi de flux en fred és necessari per modelar el cicle de funcionament del motor sense reaccions i avaluar les turbulències produïdes durant l'admissió i compressió (*swirl* ràtio, *tumble* i *cross tumble* ràtio) que són indicadores de la combustió eficient. Cal destacar que l'anàlisi de flux en fred és el pas previ necessari per la modelització de la combustió i com a conseqüència la simulació de tot el cicle del motor.

5.3.2 Resultats de la geometria original

Al final del càlcul de la solució obtenim les gràfiques de *swirl*, *tumble* i *cross tumble*, que serviran com a punt de referència per comparar els resultats.

A més, en el report generat tenim la visualització de les velocitats en funció d'angle de cigonyal (*Figura 54*), el mallat dinàmic i els monitors de control.

En la *Figura 55* podem observar els resultats de la ràtio de *swirl* en funció de l'angle de cigonyal. La *Figura 56* mostra la ràtio de *tumble* i la *Figura 57* – el *cross tumble* ràtio.

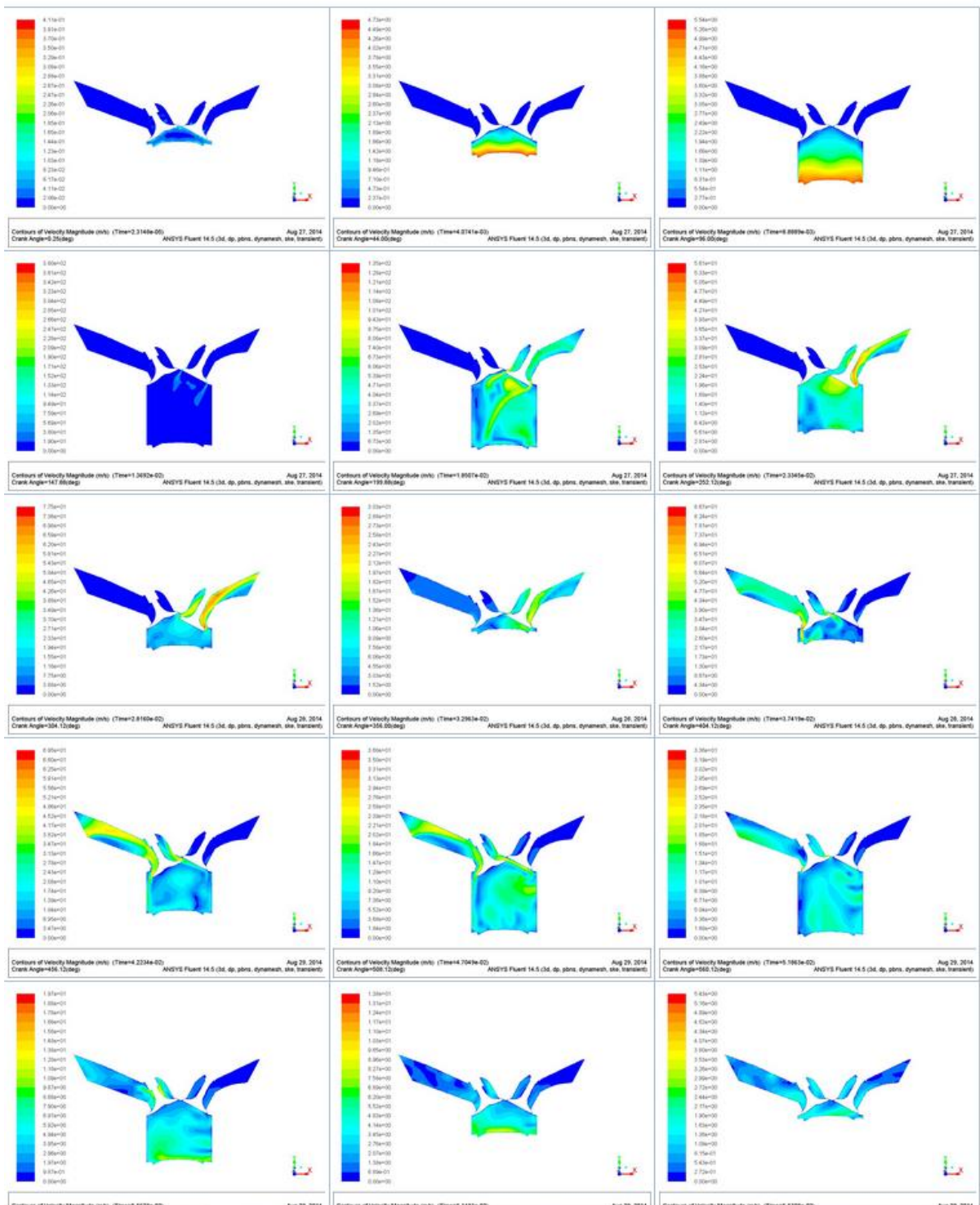


Figura 54. Contorns de velocitat en funció d'angle de cigonyal cada 50 graus aproximadament

Chart 2. Swirl Ratio

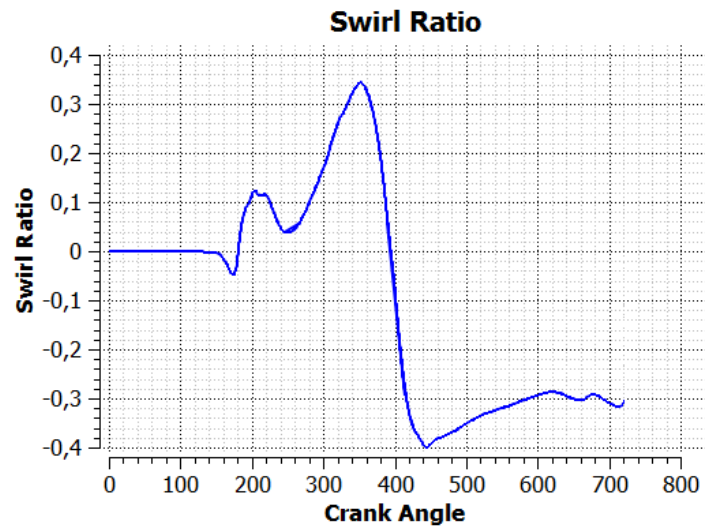
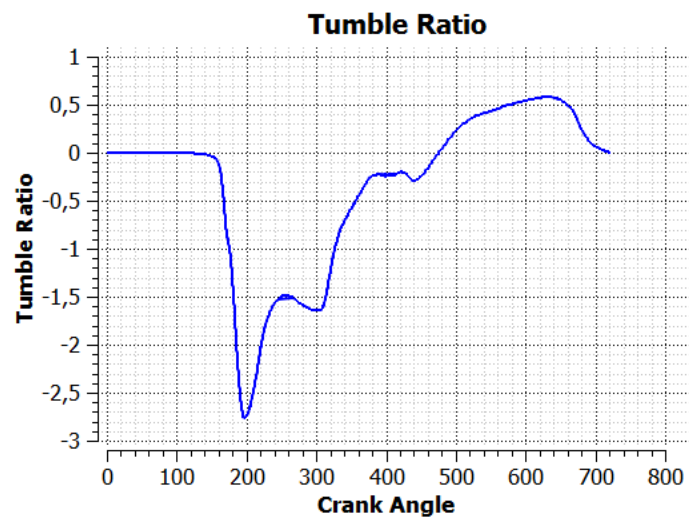
*Figura 55. Representació de la ràtio de swirl en funció de l'angle de cigonyal*

Chart 3. Tumble Ratio

*Figura 56. Representació de la ràtio de tumble en funció de l'angle de cigonyal*

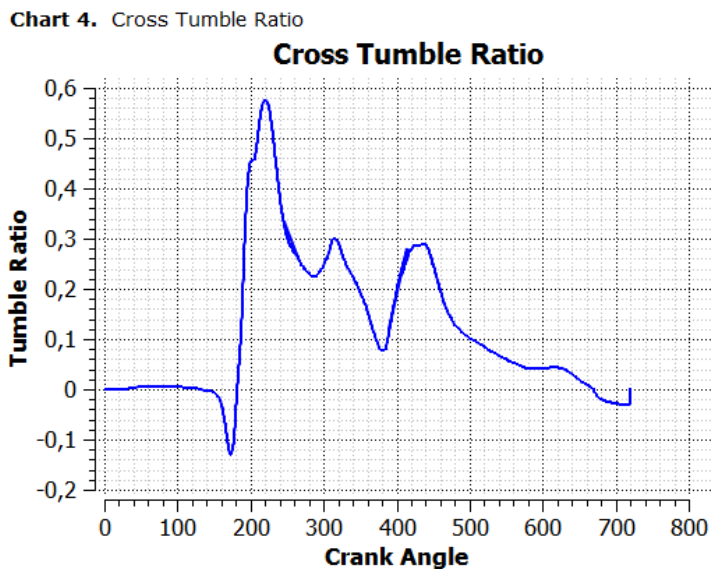


Figura 57. Representació de la ràtio de cross tumble en funció de l'angle de cigonyal

De les gràfiques anteriors ens interessa la zona corresponent a l'admissió. Aquesta comença a partir d'angle de 315 graus, en el moment quan comença l'obertura de la vàlvula d'admissió (Annex A).

Analitzant les gràfiques podem dir que la ràtio de *swirl* arriba al seu màxim absolut (-0.4) en l'angle 440 graus de cigonyal, amb mitjana igual a -0.2. El *tumble* comença de -0.9, arribant a 0.58 i acaba desapareixent. El *cross tumble* comença de 0.25, oscil·la al voltant d'aquest valor acaba convertint-se en 0.

5.3.3 Geometria modificada resultats

Les dades obtingudes fent simulacions sobre la geometria modificada del conducte i la vàlvula nova:

Velocitats en funció d'angle (Figura 58):

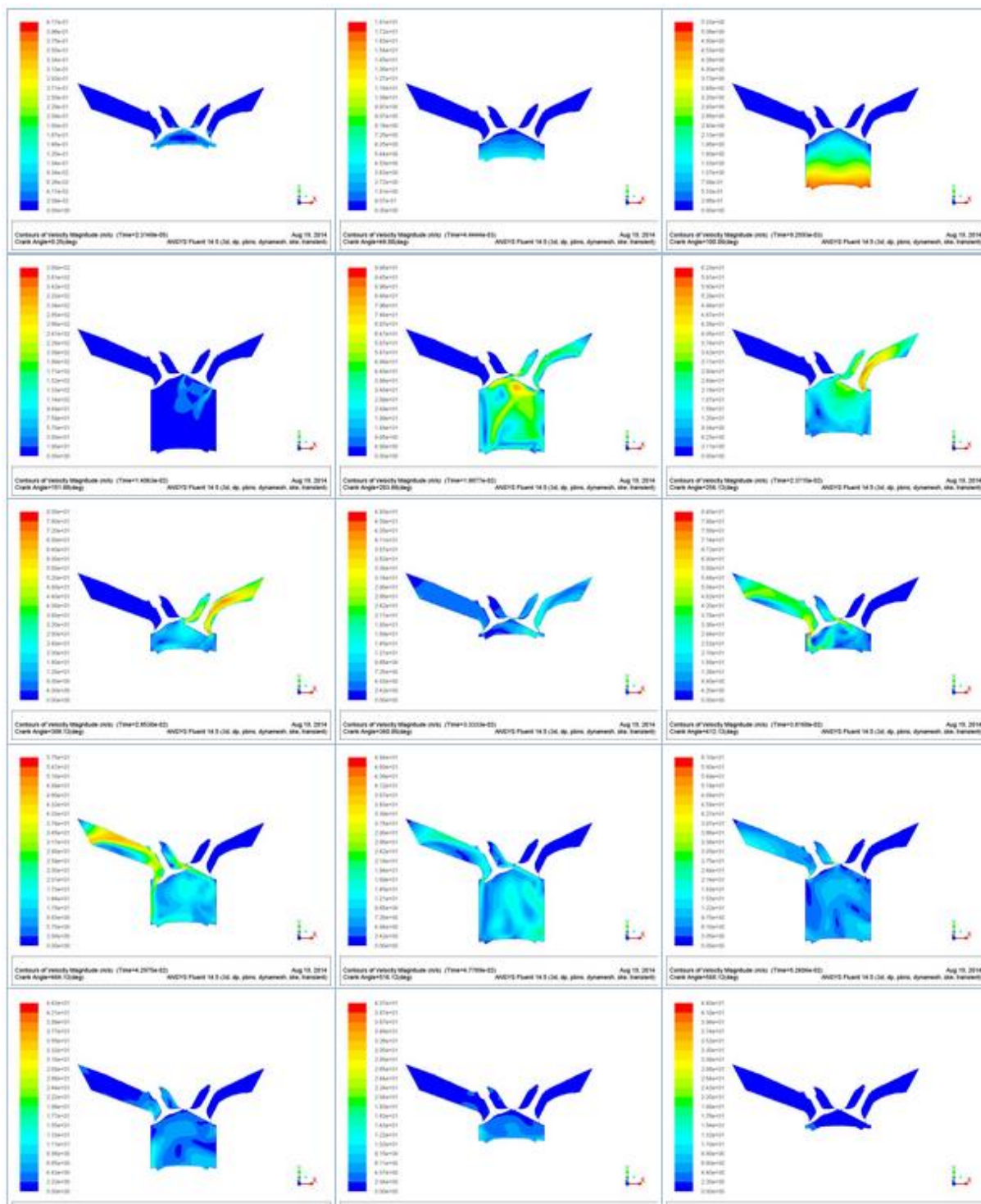


Figura 58. Velocitats en funció de l'angle de cigonyal cada 50 graus aproximadament

Les ràtios controlats: Swirl (Figura 59), Tumble (Figura 60), Cross Tumble (Figura 61)

Chart 2. Swirl Ratio

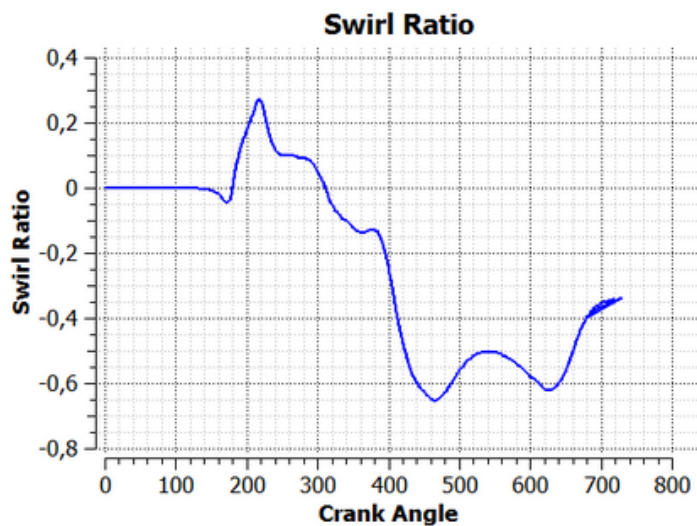


Figura 59. Ràtio de swirl geometria modificada

Chart 3. Tumble Ratio

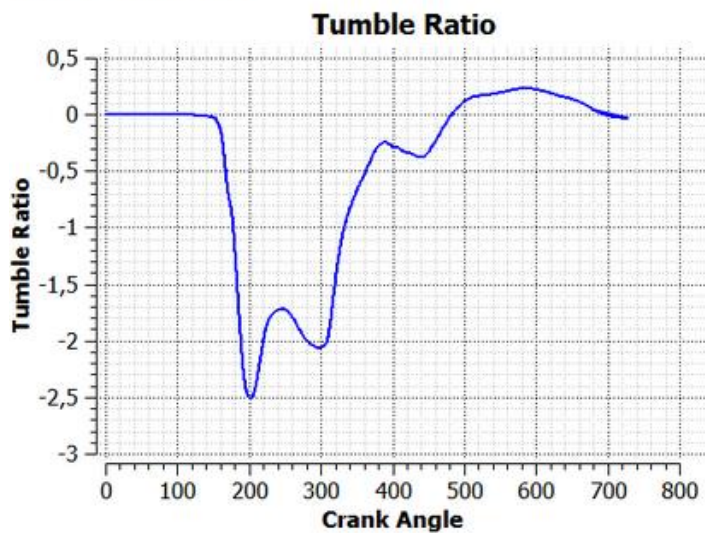


Figura 60. Ràtio de tumble geometria modificada

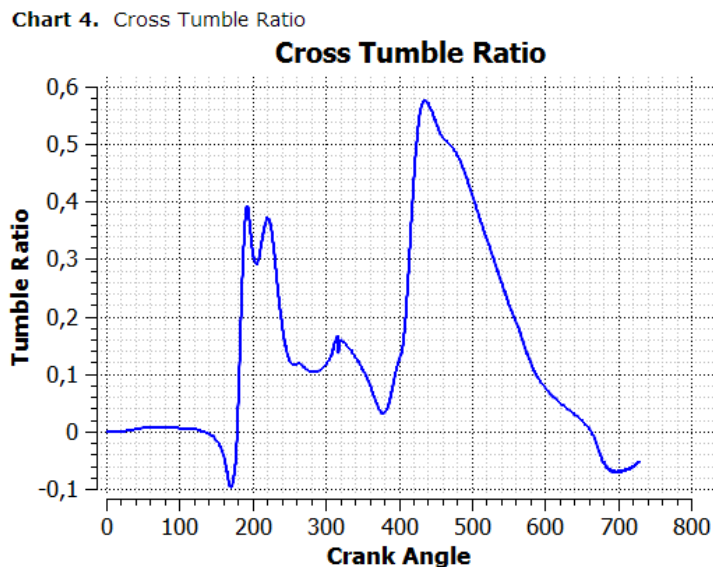


Figura 61. Ràtio de cross tumble geometria modificada

Analitzant les gràfiques podem dir que la ràtio de *swirl* arriba al seu màxim absolut (-0.65) en l'angle 440 graus de cigonyal, amb la mitjana igual a -0.45. El *tumble* comença de -1.5, arribant a 0.5 i acaba desapareixent a 720 graus de cigonyal. El *cross tumble* varia de 0.15 a 0.55 i acaba convertint-se en 0.

5.3.4 Avaluació dels resultats

Per la millor comprensió dels resultats representem les gràfiques de les ràtios calculades en funció de l'angle de la geometria original i modificada. Representem només la fase d'admissió (a partir de 330 graus, afegint 15 graus per esmorteir els efectes anteriors).

La comparació de les ràtios anteriors es pot observar a la *Figura 62*, *Figura 63* i *Figura 64*:

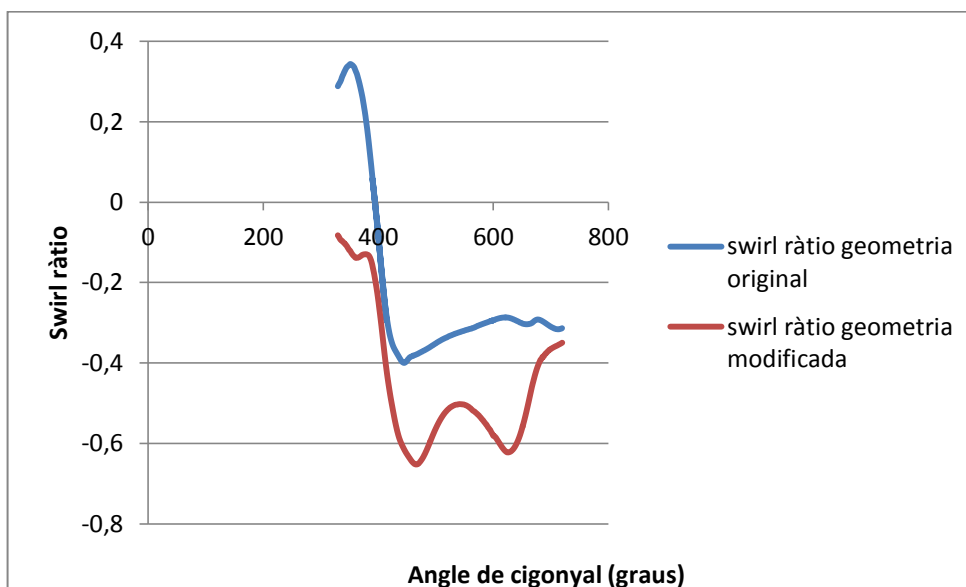


Figura 62. Comparació de les ràtios de swirl

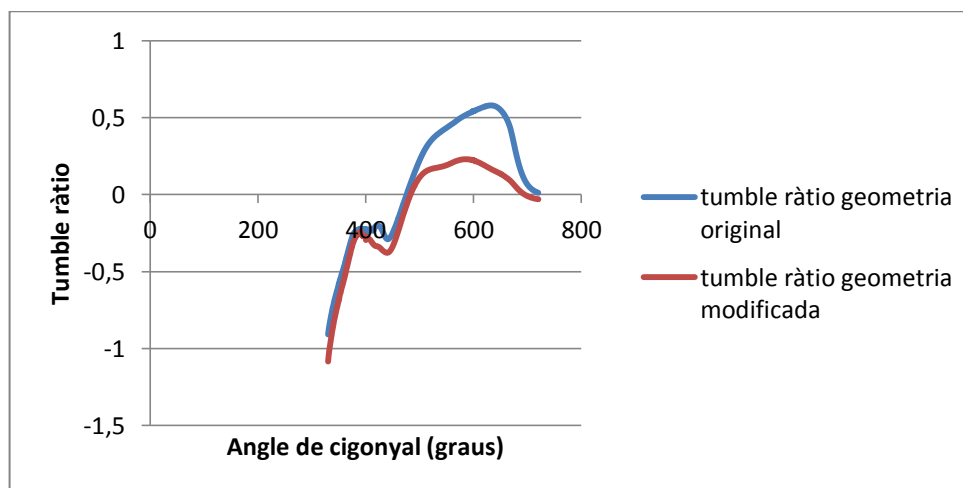


Figura 63. Comparació de les ràtios de tumble

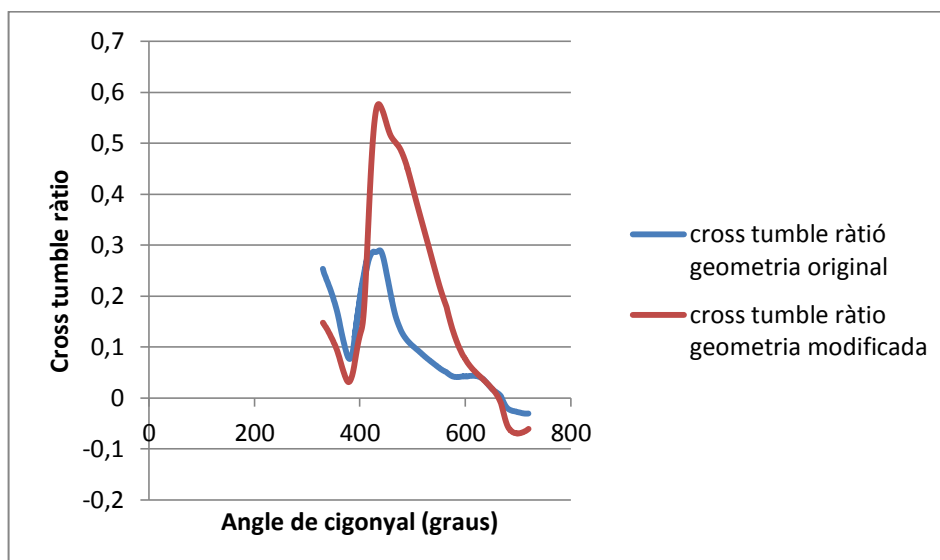


Figura 64. Comparació de les ràtios cross tumble

S'observa que la geometria modificada (corba vermella), representada pel conjunt conducte-vàlvula presenta millors característiques de *swirl* i *cross tumble* en valor absolut, mentre que la ràtio de *tumble* ha tingut una disminució. En tot cas, la ràtio de *swirl*, el paràmetre característic en motors amb dues vàlvules per cilindre, s'ha augmentat i per tant podem afirmar que la millora introduïda per l'anàlisi *Port Flow* també afecta positivament la generació del moviments de *swirl* i *tumble* (concretament *cross tumble*).

6. RESUM DEL PRESSUPOST

Les despeses derivades en concepte de disseny i desenvolupament del present projecte són de **5.881,81€ (CINC MIL VUIT-CENTS VUITANTA-UN euros amb VUITANTA-UN cèntims)**. El pressupost detallat es pot trobar en el document PRESSUPOST.

7. CONCLUSIONS

Després d'analitzar les dades de les simulacions desenvolupades amb el programari IC Engine en dos tipus de proves realitzades i aportant l'experiència pròpia d'ús del *toolbox*, s'ha arribat a les conclusions següents:

7.1 Avaluació del *software*

En general, el *toolbox* utilitzat permet treballar de forma còmode i ordenada amb les dades obtingudes augmentant l'eficiència d'estudi i reduint el temps necessari. És a dir, el procediment repetitiu de preprocés per diferents configuracions d'estudi, el mallat, la inicialització de models físics i de solució, la recollida de les dades per posterior anàlisi i moltes subrutines internes – els punts anteriors s'automatitzen d'acord amb la configuració d'estudi permetent al dissenyador concentrar el seu esforç sobre la part creativa del procés.

Cal destacar la facilitat de programació de les simulacions en condicions del temps transitori (*Cold Flow*). L'estructura seqüencial del *toolbox* permet inicialitzar el procés seguint els passos mínims necessaris.

Com a contrapartida cal destacar la importància de correcte importació de la geometria i definició de tots els paràmetres que són necessaris per programa. Qualsevol error durant la fase de configuració pot provocar errors greus en la solució obtinguda o simplement no permetre continuar el procés organitzat de forma seqüencial.

Respecte a les necessitats computacionals, podem dir que es necessita més potència de càlcul degut a l'alt grau d'automatització i ajustos més específics del mallat i del *solver*, comparant amb el *software* no especialitzat d'anàlisi fluidodinàmic.

Un dels punts a destacar és la generació del report al final de cada simulació. Aquest document conté tots els monitors de la solució creats durant el procés de la configuració de simulació, els arxius que visualitzen el flux d'aire en el conducte i tota la informació bàsica necessària per la correcte comprensió i avaluació dels resultats. Malgrat això, la generació

automàtica no sempre s'executa correctament i es demana la intervenció i la correcció del procés per part del projectista.

La hipòtesi que s'ha plantejat a base de les dades obtingudes mesurant el *Flow Rate* en el pla de mesura de *swirl* durant l'anàlisi *Port Flow* s'ha confirmat executant l'anàlisi *Cold Flow*. Aquest fet confirma la possibilitat d'avaluar el potencial de millora de moviments coherents fent assaigs sobre la geometria estàtica amb el programari utilitzat.

7.2 Avaluació del disseny original del motor

Comparant les dades de la geometria original i les modificacions aplicades podem treure la conclusió que el motor estudiat té el potencial de millora de l'admissió. Introduint canvis en el conducte d'admissió s'aconsegueix millorar el coeficient de descàrrega i al mateix temps generar el *swirl* i *cross tumble* més intensiu.

El disseny de la vàlvula original és adequat però hi ha un potencial de millora. De tota manera, l'esforç d'estudi de dinàmica de flux i l'aplicació de dissenys innovadors s'ha de concentrar en el conducte d'admissió. L'estudi realitzat mostra que lleugers canvis en els punts crítics de la geometria del conducte millora considerablement la massa d'aire aspirat.

7.3 Propostes de millora

S'ha vist que els resultats de la simulació realitzada amb el programa tenen un error comparant amb les dades obtingudes en el banc de flux (*Port Flow*).

La possible solució per millorar aquest aspecte i obtenir uns resultats més exactes poden ser:

- Obtenció del model 3D de la geometria de culata i vàlvules amb la màquina de mesura per coordenades o escàner 3D.
- Durant la fase d'importació de geometria per *Port Flow* hi ha la possibilitat de crear uns dipòsits tranquil·litzadors més grans per tal d'evitar les variacions innecessàries degudes a l'entrada i sortida del flux en la geometria d'anàlisi. Aquest fet comportaria

l'augment dels elements del mallat, com a conseqüència, el temps necessari per trobar la solució.

- Utilitzar el mallat amb més elements. La conseqüència seria l'augment del temps de càlcul.
- Criteris de convergència més estrictes. Això comportaria l'augment del temps de càlcul.
- Parametrització de variables. Aquest procediment permet controlar els paràmetres de sortida establerts durant la fase de preprocés en funció d'un paràmetre d'entrada, per exemple, l'obertura de la vàlvula (*Port Flow*) o règim de gir del motor (*Cold Flow*). La dificultat principal és que no es pot controlar els processos entremitjos, qualsevol error pot aturar el procés de càlcul.

El pas següent a l'anàlisi i proposta de dissenys amb millors característiques seria la construcció de prototips de la culata i la vàlvula, amb l'objectiu de comprovar els resultats obtinguts mitjançant el programari de simulació.

8. RELACIO DE DOCUMENTS

La relació de documents que formen aquest projecte és:

Document Nº 1: Memòria i Annexos

Document Nº 2: Pressupost

9. BIBLIOGRAFIA

1. ALBANESI, A., ZANOTTI, A., CALVO, N., NIGRO, N., STORTI, M. Simulación numérica de los movimientos característicos del flujo en cilindros de motores alternativos de alta performance. MECOM – VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional. 2005.
(<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/198/178>, 30 de juliol de 2014).
2. ANSYS, Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, U.S.A, 2012.
3. BLAIR, G. P. Design and Simulation of Four-Stroke Engines. Society of Automotive Engineers. Inc. Warrendale, PA, U.S.A. 1999.
4. COMAMALA, M. CURS D'ESTIU 2013: INICIACIÓ A LA PREPARACIÓ DE MOTORS 2T I 4T PER A COMPETICIÓ. 2013.
5. ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA (EIM), UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO (UNR). Diseño de Conductos y Cámaras de Combustión para Motores Alternativos SI de Alta Performance. MECOM – VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional. 2005.
(http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia1/mecanica/Automotores/Apunte_FlujoMCI.pdf, 30 de juliol de 2014)
6. Estudio del motor: la distribución (<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-distribucion.htm>, 28 de juliol de 2014)
7. FUSTON, J. Boosted Logic - Volumetric Efficiency... (Long)
(<http://forum.roadfly.com/threads/11202113-Boosted-Logic-Volumetric-Efficiency...->
(Long), 28 de juliol de 2014)

8. FYGUEROA, S., SERRANO, J., GARRIDO, C. Caracterización del flujo de admisión en un motor de encendido por chispa. Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica (GIMUP), de la Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, y el Grupo de Motores Térmicos (GRUMOTE), de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. 2008.
(<http://www.javeriana.edu.co/Facultades/ingenieria/revista/Vol12nr2MotorChispa.pdf>)
9. GILLERI, S. Preparación de motores de serie para competición. Ediciones CEAC. 2005.
10. Manual de operación flujómetro D-600, SAENZ, Victoriano Montes 3854, CP 7600, Mar del Plata, Argentina. 2014.
11. RAMAJO, D. E. Simulación computacional de los procesos fluidodinámicos en el interior de motores de combustión interna. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. 2008
12. SANZ, S. Motores. Ciclos Formativos. Editex. 2011
13. SHERWOOD, B. A Comparison of the Toyota VVT system Vs the Honda V-TEC.
(<http://www.billzilla.org/vvtvttec.htm> , 28 de juliol de 2014)

ANNEXOS

ANNEX A. DADES DEL MOTOR

A.1 Introducció

El motor que s'utilitza per desenvolupament del treball és el motor de combustió interna monocilíndric KINLON.

En aquest Annex es disposa de la informació necessària sobre les parts bàsiques i les característiques geomètriques del motor. La *Figura A1* mostra les vàlvules i la culata del motor, mentre que la *Figura A2* permet observar la forma de la cara superior del pistó. La *Figura A3* permet veure la cambra de combustió i la seva integració amb els conductes d'admissió i escapament.



Figura A1. Vàlvula d'admissió (primera d'esquerra) i escapament juntament amb la culata del motor



Figura A2. Forma de la cara superior del pistó



Figura A3. Cambra de combustió

A.2 Geometria i model 3D

A.2.1 Presa de mides.

Per l'execució correcta de l'anàlisi de flux en fred (*Cold Flow*) i anàlisi de conducte d'admissió (*Port Flow*) és necessita el model 3D del motor.

En concret, s'ha de modelar el conducte d'admissió, la vàlvula d'admissió, conducte d'escapament, vàlvula d'escapament, la cambra de combustió i el cap del pistó. Per acabar, s'integren tots els components anteriors en un sol model.

La major importància es concentra en correcte modelització del conducte d'admissió, vàlvula d'admissió i la cambra de combustió. Això és degut a que aquestes parts determinen les prestacions del flux entrant i qualsevol canvi en les seves geometries (bàsicament, la forma de vàlvula i conducte d'admissió) provoca la variació de resultats obtinguts.

A.2.2 Conductes d'admissió i escapament

Per la presa de mides dels conductes, degut a la geometria complexa i difícil accés a la mateixa, s'ha decidit utilitzar la silicona pel conducte d'admissió i la plastilina per modelar la forma del conducte d'escapament.

La silicona especial en estat líquid s'afegeix en el conducte d'admissió juntament amb la vàlvula tancada. Després de la seva solidificació, s'extreu la forma i d'aquesta manera s'obté el model per a mesurar. S'ha de dir que després de la solidificació es comprova si l'efecte d'expansió/reducció de la secció degut a la dilatació tèrmica de la silicona s'ha de tenir en compte o no. Per l'estudi s'ha comprovat que aquest efecte és negligible. A la *Figura A4* es pot observar la forma solidificada del conducte d'admissió:



Figura A4. Conducte d'admissió

De manera anàloga es va mesurar el conducte d'escapament. Per l'estudi no es necessita l'extrema precisió a l'hora d'agafar les mides a l'escapament, ja que la part corresponent només intervé en l'anàlisi *Cold Flow*. A més, la part corresponent a l'escapament no s'utilitza per l'anàlisi de turbulències per què no mostra els efectes de combustió que tenen lloc en el motor real. Per tant, la decisió va ser modelar-la amb plastilina: col·locar la plastilina per dos costats del conducte pressionant, prèviament cobrint la superfície del conducte amb el celòfan prim, i posteriorment extreure acuradament la forma. La *Figura A5* mostra el conducte d'escapament:



Figura A5. Conducte d'escapament

El procediment posterior a l'obtenció de les formes dels conductes inclou la mesura dels models dividint-los en seccions transversals. Cada secció de gruix determinat és mesura i es col·loca una darrere altra en el programari 3D, seguint la línia que passa pel centre de la forma per conservar els angles corresponents.

A.2.3 Vàlvules, cambra de combustió i pistó

La mesura dels components citats anteriorment es va realitzar fent servir els aparells de mesura disponibles en el laboratori de motors: peu de rei, galgues de diferents radis, regles.

A.2.4 Programari utilitzat i metodologia

El programari utilitzat per la modelització 3D del conjunt és SolidWorks 2013.

En primer lloc, s'ha modelat els conductes d'admissió i escapament, prestant atenció a les zones que s'integren a la cambra de combustió. A continuació, s'ha fet el conjunt conductes/cambra. Finalment, s'ha afegit el pistó en el PMS (punt mort superior) tal i com es demana a l'entorn ANSYS.

Els volums dels conductes i la cambra corresponen als negatius de les parts de la culata, és a dir, representen la secció disponible per pas de fluid (*Figura A6*).

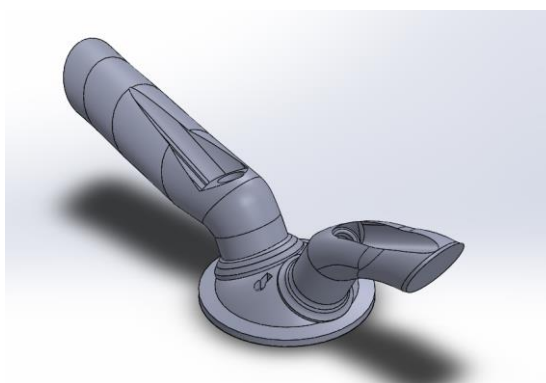


Figura A6. Vista isomètrica del model

Les vàlvules no s'ha d'extreure del volum perquè aquesta operació es farà de manera automàtica durant la descomposició de la geometria per l'anàlisi.

La *Figura A7* mostra diferents vistes (alçat i planta) del model 3D:

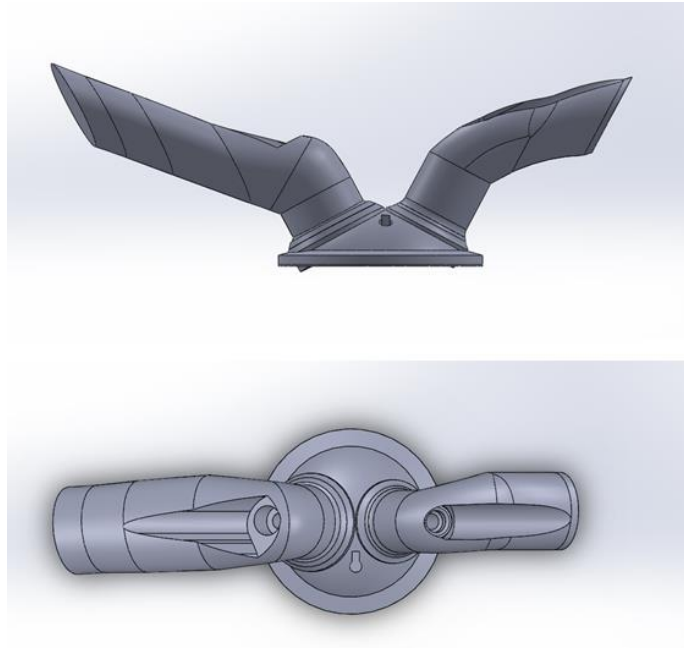


Figura A7. Alçat i planta de la geometria 3D

Els perfils de la geometria es pot observar a la *Figura A8*:

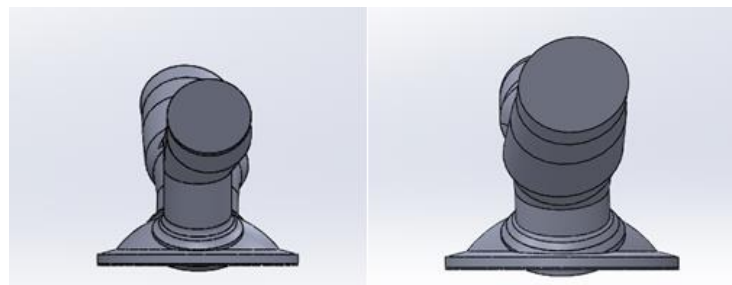


Figura A8. Perfils de la geometria 3D

Després de posicionar les vàlvules s'ha comprovat la no-existència de la interferència entre les vàlvules, les vàlvules i el pistó segons les dades que venen en l'apartat corresponent.

Els models de les vàlvules per separat (*Figura A9*):



Figura A9. Vàlvula d'admissió (esquerra) i escapament (dreta)

A.2.5 Dimensions de referència

En aquest apartat es presenten les mides bàsiques del conjunt i les mides de les vàlvules, prestant atenció sobre la vàlvula d'admissió, ja que posteriorment es procedirà a estudiar la seva influència sobre el flux amb l'objectiu de millorar-lo. Totes les mides que venen a continuació s'expressen en mm. A la *Figura A10* es pot veure el conjunt amb les mides principals. La *Figura A11* mostra la vàlvula d'admissió i la *Figura A12* mostra la vàlvula d'escapament:

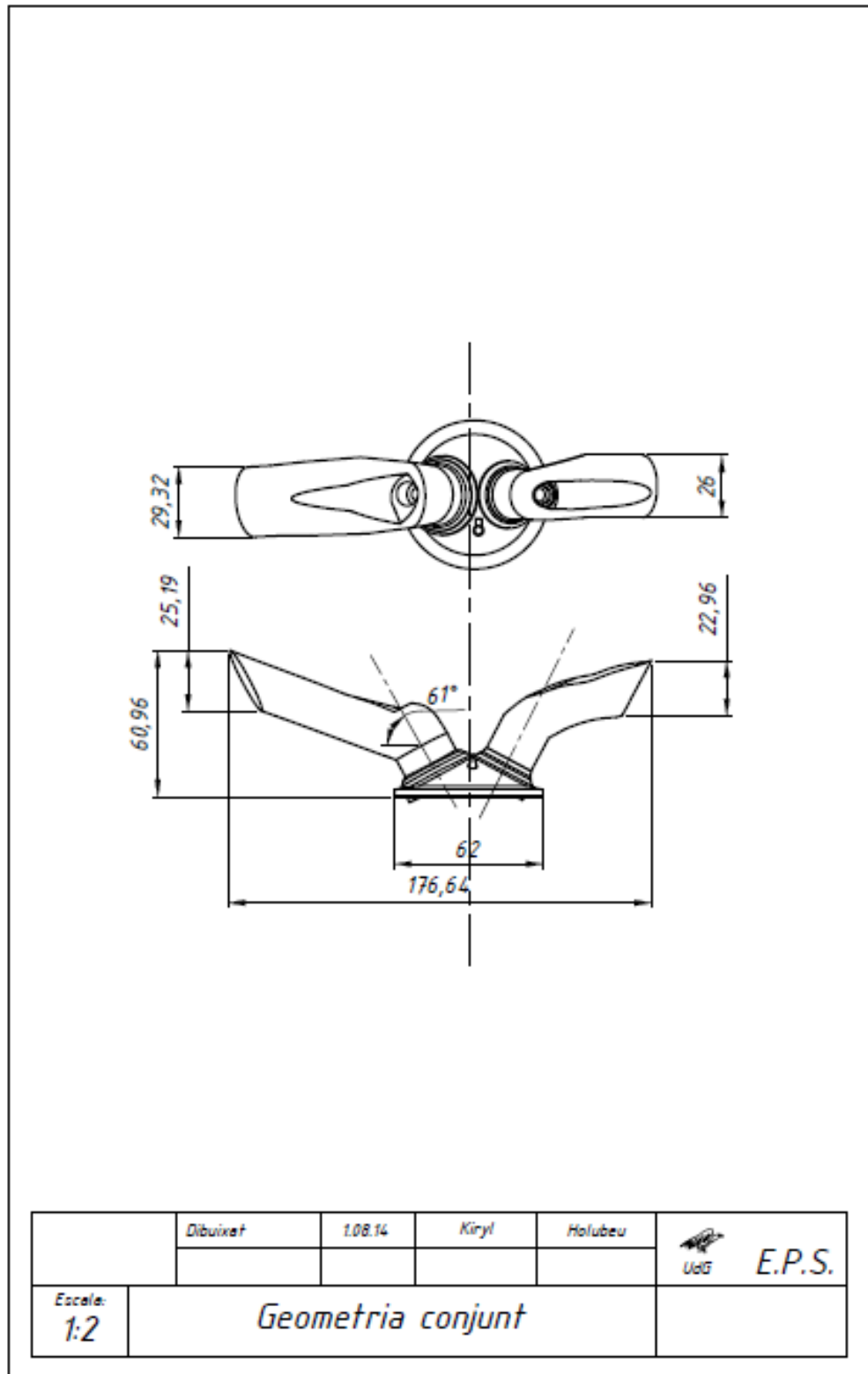


Figura A10. Dimensions del conjunt

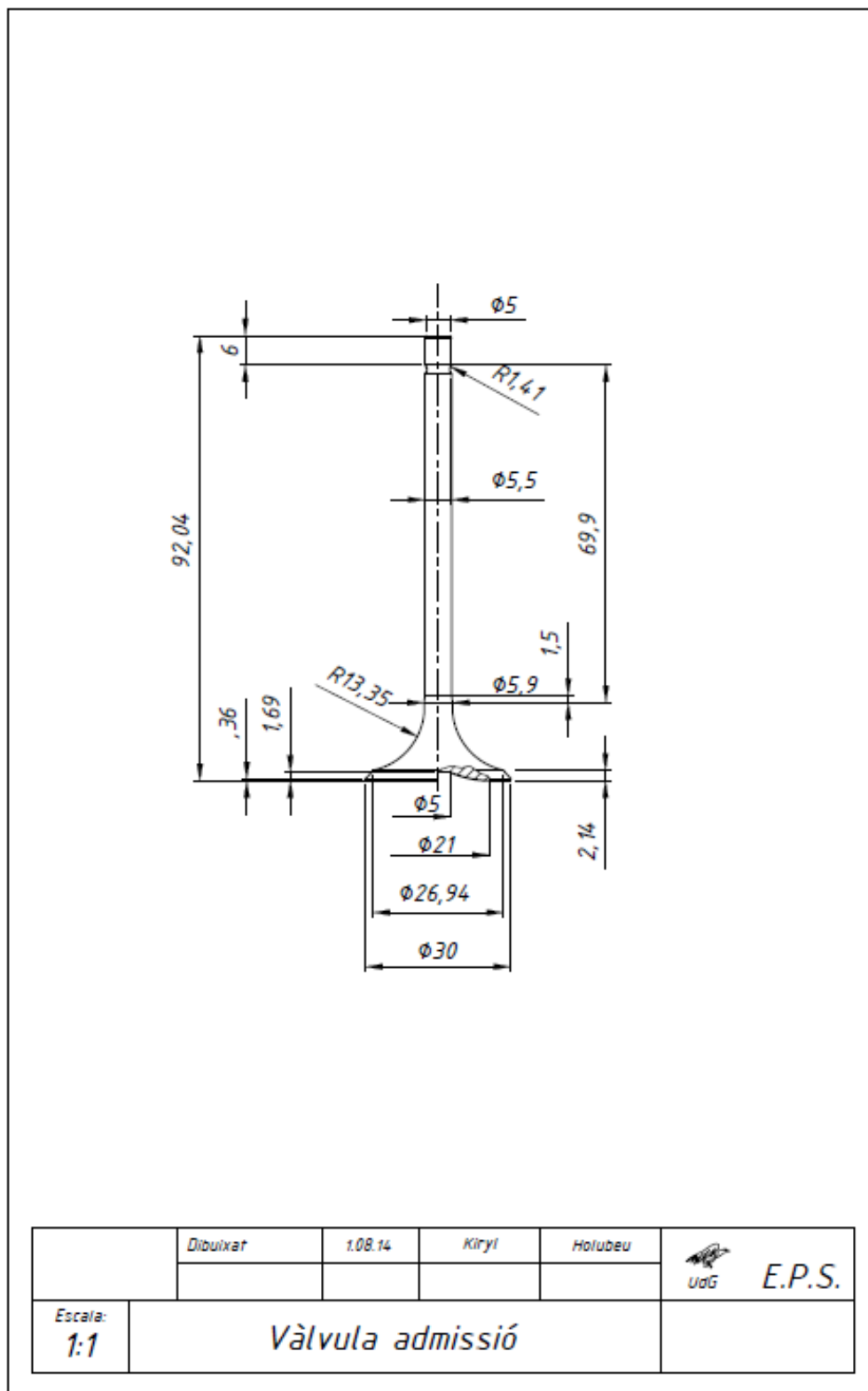


Figura A11. Dimensions de la vàlvula d'admissió

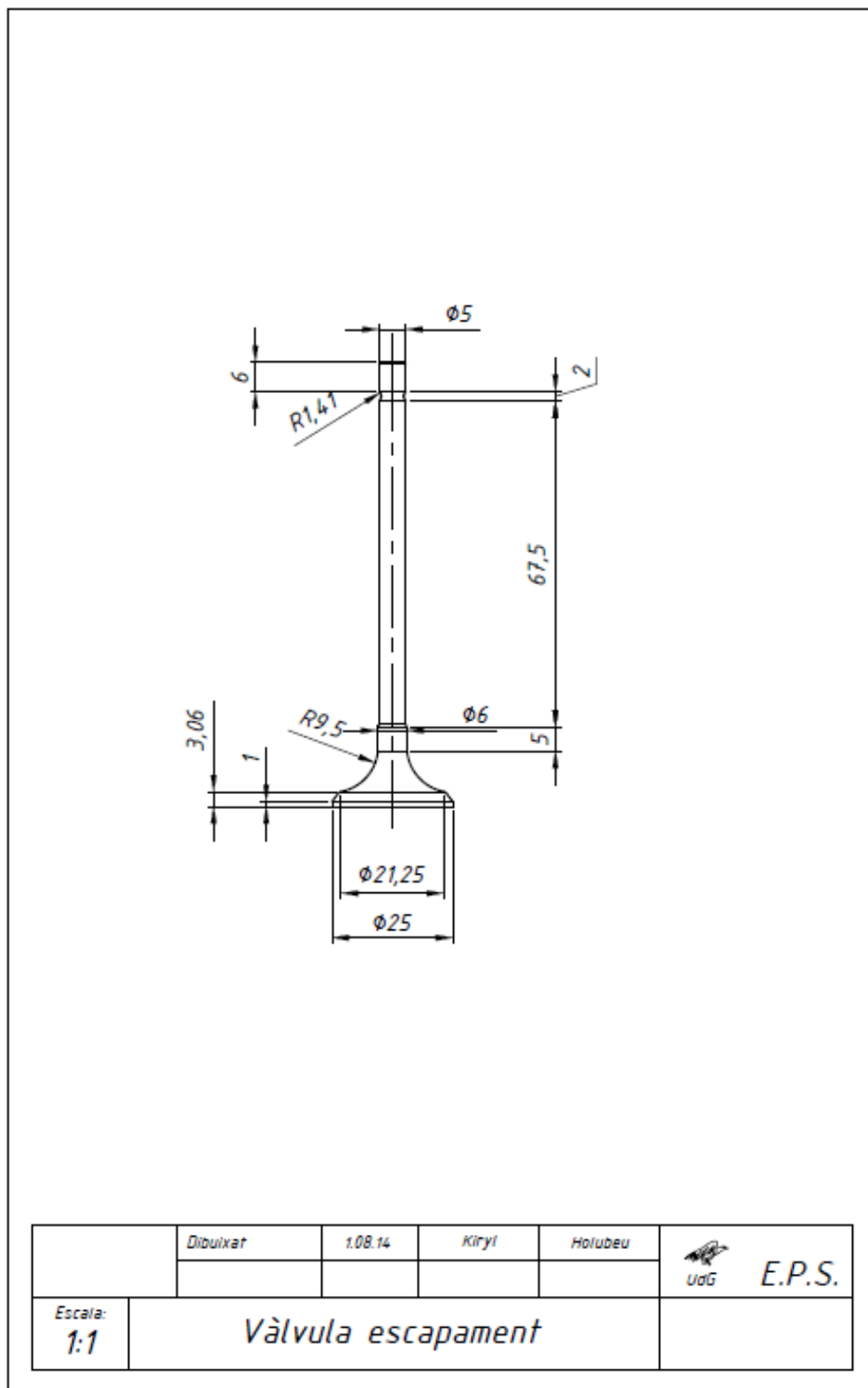


Figura A12. Vàlvula d'escapament

A.3 Dades per la simulació *Cold Flow*

En el següent apartat es fa un resum de les dades disponibles necessàries per programació de la simulació *Cold Flow*.

A.3.1 Mides geomètriques de diferents components del motor

- Diàmetre del cilindre: 62 mm.
- Cursa del pistó: 57.5 mm.
- Longitud biela: 97 mm.
- Vàlvula admissió *throat* (part més estreta): 24.5 mm.
- Vàlvula escapament *throat*: 20 mm.
- Diàmetre inici conducte admissió (hi ha una petita variació del diàmetre): 29 mm.
- Diàmetre inici conducte escapament: 26 mm
- Diàmetre final conducte admissió: 27 mm.
- Diàmetre final conducte escapament: 21 mm.
- Angle seient vàlvula admissió: 48°
- Angle seient vàlvula escapament: 53°
- Distància entre el pistó en PMS i el pla de la cambra de combustió : 0 mm.

S'ha de comentar que hi ha la possibilitat de que les mides citades no són 100% exactes, s'ha de tenir en compte els errors de mesura.

A.3.2 Angles d'obertura i tancament i alçades de les vàlvules

Aquestes dades són necessàries per la programació de la simulació de flux en fred. El punt de referència (0 graus) correspon al pistó situat en el punt mort superior i al començament de la fase d'escapament (*Taula A1*):

<i>ESCAPAMENT</i>			<i>ADMISSIÓ</i>		
Alçada [Lv] (m)	Alçada [Lv] (mm)	Angle (graus)	Alçada[Lv] (m)	Alçada [Lv] (mm)	Angle (graus)
0	0	0	0	0	0
0	0	111	0	0	315

0,0005	0,5	154	0,0005	0,5	350
0,001	1	165	0,001	1	362
0,0015	1,5	172	0,0015	1,5	371
0,002	2	180	0,002	2	378
0,0025	2,5	187	0,0025	2,5	385
0,003	3	194	0,003	3	390
0,0035	3,5	200	0,0035	3,5	398
0,004	4	207	0,004	4	405
0,0045	4,5	214	0,0045	4,5	412
0,005	5	222	0,005	5	419
0,0055	5,5	230	0,0055	5,5	428
0,006	6	241	0,006	6	438
0,0065	6,5	258	0,0065	6,5	452
0,0066	6,6	268	0,0067	6,7	468
0,0066	6,6	278	0,0067	6,7	476
0,0065	6,5	286	0,0065	6,5	487
0,006	6	301	0,006	6	500
0,0055	5,5	310	0,0055	5,5	510
0,005	5	319	0,005	5	518
0,0045	4,5	326	0,0045	4,5	525
0,004	4	333	0,004	4	532
0,0035	3,5	340	0,0035	3,5	538
0,003	3	346	0,003	3	545
0,0025	2,5	353	0,0025	2,5	551
0,002	2	359	0,002	2	558
0,0015	1,5	367	0,0015	1,5	565
0,001	1	375	0,001	1	574
0,0005	0,5	387	0,0005	0,5	585
0	0	405	0	0	607
0	0	720	0	0	720

Taula A1. Angles d'obertura i tancament i alçades de les vàlvules

La representació gràfica generada per programa es mostra a la *Figura A13*:

3.2. Piston and Valves Lift profiles

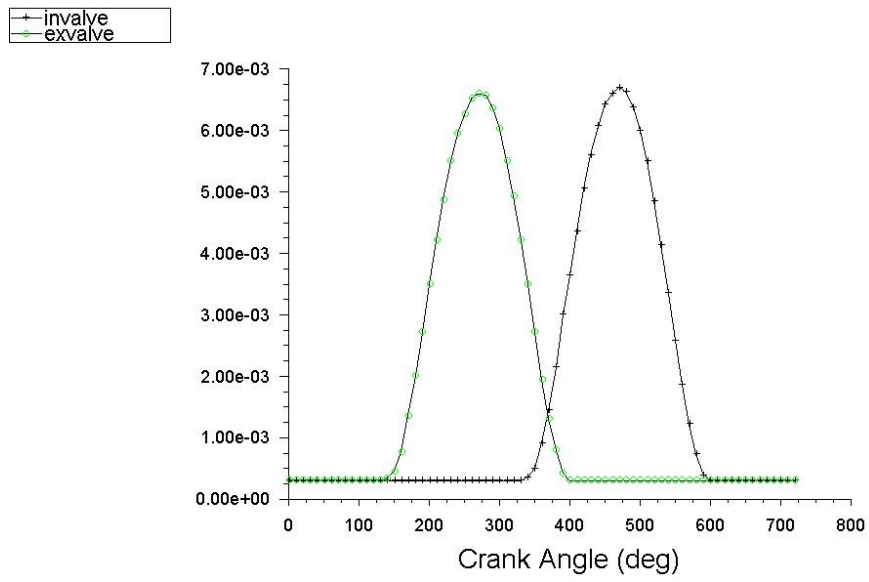


Figura A13. Alçada d'obertura en funció d'angle

ANNEX B. RENDIMENT VOLUMÈTRIC I INDICAT

B.1 Introducció

En aquest Annex s'explica la definició de rendiment volumètric i indicat i la forma de calcular-los.

B.2 Rendiment volumètric

A la *Figura B1* podem veure la fase d'admissió del motor 4T:

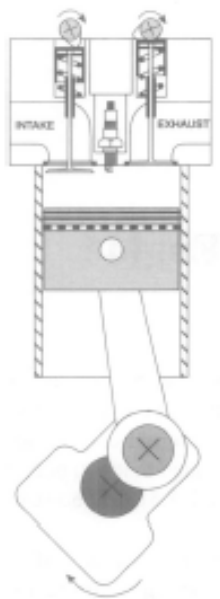


Figura B1. Fase d'admissió (BLAIR, 1999)

Durant aquesta fase el pistó inicia la carrera fins al punt mort inferior, en què entra una massa de carrega d'aire – m_{asp} a través de la vàlvula d'admissió en el cilindre des de l'atmosfera. Aquesta massa és coneguda com a massa d'aire d'admissió. Les condicions atmosfèriques locals de pressió i temperatura normalment es referencien a les condicions ambientals. Si anomenem la pressió atmosfèrica local P_{atm} i la temperatura T_{atm} , la densitat d'aire ρ_{atm} es calcula fent servir l'equació termodinàmica de l'estat, on R_a és la constant de gas per l'aire (*Equació B1*):

$$\rho_{atm} = \frac{P_{atm}}{R_a \cdot T_{atm}} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (\text{Eq. B1})$$

A continuació, es defineix la massa de referència m_{ref} com a massa requerida per omplir perfectament el volum del cilindre V_{cil} sota les condicions atmosfèriques (*Equació B2*):

$$m_{ref} = \rho_{atm} \cdot V_{cil} \text{ [kg]} \quad (\text{Eq. B2})$$

El volum del cilindre és (*Equació B3*):

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{cil}^2 \cdot L \text{ [m}^3\text{]} \quad (\text{Eq. B3})$$

On:

d_{cil} – diàmetre de la secció del cilindre en m

L – longitud de cursa en m

L'últim component necessari per a calcular l'eficiència volumètrica correspon a massa aspirada m_{asp} . Aquesta es determina experimentalment fent assaigs sobre la culata.

B.3 Rendiment indicat

En el càlcul del rendiment indicat intervé el paràmetre de potència indicada que s'ha de comentar.

La potència indicada és la potència desenvolupada per fluid de treball a l'interior del cilindre. Aquesta potència és calcula si coneixem la pressió mitjana indicada efectiva (p_{mi}) i aquesta s'obté si coneixem el cicle indicat. Així, el treball indicat durant el cicle termodinàmic i en funció de p_{mi} ve donat per l'Equació B4:

$$W_i = p_{mi} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{cil}^2 \cdot L \cdot \frac{rpm}{60} * k \quad (\text{Eq. B4})$$

On:

K – 0.5 (motor 4T)

p_{mi} - pressió mitja indicada efectiva en Pa

L – longitud de cursa en m

D – diàmetre cilindre en m

La pressió indicada mitjana efectiva és la pressió teòrica constant que s'exerceix durant la carrera de potència del motor – com a conseqüència proporcionant la potència indicada. A la *Figura B2* podem observar la pressió mitjana efectiva en el diagrama de pressions:

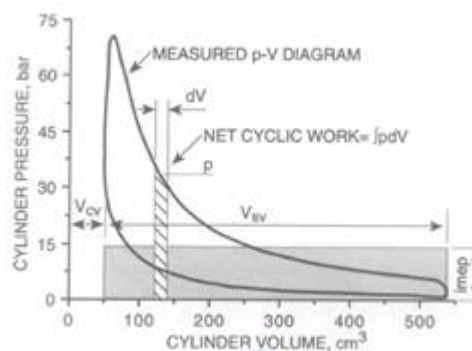


Figura B2. Determinació de la p_{mi} ($imep$) a partir del diagrama de pressions (BLAR, 1999)

Existeix la manera de representar les pressions en el cilindre de la manera més entenedora (Figura B3):

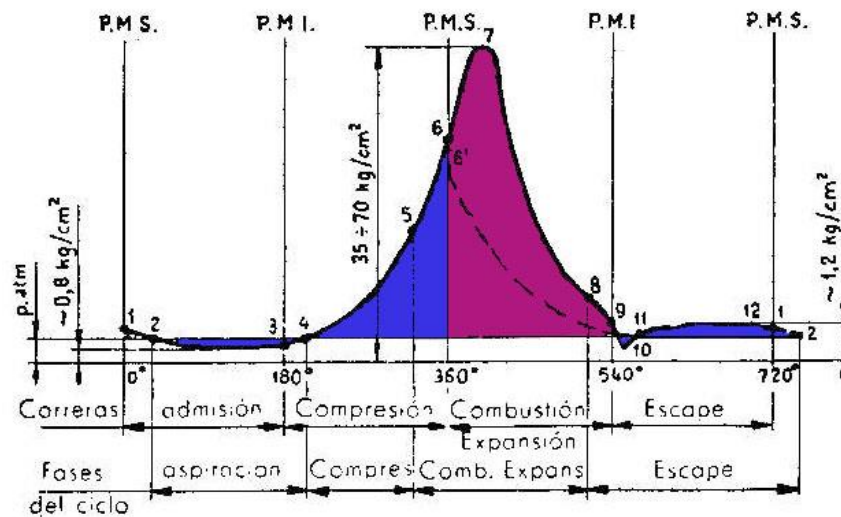


Figura B3. Diagrama de pressions en funció del desplaçament angular de l'eix (COMAMALA, 2013)

A la Figura B3 podem observar les pressions dins del cilindre durant les 4 fases del cicle. La zona lila correspon al treball útil, mentre que la zona blava representa el treball passiu – energia necessària que es consumeix. Si s'aconsegueix augmentar el treball útil – el valor del rendiment indicat augmenta.

ANNEX C. COEFICIENT DE DESCÀRREGA EXPERIMENTAL

C.1 Introducció

En aquest Annex es calcula el coeficient de descàrrega del conducte d'admissió a partir de les dades obtingudes en el banc de flux sobre la culata del motor a estudiar.

C.2 Dades banc de flux

- Temperatura atmosfèrica (T_0) – 291,15 K
- Pressió atmosfèrica (P_0) – 101 325 Pa
- Depressió creada en el banc de flux (ΔP) – -6229 Pa
- Pressió absoluta sota la vàlvula (P) – 95096 Pa
- Temperatura interna (T_{int}) – segons la prova en K
- Volum específic (V_{esp}) – segons la temperatura interna en m^3/kg
- Cabal (Q) – segons l'obertura de la vàlvula en m^3/s
- Obertura de la vàlvula (L_v) en mm

La *Taula C1* mostra valors de cabal per diferents alçades d'obertura de la vàlvula i la temperatura interna corresponent, juntament amb el volum específic d'aire a la temperatura donada. Aquestes dades permeten calcular el cabal màssic, que posteriorment serà la referència per la comparació de cabals obtinguts amb geometries modificades.

T. int. (K)	V. esp. (m ³ /kg)	Q (m ³ /s)	\dot{m} (kg/s)	Lv (mm)
289,5	0,8732	3,1620E-03	3,6212E-03	0,5
289,55	0,8735	5,7578E-03	6,5916E-03	1
289,55	0,8735	1,0949E-02	1,2535E-02	2
289,55	0,8735	1,5952E-02	1,8262E-02	3
289,55	0,8735	2,1426E-02	2,4529E-02	4
289,65	0,8739	2,7137E-02	3,1053E-02	5
289,65	0,8739	3,0629E-02	3,5049E-02	6
289,8	0,8742	3,1786E-02	3,6360E-02	6,7

Taula C1. Cabals mesurats en el banc de flux

C.3 Càlcul de coeficient de descàrrega

Per calcular el coeficient de descàrrega s'utilitzen les *Equacions 4 i 5*. Les dades necessàries de les condicions de contorn per la fórmula es pot consultar en l'apartat anterior, les dades geomètriques en l'Annex A.

A la *Taula C2* s'observa el coeficient calculat per diferents obertures:

Lv (mm)	A (m ²)	\dot{m} ideal (kg/s)	\dot{m} real (kg/s)	C _D exp.
0,5	4,7124E-05	5,5980E-03	3,6212E-03	0,65
1	9,4248E-05	1,1196E-02	6,5916E-03	0,59
2	1,8850E-04	2,2392E-02	1,2535E-02	0,56
3	2,8274E-04	3,3588E-02	1,8262E-02	0,54
4	3,7699E-04	4,4784E-02	2,4529E-02	0,55
5	4,7124E-04	5,5980E-02	3,1053E-02	0,55
6	5,6549E-04	6,7175E-02	3,5049E-02	0,52
6,7	6,3146E-04	7,5013E-02	3,6360E-02	0,48

Taula C2. Coeficient de descàrrega experimental

ANNEX D. DESCRIPCIÓ DE PROCESSOS CARACTERÍSTICS EN MOTOR

D.1 Flux en cilindre

La forma i ubicació dels *ports* i les vàlvules d'admissió, juntament amb la part de distribució de motor determinen els fluxos generats en cilindre durant la fase d'admissió. La característica d'aquest flux és la seva alta turbulència, però la velocitat mitja sempre és menor que la velocitat turbulenta.

Dins d'aquest flux turbulent desorganitzat existeixen els moviments que segueixen una organització específica: *swirl* i *tumble*.

Aquests dos moviments s'anomenen coherents i existeix la possibilitat de produir-los i variar les seves característiques mitjançant el disseny apropiat. Cal destacar la impossibilitat d'induir *swirl* sense *tumble*. En canvi, el *tumble* produït no necessàriament porta la inducció del *swirl*.

D.2 Etapes de flux en cilindre

El temps de persistència de flux en el cilindre es pot dividir en varies etapes, on les característiques que presenta són diferents.

D.2.1 Primera part de la fase d'admissió

El flux passa per conducte d'admissió i la vàlvula corresponent formant un raig (*jet*) que en el moment d'obertura de la vàlvula genera els moviments coherents *swirl* i *tumble* degut a la configuració geomètrica dels components descrits anteriorment, transformant l'energia continguda en el flux direccional en turbulència.

D.2.2 Segona part de la fase d'admissió

En aquest període la gran part de la turbulència disminueix degut als efectes de viscositat que pateix el flux en el seu moviment dins del cilindre. Al mateix temps el flux d'admissió comença a reduir-se fins arribar a valer zero en el moment de tancament de la vàlvula, reduint l'energia cinètica procedent de l'admissió.

Els moviments coherents associats transporten vapor, gotes de combustible, gasos residuals i tot el contingut que hi ha en el cilindre seguint la trajectòria dependent dels percentatges del *swirl* i el *tumble* que hi ha en el cilindre. D'aquesta forma la turbulència es propaga en el cilindre homogeneïtzant el seu contingut.

D.2.3 Fase de compressió

L'augment de la densitat i els canvis en les escales de les dimensions (degut al canvi geomètric a mesura que la barreja es comprimeix) augmenten la turbulència restant del raig d'admissió. Al mateix temps la dissipació d'energia turbulenta per viscositat i transport de matèria continua.

En el punt mort superior la major part dels moviments coherents no tindran l'espai suficient com per a mantenir la seva forma i es descompondran en turbulència, augmentant la seva energia cinètica. Això permet que les condicions en el cilindre al final del procés siguin totalment homogènies.

D.2.4 Inicialització de combustió

En el moment inicial el nivell de turbulència augmenta, però aquesta variació no és important. Aleshores, en la carrera d'expansió s'atenuen els moviments coherents restants i la turbulència en general, degut als efectes de viscositat i canvis geomètrics. En el moment d'obertura de la vàlvula d'escapament es pot afirmar que la turbulència ha desaparegut completament.

D.3 Comportament de moviments característics

La idea de *tumble* i *swirl* és encapsular o retenir part del moment cinètic del raig d'admissió, sota la forma de flux organitzat. Degut a que aquest flux organitzat és més gran que la turbulència, és menys dissipatiu, i per això mantindrà la seva energia per més temps.

La vorticitat del *tumble* augmenta en el període de compressió pel moviment del cilindre, i una cosa semblant passa amb el *swirl*, si el pistó té present la cavitat per la generació de *squish*. En l'instant anterior a la ignició, *swirl* i *tumble* es descomponen en turbulència, generant un estat de turbulència global molt més gran que produït només pel *jet* d'admissió.

Tant *swirl* com *tumble* es defineixen segons els índexs corresponents, és a dir, l'índex de *swirl* i índex de *tumble*: la seva expressió es pot trobar en l'Annex I.

En poques paraules, els índexs corresponents comparen la velocitat angular de rotació d'un sòlid ideal amb el mateix moment angular que posseeix la distribució de velocitats en el *swirl* o *tumble* amb la velocitat angular de cigonyal.

Els apartats que venen a continuació expliquen la metodologia a seguir per la inducció forçada d'un dels moviments coherents – *swirl*, ja que les seves característiques es poden variar fàcilment introduint modificacions en el disseny del motor.

D.4 Mètodes per a induir el *swirl*

Com s'ha definit anteriorment, aquest moviment de flux és pot induir de manera forçada si es modifiquen els conductes d'admissió o les vàlvules. Com a contrapartida s'ha de comentar que el coeficient de descàrrega disminueix, ja que en molts casos la modificació afegida presenta un obstacle i origina pèrdua de càrrega.

D.4.1 Port recte

La càrrega d'aire entra per conducte recte que va reduint la seva secció a mesura que s'apropa a la vàlvula d'admissió. El flux conduit s'ingressa en la direcció tangencial desitjada respecte l'eix del cilindre, descarregat a la paret del cilindre. Conseqüentment, es desvia

lateralment i cap avall formant l'hèlix. El conducte representat a la *Figura D1* posseeix el menor coeficient de descàrrega, comparant amb els conductes normals.

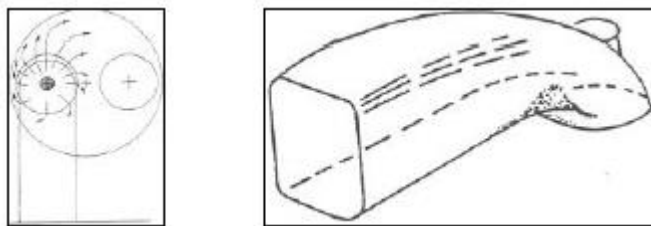


Figura D1. Conducte recte (ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA (EIM), 2005)

D.4.2 Port amb paret deflectora

La càrrega flueix per un conducte lleugerament corb i estret, el contacte amb les parets proporciona moviment semicircular al flux en el seu pas fins a la vàlvula d'admissió. La paret deflectora, correspon a la paret interna del conducte de la *Figura D2*, obliga que el flux es mogui sobre la paret externa del conducte i al travessar la vàlvula d'admissió es desplaça en la direcció tangencial necessària portant el moviment en forma d'espiral cap a la part inferior del cilindre.

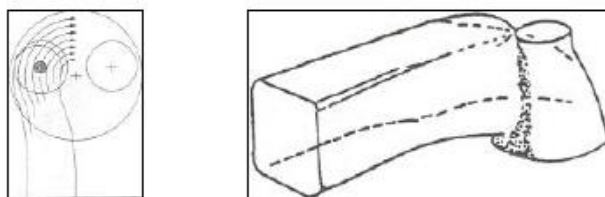


Figura D2. Conducte amb paret deflectora (ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA (EIM), 2005)

D.4.3 Vàlvula emmascarada

El sistema alternatiu per crear turbulències consisteix en emmascarar la vàlvula d'admissió de tal manera que el flux en el seu camí des del conducte cap al cilindre passa per la vàlvula (*Figura D3*), contactant amb la part emmascarada amb la posterior desviació. Aquest emmascarat obliga el flux a fluir entre la paret de cambra pròxima a la vàlvula d'admissió, agafant la rotació respectant el sentit que tenia abans d'entrar-hi:

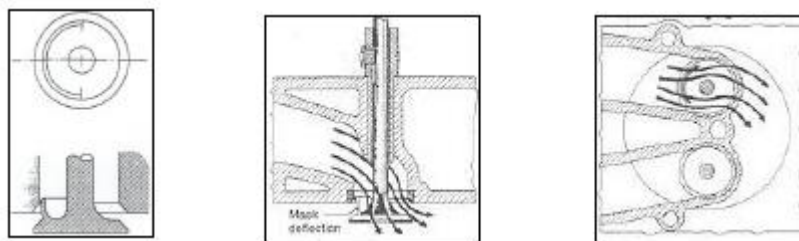


Figura D3. Vàlvules emmascarades (ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA (EIM), 2005)

La configuració anterior és rarament utilitzada, ja que no és possible el gir de la vàlvula al voltant del seu eix. Com a conseqüència, ha aparegut el disseny amb l'emascarament mitjançant la forma especial de la tapa de cilindre que intenta simular la mateixa funció (Figura D4):

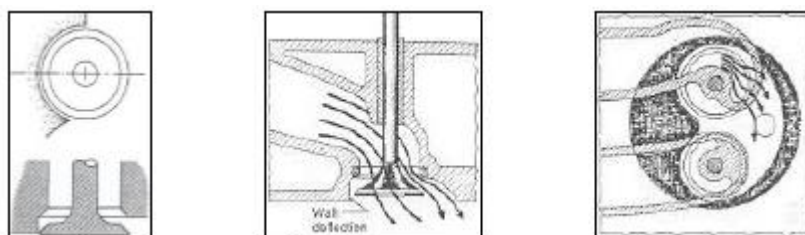


Figura D4. Emmascarament en la tapa de cilindres (ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA (EIM), 2005)

D.4.4 Conductes helicoidals

Els conductes helicoidals, comparant amb els mètodes descrits anteriorment, permeten donar el moviment rotacional al flux abans d'ingressar en el cilindre (*pre-swirl*). El mètode és senzill: el conducte d'admissió té la forma espiral, aleshores, el flux és guiat per les parets del conducte fins a la vàlvula d'admissió. Com a conseqüència, al entrar en el cilindre el flux d'aire ja porta el moviment rotacional helicoidal intensiu provocat per la forma d'admissió.

Comparant amb els conductes directes, els ports helicoidals no tenen el problema de la descàrrega de flux per la quantitat de *swirl* equivalent. Per això, s'obtenen els valors d'eficiències volumètriques més elevats a règims de gir mitjos.

A règims alts, degut a la gran pèrdua de càrrega provocada per la seva forma, els conductes helicoidals provoquen la pèrdua d'eficiència volumètrica (*Figura D5*):

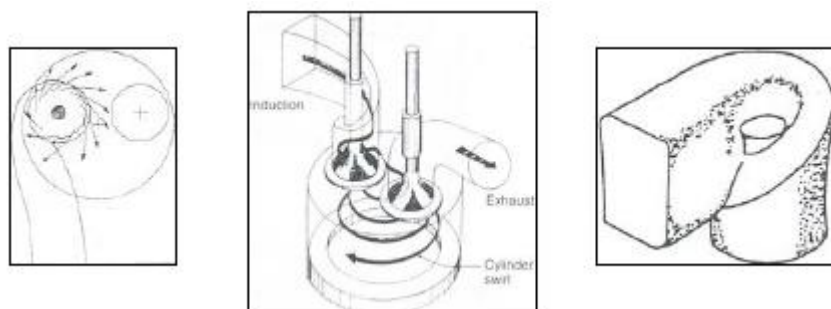


Figura D5. Conductes helicoidals (ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA (EIM), 2005)

D.5 Mètodes d'avaluació de *swirl* i *tumble*

En els estudis sobre els patrons del moviment de flux s'utilitzen dos tipus d'assaigs experimentals: dinàmics i estàtics.

D.5.1 Assaigs dinàmics

Assaigs dinàmics permeten reflectir moviments reals de flux en el motor utilitzant metodologies no invasives i consisteixen en avaluació de les velocitats de partícules mitjançant les tècniques complexes (PIV, LDA, PTV). El requeriment necessari és la modificació del cilindre i el cap del pistó afegint unes finestres de cristall d'alta resistència per obtenir l'accés òptic a l'interior.

El procediment consisteix en afegir les partícules microscòpiques en el flux i il·luminar-los mitjançant el raig làser a través dels forats de cristall. El raig impacta contra les partícules i la llum reflectida es capta mitjançant una càmera d'alta velocitat i resolució. El pas següent és l'anàlisi computacional de les imatges per determinar la trajectòria de partícules i obtenir el camp bidireccional de velocitat en el pla d'incidència de raig làser.

El procés anterior es repeteix per diferents posicions del làser i d'aquesta manera es determina la distribució aproximada de velocitats.

Cal dir que el procediment anterior requereix uns aparells molt cars i una dedicació del temps considerable per a recollir les dades necessàries. Cada vegada si es vol realitzar l'assaig es necessita modificar el motor. A més, hi ha limitació d'accés òptic en el cilindre. També la capacitat d'obtenció de les dades de velocitat és limitada degut al temps de mostreig d'aquestes.

Tots aquests inconvenients es pot evitar fent assaigs estàtics.

D.5.2 Assaigs estàtics

Aquests assaigs estudien el moviment de flux sense tenir en compte els moviments de pistó i les vàlvules.

Els coeficients que es poden determinar són: coeficient de descàrrega, coeficient de *swirl* i *tumble*.

El procediment utilitzat consisteix en mantenir obertes les vàlvules d'admissió o escapament a diferents alçades i mitjançant la diferència de pressió aplicada promoure el flux a passar dins del cilindre. En el cilindre es col·loquen diferents aparells, segons el tipus de coeficient a mesurar. Els instruments poden ser el mesurador de flux, aparell de mesura de moment de *swirl* o de moment de *tumble*, tal i com mostra la *Figura D6*:

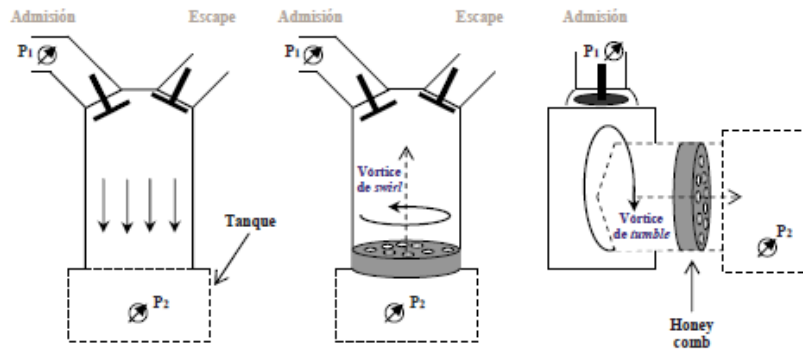


Figura D6. Esquerra: assaig de mesura de flux estàndard. Centre: assaig de swirl. Dreta: assaig de tumble (RAMAJO,2008)

Els inconvenients bàsics són deguts a que no es tenen en compte els fenòmens dinàmics provocats per moviment del pistó i obertura i tancament de les vàlvules. Així mateix, la mesura simultània de *swirl* i *tumble* és impossible, ja que es necessiten configuracions d'assaigs diferents.

Els valors obtinguts en els assaigs no tenen la mateixa magnitud que els moviments reals en el motor, però utilitzant les correlacions empíriques es pot relacionar-los amb les prestacions del motor. Com a característica positiva es destaca la seva fàcil realització. En contrari, existeixen moltes varietats de proves que s'utilitzen per la caracterització dels motors i això dificulta la comparació dels resultats obtinguts per diferents investigadors.

ANNEX E. DISSENY DELS MOTORS D'ALTA EFICIÈNCIA

E.1 Introducció

En els apartats anteriors s'ha comentat la importància de disseny apropiat del conducte d'admissió per rendiment del motor. Hi ha aspectes que no s'estudiaran de forma directa en aquest treball, però també molt importants a l'hora de dissenyar:

- Cambra de combustió i forma del pistó
- *Squish*
- Relació de compressió
- Disseny pel baix règim de revolucions.
- El *timing* de la ignició i injecció

E.2 Cambra de combustió i forma de pistó

La decisió crítica són les mides i la forma de la cambra de combustió juntament amb la forma del cap del pistó. La cambra pot ser plana, tenir la forma de cúpula semiesfèrica, de banyera. Existeixen molts dissenys específics relacionats amb la destinació d'aquestes. Com la regla empírica una cambra ben dissenyada té la forma semiesfèrica.

El seu disseny és extremadament important, ja que en la cambra de combustió hi té lloc el procés de combustió, quina eficiència afecta de forma directa al rendiment, potència, emissions del motor. L'objectiu principal és dissenyar la cambra on la velocitat de combustió sigui la màxima possible i que aquesta pugui admetre la major relació de compressió sense l'aparició dels fenòmens no desitjats, per exemple, la detonació. Una cambra ben dissenyada té la forma semiesfèrica.

D'igual manera el cap del pistó pot ser pla, convex, còncau o tenir les cavitats per la inducció de *squish*. La seva forma influeix sobre el temps de combustió i la relació de compressió.

E.3 Squish

És un efecte en els motors de combustió interna que crea la turbulència sobtada de la barreja aire/combustible en el cilindre quan el pistó s'acosta al punt mort superior.

En un motor ben dissenyat existeix la regió petita al voltant del perímetre de la cambra de combustió entre el pistó en el punt mort superior i la culata en la part central. Fins i tot es fabriquen cavitats especials en el cap del pistó.

La barreja ja porta un moviment rotacional, en el moment de la seva compressió la regió de *squish* converteix l'energia mitjana del fluid corresponent al *swirl* en turbulència de la barreja, augmentant considerablement la velocitat de la flama, la relació de combustió i com a conseqüència - l'eficiència del motor (*Figura E1*)

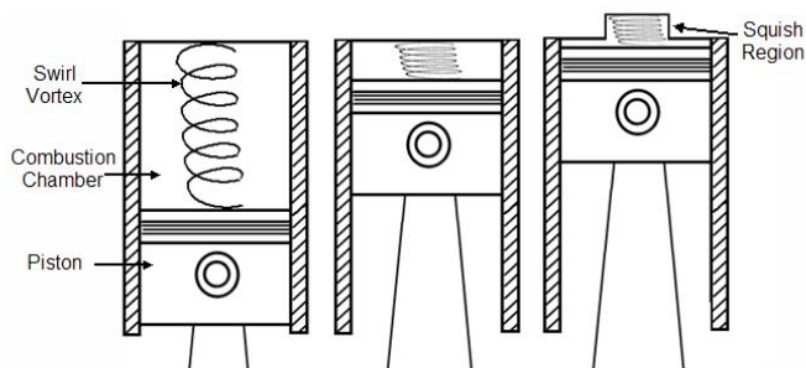


Figura E1. Transformació del swirl (ANSYS, Inc., 2012)

E.4 Relació de compressió

Es defineix com la ràtio entre el volum disponible quan el pistó es troba en el punt mort inferior (PMI) i el volum quan el pistó està situat en el punt mort superior (PMS). Aquest factor és essencial des del punt de vista de l'eficiència de combustió i la contaminació generada.

Si la relació de compressió és alta, l'eficiència de la combustió augmenta, però al mateix temps es generen més gasos NO_x que posteriorment han de ser tractats.

El disseny de la cambra de combustió i la forma del cap del pistó són els factors predominants si es pretén variar la relació de compressió.

E.5 Disseny pel baix règim de revolucions

El rendiment dels motors al ralenti o baixes revolucions és una consideració de disseny important. En molts casos els motors dels automòbils es dissenyen per la potència màxima constant a una velocitat específica, que sol ser alta. No obstant això, el règim de funcionament real inclou els períodes de funcionament a baixes revolucions i s'ha de conservar les prestacions de motor en aquests règims. La solució utilitzada en els motors moderns és el *timing* variable d'obertura i tancament de les vàlvules a diferents revolucions del motor.

L'altre objectiu és maximitzar l'eficiència volumètrica i eficiència de la combustió mitjançant la producció de nivells òptims de *swirl*, *tumble* i turbulències, tant en baixes com altes velocitats. Això fa que la càrrega de combustió, és a dir, la barreja d'aire/combustible entra en estat turbulent i la velocitat de la flama és prou alta com per a una combustió completa.

Això s'aconsegueix amb els dissenys geomètrics addicionals dels conductes i vàlvules per baixes revolucions o el ralenti. Per exemple, els mecanismes com l'emascament de la vàlvula o les vàlvules amb deflectors permeten millorar l'eficiència del motor a diferents règims de gir.

E.6 El *timing* de la ignició i injecció

Durant el funcionament del motor de cicle Otto, la sincronització de l'espurna i l'inici de la injecció es optimitzen per proporcionar la potència desitjada o el parell amb mínima formació de contaminant. Estratègies, com recirculació dels gasos d'escapament (EGR) s'utilitzen per minimitzar la temperatura màxima al motor mitjançant l'augment de la capacitat calorífica específica del contingut en el cilindre, el que redueix la producció de NO_x, que està fortament correlacionada amb temperatures més altes.

El sistema de recirculació dels gasos d'escapament adequadament dissenyat pot augmentar l'eficiència dels motors de gasolina.

Com a contrapartida es redueix la potència del motor. Per tant el dissenyador sempre ha de valorar els beneficis i limitacions que porta associada cada millora o modificació aplicada al motor.

ANNEX F. SEGUIMENT PORT FLOW

F.1 Introducció

En aquest annex s'expliquen els passos necessaris per la realització correcta de la simulació de flux en el conducte (*Port Flow*). El procediment explicat a continuació permet realitzar correctament la simulació i interpretar els resultats obtinguts. L'exemple correspon a l'obertura de 2 mm, per altres obertures serà necessari modificar l'apartat corresponent i repetir la seqüència.

L'anàlisi es realitza mitjançant l'ús del *toolbox* especialment desenvolupat que permet automatitzar el procés d'estudi del motor, proporcionant una eina molt útil i reduint el temps de tots els passos que segueixen a continuació.

Cal comentar que els assaigs es faran sobre el conducte d'admissió, ja que el seu disseny correcte és essencial per motor i determina les seves característiques bàsiques.

F.2 Inicialització de l'entorn ANSYS

El primer pas és carregar el Workbench de l'ANSYS 14.5, dins de la finestra seleccionar el *toolbox* corresponent IC Engine i arrastrar-lo en l'àrea del projecte (*Figura F1*):

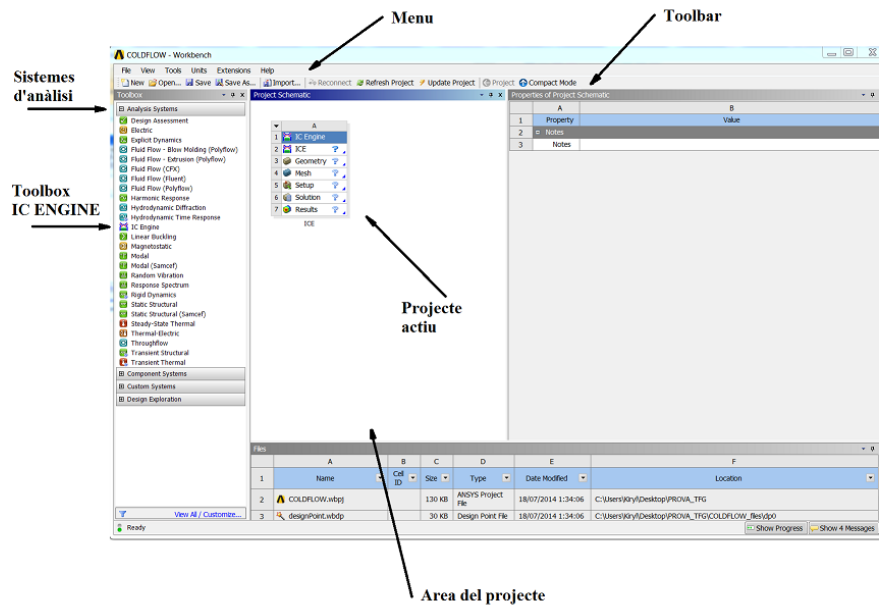
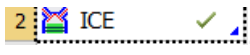


Figura F1. Finestra de la interfície gràfica

Es pot observar que s'ha aparegut una taula de 7 línies (*Figura F1*) que representa el flux de treball. Aquest és el pas compartit per tots dos tipus de simulació.

Els passos següents són:

- Clicar sobre la cel·la  en la finestra de propietats en el tipus de simulació seleccionar *Port Flow Simulation*
- Guardar el projecte

Una vegada hem fet els passos anteriors tenim la configuració mostrada a la *Figura F2*:

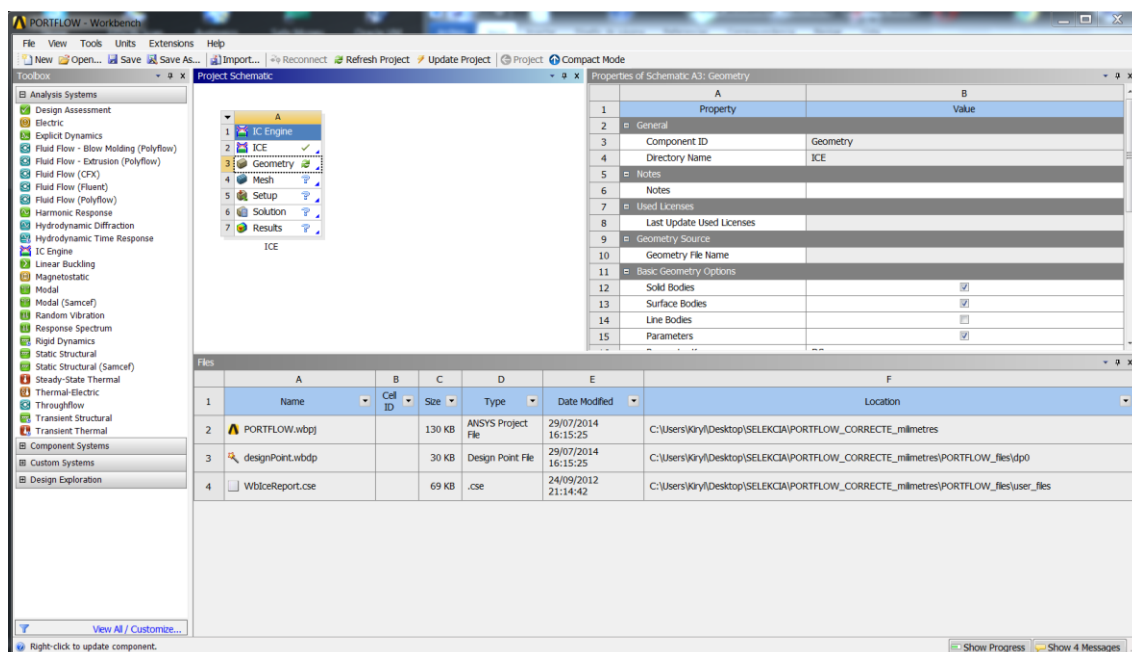


Figura F2. Inicialització del projecte d'anàlisi Port Flow

Fins aquest moment no hem de carregar cap arxiu ni definir els paràmetres necessaris. Durant les etapes posteriors haurem de seguir les indicacions del programa per completar la informació necessària.

F.2.1 Flux de treball

Per tal de tenir una visió global sobre el desenvolupament del projecte de simulació a la *Figura F3* es presenta el flux de treball i les etapes a executar:

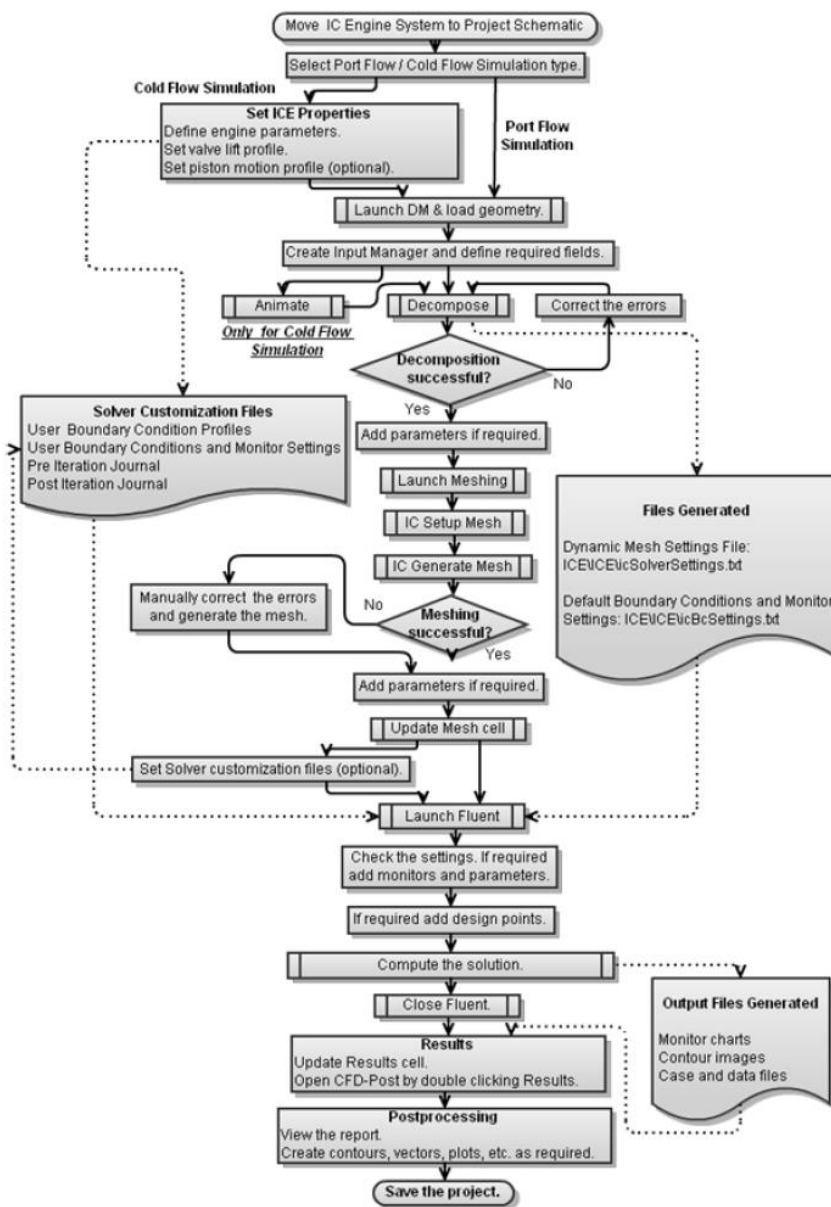


Figura F3. Flux de treball (ANSYS, Inc., 2012)

Segons la simulació que s'ha d'executar (*Cold Flow* o *Port Flow*) és necessari seguir la seqüència corresponent.


F.3 Importació de la geometria


La geometria a importar és la mateixa que s'utilitzava per l'anàlisi de flux en fred però sense definir la forma del pistó, ja que no és necessari. A més, s'ha afegit una modificació de la

cara d'entrada d'admissió, que no comporta cap canvi significatiu, només és necessari per la correcte creació del dipòsit tranquil·litzador. Aleshores, importem l'arxiu modificat CULATA_PORTFLOW.x_t en format *Parasolid*. Es recomana copiar l'arxiu dins de la carpeta del projecte.

Fent el doble clic sobre la cel·la de geometria obrim el *Design Modeler*. En el menú fem:

File → *Import External Geometry File* → i seleccionem l'arxiu CULATA_PORTFLOW.x_t, confirmem la selecció (seleccionem: *Clean Bodies* → *No*).

Fem clic sobre el botó  **Generate** per carregar la geometria en el projecte.

El següent pas és iniciar el *Input Manager* ( **Input Manager**), localitzat en la barra d'eines de IC Engine. La *Figura F4* mostra la finestra del panel de configuració:

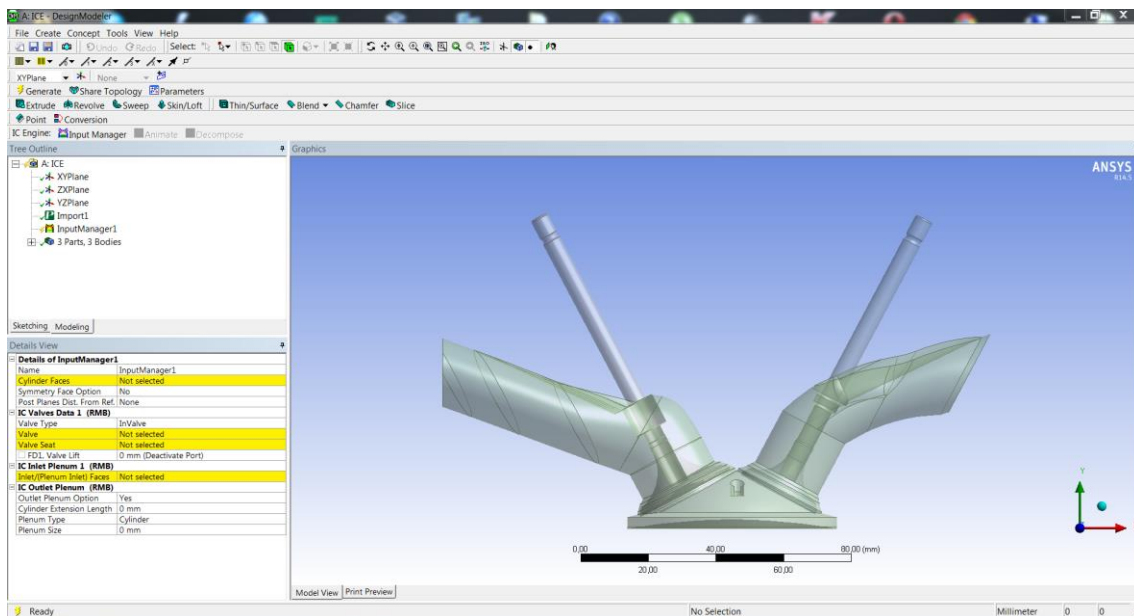


Figura F4. Definició de paràmetres i geometries en Input Manager

Podem observar que hem d'afegir les cares i cossos corresponents en cada fila marcada amb el color groc. També s'ha d'afegir l'apartat de dades corresponent a la vàlvula

d'escapament. Per fer-ho cliquem amb el botó dret sobre la fila *IC Valves Data* → *Add New IC Valves Data Group*.

S'afegeix el bloc de dades corresponent a la vàlvula d'escapament, en la fila desplegable de *Valve Type* canviem el tipus de vàlvula a *ExValve*.

Comencem a introduir les dades per la descomposició:

- Seleccionem les cares corresponents al cilindre i assignem-los: *Cylinder Faces* → *Apply* (Figura F5):

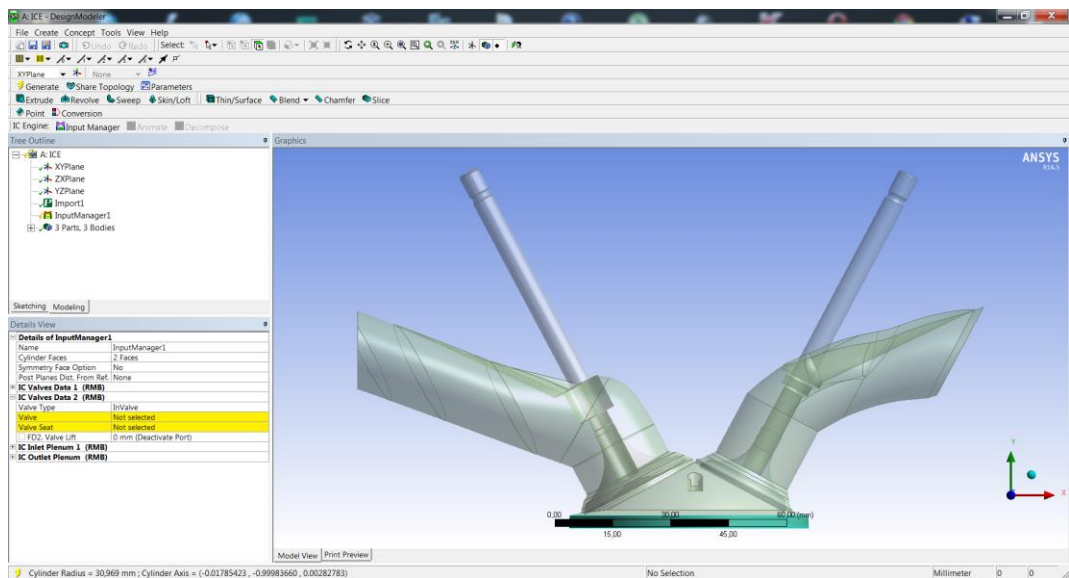


Figura F5. Assignació de cares del cilindre

- L'opció de simetria deixem per defecte → *No*.
- L'opció *Post Planes Dist. From. Ref.* permet crear els plans per postprocés amb l'objectiu de monitoritzar el *swirl*.
- Hi ha el paràmetre que permet avaluar la vorticitat de flux de manera experimental – coeficient de vorticitat. L'existència de metodologies diferents dificulta el procés de comparació dels resultats. Alguns investigadors (Fygueroa, S., Serrano, J., i Garrido, C, 2008) el defineixen com la relació entre la freqüència de gir d'un molinet ubicat dins del cilindre a distància de $1.15 \cdot D_{\text{cilindre}}$ del pla de la culata i la freqüència angular del motor.

Aleshores podem crear un pla situat a $1.15 * D_{cilindre}$, que és equivalent a 71.3mm. Hi ha la possibilitat de crear tant plans com sigui necessari. Per la monitorització farem dos plans situats 15 mm del centre del cilindre, és a dir, si cursa del pistó és de 57.5 mm, el centre es troba a 28.75 mm i els plans corresponents seran a 13.75 mm i 43.75 mm.

També afegirem un pla situat a 71.3 mm, tal i com és necessari per la mesura experimental del coeficient de vorticitat.

Els plans a introduir seran: 13.75; 43.75; 71.3 mm (*Figura F6*).

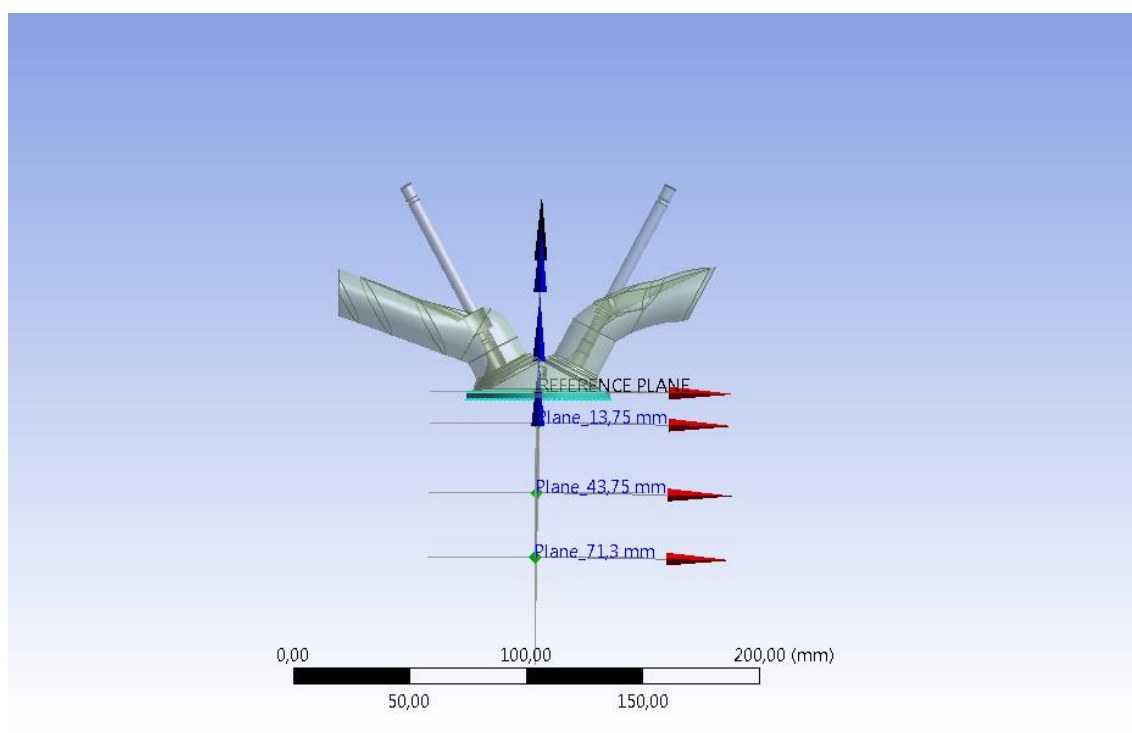


Figura F6 . Plans de mesura de swirl

- El següent pas és definir les vàlvules d'admissió/escapament i els seus seients. Una vegada hem entrat en el bloc de dades corresponent assignem les vàlvules i els seients corresponents: *Valve* → seleccionar la vàlvula → *Apply*, *Valve Seat* → seleccionar el seient → *Apply* (*Figura F7* i *Figura F8*):

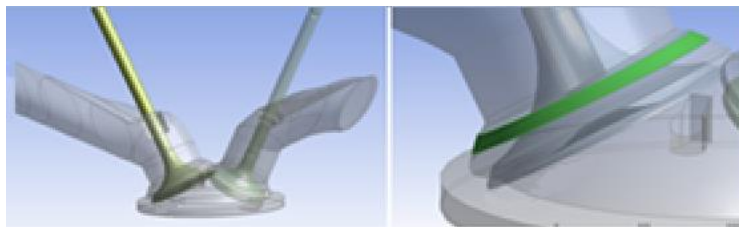


Figura F7. Vòlvula d'admissió i el seient corresponent



Figura F8. Vòlvula d'escapament i el seient corresponent

Per defecte, la vòlvula d'escapament està desactivada. Això és necessari per l'anàlisi. A la vòlvula d'admissió canviem el *Lift* a 2 mil·límetres.

- Creació de la cambra d'entrada (dipòsit tranquil·litzador de flux) per l'entrada d'admissió (*IC Inlet Plenum 1*). La pestanya corresponent permet crear la zona fent servir diferents formes: Semiesfera, Cilindre i Caixa. Per crear la zona, primer assignem la cara d'entrada d'admissió: *Inlet/(Plenum Inlet) Faces* → seleccionem la cara corresponent a l'entrada del conducte d'admissió → *Apply*. Posteriorment seleccionem de la llista desplegable la forma desitjada. Per aquest tipus d'anàlisi utilitzarem la forma semiesfèrica: *Plenum Type* → *Hemisphere*. Després apareix la finestra amb els paràmetres del *Plenum*:
Inlet Extension Length – distància de separació entre la superfície d'admissió i el dipòsit tranquil·litzador. Per defecte aquest valor és igual a 1.5 vegades el diàmetre hidràulic de l'entrada d'admissió.
Plenum Size – dimensions del dipòsit, aquest valor es calcula de manera automàtica en funció de les mides de la superfície d'admissió. Amb l'objectiu de disminuir la quantitat d'elements a generar durant la fase de mallat disminuïm el valor per defecte de 130.46 a 100 mm.
Plenum Blend Rad – radi de la corba a la sortida del dipòsit que permet guiar el flux. Per defecte aquest valor és 25 mm. Deixem el paràmetre anterior per defecte.

- Creació del dipòsit tranquil·litzador a la sortida: igual que l'entrada d'admissió la sortida de flux situada en la part inferior del cilindre necessita una zona especial per disminuir les fluctuacions del flux. Per defecte, la forma del dipòsit (*IC Outlet Plenum*) és cilíndrica, les opcions disponibles de configuració juntament amb la forma de la zona són:

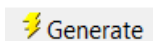
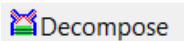
Cylinder Extension Length: longitud d'extensió aplicada al cilindre a partir de la posició inicial. El valor per defecte és igual a 3 vegades el diàmetre. Disminuïm-lo de 185.81 a 110 mm.

Plenum Size – dimensions del dipòsit, aquest valor es calcula de manera automàtica en funció de les mides del cilindre. Canviem el valor de 216.78 a 130 mm (*Figura F9*).

Details View	
[-] Details of InputManager1	
Name	InputManager1
Cylinder Faces	2 Faces
Symmetry Face Option	No
Post Planes Dist. From Ref.	13.7; 43.7; 71.3 (mm)
[-] IC Valves Data 1 (RMB)	
Valve Type	InValve
Valve	1 Body
Valve Seat	1 Face
<input type="checkbox"/> FD1, Valve Lift	2 mm
[-] IC Valves Data 2 (RMB)	
Valve Type	ExValve
Valve	1 Body
Valve Seat	1 Face
<input type="checkbox"/> FD2, Valve Lift	0 mm (Deactivate Port)
[-] IC Inlet Plenum 1 (RMB)	
Inlet/(Plenum Inlet) Faces	1 Face
Plenum Type	Hemisphere
Inlet Extension Length	35,568 mm
Plenum Size	100 mm
Plenum Blend Rad	25 mm
[-] IC Outlet Plenum (RMB)	
Outlet Plenum Option	Yes
Cylinder Extension Length	110 mm
Plenum Type	Cylinder
Plenum Size	130 mm

Figura F9. Configuració de la geometria a descompondre

Una vegada introduïdes les dades confirmem la descomposició clicant sobre el botó

 i posteriorment iniciem la descomposició . El resultat és pot veure a la *Figura F10*. Podem veure que a l'entrada d'admissió s'ha acoblat el dipòsit tranquil·litzador, igual que el cilindre s'ha allargat i s'ha creat el dipòsit tranquil·litzador a la sortida.

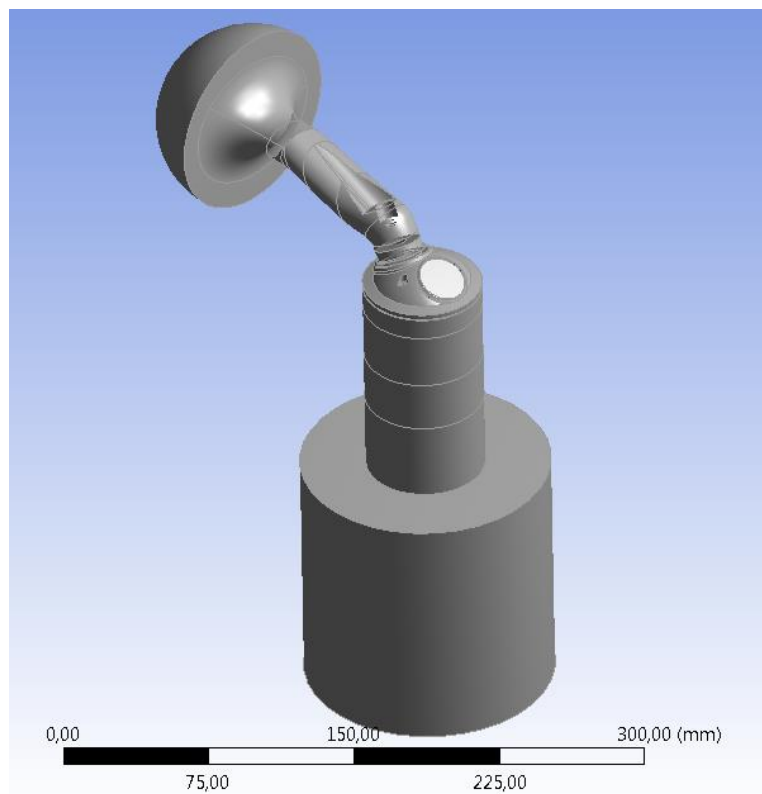



Figura F10. Geometria descomposta amb els dipòsits tranquil·litzadors creats i plans de mesura.

F.4 Mallat de la geometria

Igual que per l'anàlisi de flux en fred el pas següent a la descomposició de la geometria és el mallat. Tal com s'explica en l'Annex I hi ha molts ajustos que permeten aconseguir el mallat de qualitat i precisió desitjades.

Per aquest motiu generarem el mallat per defecte i posteriorment avaluarem la seva qualitat.

Clicant sobre el botó  Setup Mesh podem definir els paràmetres necessaris per la malla. Tots els paràmetres que apareixen estan configurats per defecte i poden ser modificats. La finestra de la configuració es mostra a la *Figura F11*:

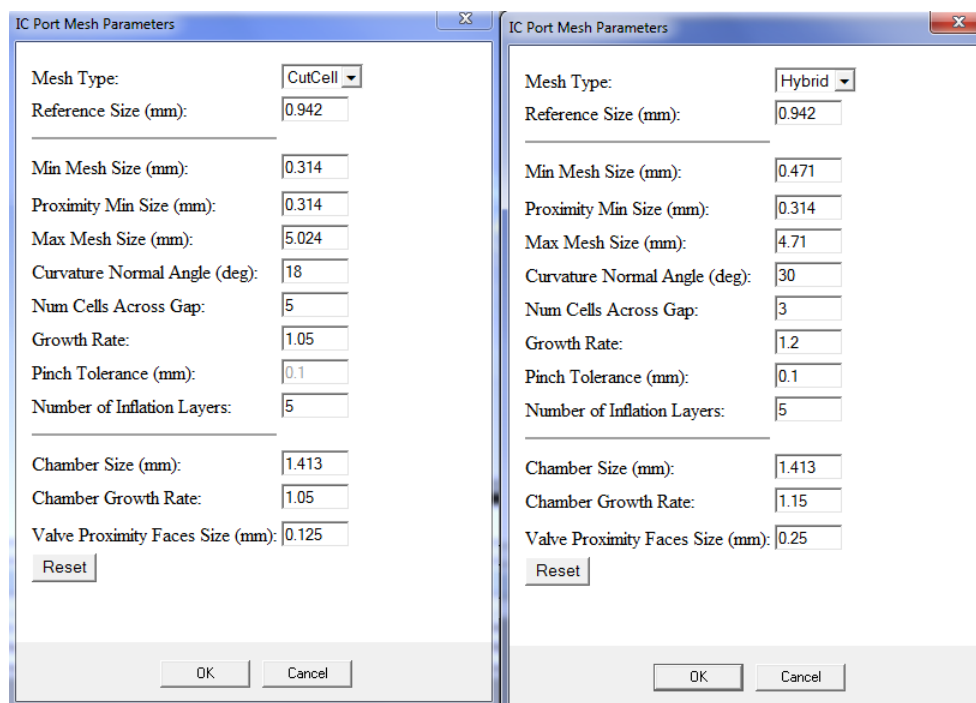


Figura F11. Paràmetres del mallat segons el tipus utilitzat

- **Mesh Type:** aquest paràmetre determina les dimensions-base del mallat. La llista desplegable permet triar entre els dos tipus: *Hybrid* o *Cutcell*. Tots els paràmetres que venen després estan afectats pel paràmetre descrit. Aquest mètodes es diferencien segons els algorismes de mallat.
- **Reference Size:** És el valor de referència, totes les mides posteriors són dependents d'aquest paràmetre. El seu valor per defecte és: Perímetre del marge de vàlvula/100. Si es deixa el valor per defecte per l'obertura de 0.5 mm es generaran al voltant de 4000000 elements de malla pel tipus *Hybrid*. Això comportarà l'augment del temps de càlcul. Per aquest motiu, el mallat a utilitzar per les obertures petites de 0.5 mm i 1 mm serà el *Cutcell*, ja que aquesta configuració aplica l'algorisme que permet disminuir la quantitat d'elements sense alterar els resultats. Per obertures de 2 a 6.7 mm deixarem el paràmetre per defecte - *Hybrid*, ja que la quantitat d'elements serà més petita degut la no-proximitat entre els cossos.
- **Min Mesh Size:** Igual a $Reference\ Size/2$ per *Hybrid* i $Reference\ Size/3$ per *CutCell*.
- **Proximity Min Size:** Aquest valor per defecte és $Reference\ Size/3$.
- **Max Mesh Size:** Igual a $Reference\ Size \times 5$ per tipus *Hybrid*. Per *CutCell* aquest paràmetre és mínim entre $Proximity\ Min\ Size \times 16$ i $Min\ Mesh\ Size \times 16$.

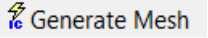
- *Curvature Normal Angle*: Aquest paràmetre depèn del tipus del mallat que s'utilitza (*Mesh Type*). El seu valor és 30 per *Hybrid* i 18 per *CutCell*.
- *Num Cells Across Gap*: Aquest valor és 3 per *Hybrid* i 5 per *CutCell*.
- *Growth Rate*: Aquest valor per defecte és 1.2 per *Hybrid* i 1.05 per *CutCell*.
- *Pinch Tolerance*: Aquest valor per defecte és 0.1 si la configuració és *Hybrid*, no s'utilitza per *CutCell*.
- *Number of Inflation Layers*: Pren el valor de 5.

Les propietats descrits anteriorment corresponen als ajustos globals del mallat. A continuació definim els ajustos locals:

- *Chamber Size*: Igual a *Reference Size* × 1.5.
- *Chamber Growth Rate*: Aquest valor per defecte és 1.15 si es selecciona *Hybrid* i 1.05 per *Cutcell*.
- *Valve Proximity Faces Size*: Aquest valor igual a l'alçada d'obertura de la vàlvula dividida entre 8. Com a mínim pot ser igual a *Reference Size*/8 i el límit màxim correspon a *Reference Size*.

En general, el tipus *CutCell* permet obtenir el mallat hexagonal amb capes d'inflació per capturar els efectes de viscositat a prop de les fronteres. Els estudis han demostrat que el *solver* de FLUENT convergeix més ràpid amb mallat prismàtic o tetragonal. Aleshores aquest mallat molt sovint s'utilitza com a provisional, però en alguns cassos permet obtenir els mateixos resultats que el mallat *Hybrid* però amb menys temps.

Triem l'opció *Hybrid*. Clicant *Ok* iniciem el procés d'assignació de paràmetres a les zones definides anteriorment. Per la primera execució deixem tots els valors per defecte, posteriorment avaluarem la qualitat de malla generada i si serà necessari – procedirem a millorar-la.

Per acabar de generar la malla cliquem el botó . Si en el panel d'informació no apareixen missatges d'error això indica que el procés s'ha finalitzat correctament. Els *Warning* (si n'hi ha) permeten identificar els punts a millorar.

El mallat resultant del tipus *Hybrid* es pot veure a la *Figura F12*:

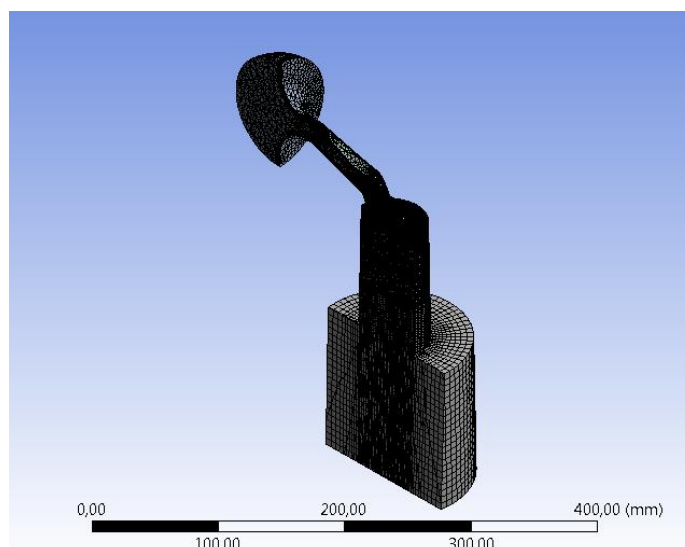


Figura F12. Mallat resultant

Ampliem la zona que ens interessa (*Figura F13*):

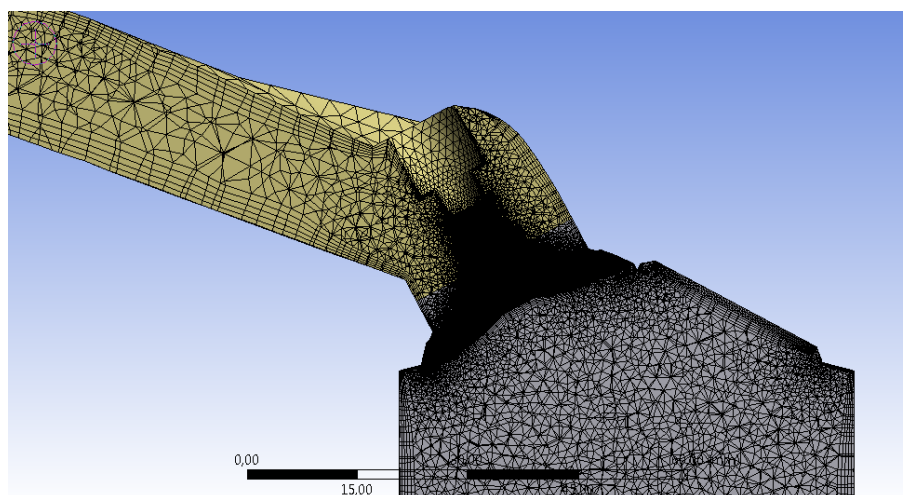


Figura F13. Mallat de la zona del conducte.

Podem observar que la densitat del mallat creix en les zones on el flux esta en condicions extremes: l'aire porta velocitats altes i com a conseqüència les pèrdues provocades també ho són. Per aquest motiu estudiar la zona corresponent és un dels aspectes a destacar. El mallat automàtic crea la malla ordenada i de bona qualitat (*Figura F14*)

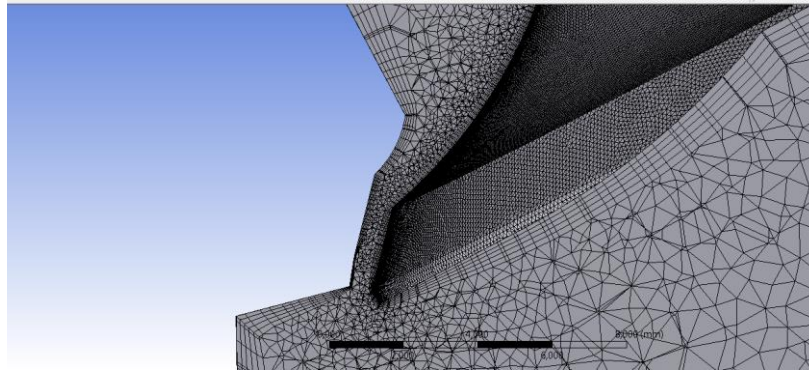


Figura F14. Mallat de la zona del seient.

L'estadística confirma la qualitat del mallat: no superem el llindar de 0.95, a més, la quantitat d'elements que superen el valor de 0.8 és menyspreable (Figura F15 i Figura F16):

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	779056
<input type="checkbox"/> Elements	2118930
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	5,52350962101933E-06
<input type="checkbox"/> Max	0,896768076598124
<input type="checkbox"/> Average	0,197448608411943
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,128071430705349

Figura F15. Asimetria del mallat

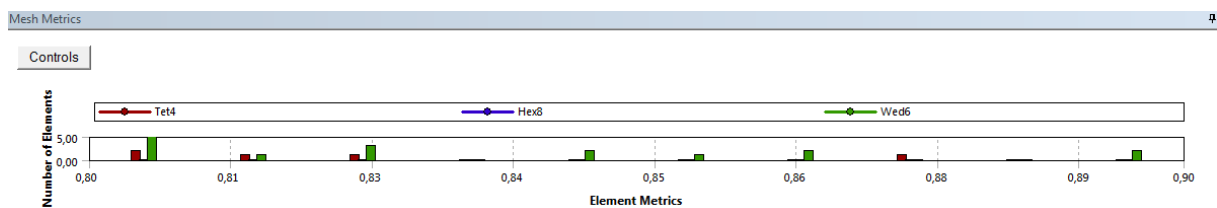


Figura F16. Recompte elements segons la asimetria

L'altre indicador és la qualitat ortogonal, però és fàcilment millorable amb les eines de FLUENT.

Si es vol construir un mallat més dens o millorar les zones disponibles es pot buscar l'apartat corresponent en el menú i modifica'l. Per més informació es pot consultar els tutorials corresponents.

F.5 Set up de la simulació

En aquest apartat es descriu com configurar la simulació i definir tots els paràmetres necessaris. A més, es defineixen els monitors i controladors de la solució.

Els primers passos repeteixen la seqüència descrita en l'Annex I. Cliquem dues vegades sobre la cel·la *Setup* – triem els paràmetres de doble precisió i la quantitat de processadors, tots els paràmetres restants deixem per defecte → OK.

Degut a l'estructura seqüencial del projecte, FLUENT carregarà de manera automàtica tota la informació definida i generada anteriorment, a més, ajustarà els paràmetres de simulació:

- Els models de càlcul necessaris
- La geometria descomposta
- Assignació de condicions de contorn
- Creació de monitors de la solució bàsics
- Inicialització de la solució per mètode FMG

F.5.1 General and Models (ajustos generals i models utilitzats)

El Solver és *Pressure-Based* i el *Time* és *Steady*. Els ajustos actuals permeten avaluar les característiques de flux una vegada s'ha estabilitzat.

En l'apartat *Models* s'ha seleccionat l'equació d'energia i també s'ha definit el model de turbulència *k-omega (2eqn)* i les seves característiques: *Model* → *Standard*, els efectes de compressibilitat i la correcció de flux s'ha activat (*Compressibility Effects* i *Shear Flow Correction*). Aquests ajustos permeten millorar la precisió dels resultat obtinguts. (*Figura F17*):

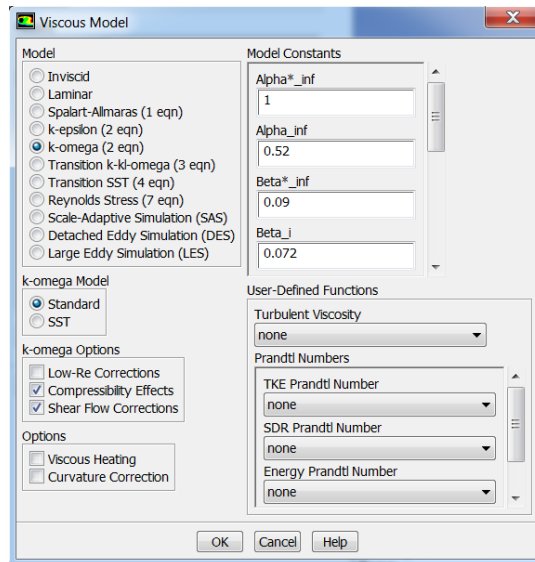


Figura F17. Model de viscositat

F.5.2 Materials

Hi ha dos materials que hem de tenir definits: aire (corresponent al fluid) i alumini (corresponent als parets de la geometria - sòlid).

Les característiques de l'alumini corresponen al metall i s'han definit com a constants, mentre que l'aire s'ha definit com el gas ideal (*Density* → *ideal gas*) i la capacitat calorífica, la viscositat i conductivitat tèrmica – constants (*Figura F18*):

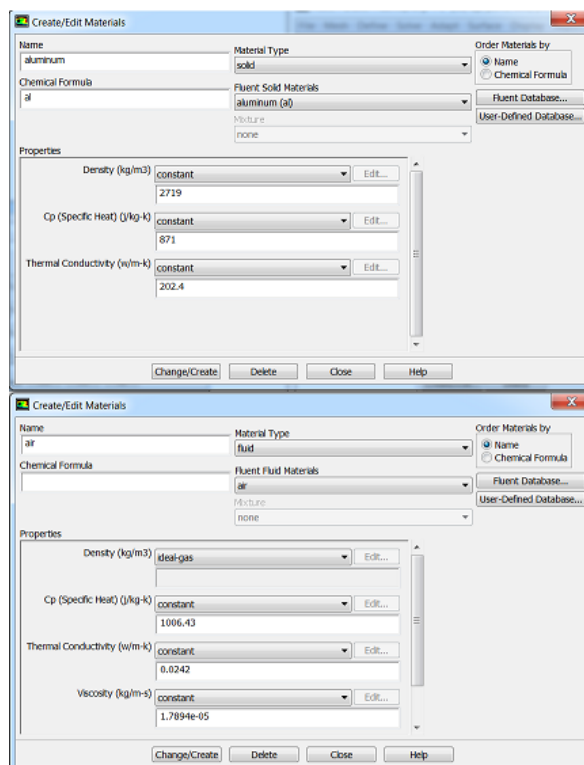


Figura F18. Característiques dels materials emprats

F.5.3 Phases

L'apartat següent està desactivat, ja que en la simulació només treballarem amb una fase del fluid corresponent a l'aire.

F.5.4 Cell zone conditions

Per la correcta simulació hem de definir les zones corresponents al fluid on se solucionaran les equacions actives. Segons la descomposició feta anteriorment el programa reparteix tot el volum de l'aire en parts, segons la seva localització i assigna el material corresponent. En la zona activa no tenim les parts corresponents al sòlid per tant no s'ha creat cap zona del tipus *Solid*.

F.5.5 Boundary conditions (condicions del contorn)

Hi ha moltes zones que s'han definit segons la descomposició feta anteriorment més els dipòsits tranquil·litzadors creats (*Figura F19*). Existeix l'arxiu que permet veure les condicions del contorn i monitors definits anteriorment: `icBcSettings.txt`

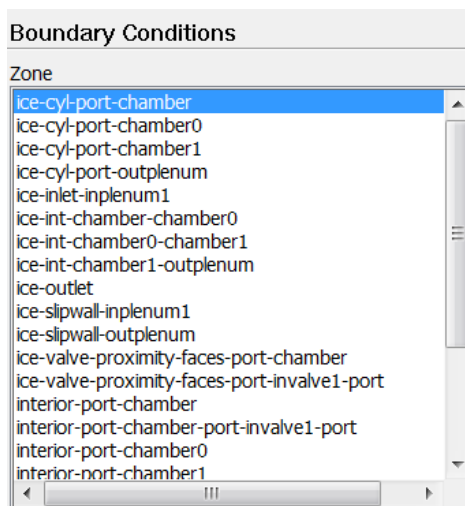


Figura F19. Condicions del contorn

En aquest apartat de les condicions de contorn hem de definir els paràmetres importants que ens permetran avaluar la precisió del programari comparant els resultats de la simulació amb els assaigs en el banc de flux.

En l'Annex A podem observar que disposem de les dades d'obertura de la vàlvula d'admissió, el valor de cabal d'aire màssic i la temperatura indicada en el banc de flux.

La temperatura que haurem d'assignar als contorns del tipus paret correspon a 18 graus C (291.15 K). Aquesta temperatura és la que inicialment ens proporciona el termòmetre abans d'iniciar l'experiment. L'aire a l'entrada inicialment té aquesta temperatura. Degut al funcionament de l'aparell la temperatura al voltant de la zona augmenta, però l'augment es pot negligir. També cal comentar que la temperatura corresponent al *outlet* – cara per on surt el flux en el banc de flux té el seu propi termòmetre, que permetrà avaluar el flux màssic a la sortida. Aquesta temperatura no es diferencia molt de la temperatura ambient i la diferència amb la mitjana de temperatures igual a 1.5 K. Si s'utilitza l'equació d'energia,

durant la fase de preprocés es demana definir la temperatura corresponent a cada superfície sòlida i entrades o sortides de flux. Per tant assumirem que la temperatura del *outlet* és 289.65 K

La depressió mantinguda pel banc de flux és de 6229 Pa.

Aleshores, resumint tota la informació disponible:

- Els contorns del tipus parets tenen la temperatura de 291.15 K (Pestanya *Thermal*), *Shear conditions* → *No Slip* (Valor per defecte per fluxos viscosos)
- *Inlet (ice-inlet-implenum)* es troba a 291.15 K i 0 Pa (pressió relativa).
- Les condicions a la sortida (*ice-outlet*) són 289.65 K i -6229 Pa (pressió relativa).

A la *Figura F20* podem veure les condicions del contorn de l'entrada de flux que correspon al *Pressure Inlet* (Entrada de pressió)

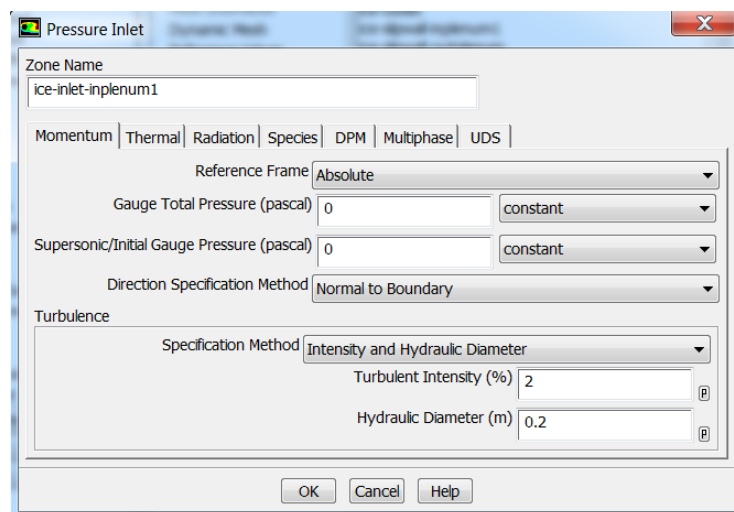


Figura F20. Condicions del contorn per l'entrada de flux

La pressió relativa és 0 Pa, assumint que el motor és d'aspiració natural. La temperatura és de 291.15 K.

Specification Method (Mètode d'especificació) per la turbulència s'ha seleccionat *Intensity and Hydraulic Diameter* (Intensitat i diàmetre hidràulic). La intensitat de turbulència és de 2%, valor que s'assumeix correcte per aquest tipus de simulació, sense considerar les situacions especials.

La *Figura F21* mostra la configuració de la sortida de pressió:

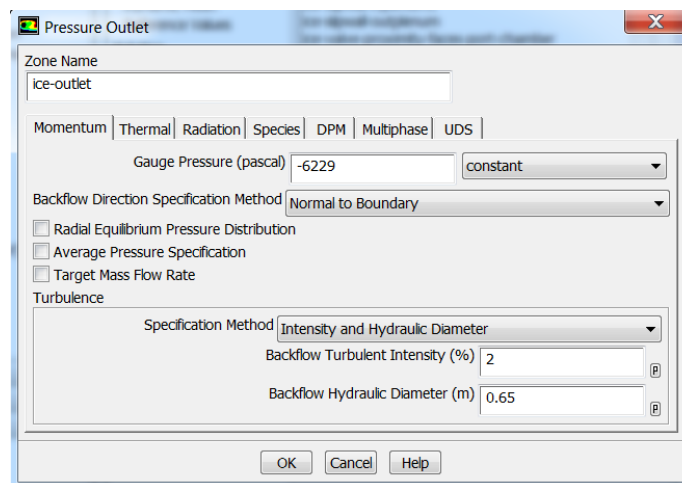


Figura F21. Condicions del contorn de la sortida del conducte d'escapament

La pressió relativa és -6229 Pa. La temperatura és de 289.65 K. Igual que per l'entrada de pressió, deixem el valor de la turbulència del *Backflow* igual a 2%

F.5.6 Mesh Interfaces

Aquesta opció és desactivada.

F.5.7 Dynamic Mesh

Aquesta opció és desactivada, ja que no hi ha parts en moviment, la simulació s'executa en condicions del temps estacionari.

F.5.8 Reference Values

Aquesta pestanya permet establir els valors de referència per càlcul de les variables normalitzades. No establim cap valor de referència.

F.5.9 Solution

Aquest apartat reuneix la informació que fa referència al *set up* de la solució i la inicialització i ajustatge dels monitors i controladors de la solució per la correcta execució d'anàlisi i posterior interpretació dels resultats.

El mètode a utilitzar depèn del mallat utilitzat anteriorment – *Hybrid* o *CutCell*.

F.5.10 Solutions methods

Els ajustos per la resolució del mallat *Hybrid* es mostren a continuació a la *Figura F22*:

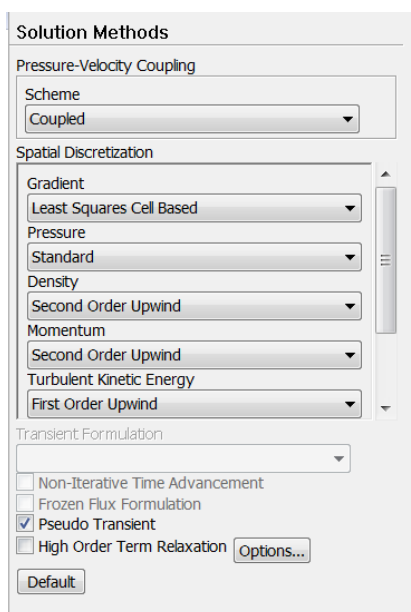


Figura F22. Esquema del mètode de la solució

Alguns aspectes que s'ha de comentar:

- Els paràmetres de la solució s'assignen per defecte segons el tipus d'anàlisi i corresponen als ajustos òptims.
- *Pseudo Transient* és habilitat per augmentar la robustesa i la velocitat de convergència de la solució.

F.5.11 Solution Controls

Tal i com comenta l'Annex I el *Solver* basat en la pressió utilitza sota-relaxació d'equacions per controlar l'actualització de les variables calculades en cada iteració (per més informació és recomanable consultar el guió de teoria corresponent). Això significa que totes les equacions tindran *under-relaxation* factors associats amb ells. Cal tenir en compte que l'opció de *Pseudo Transient* està habilitada i els controladors segueixen la seva configuració (Figura F23).

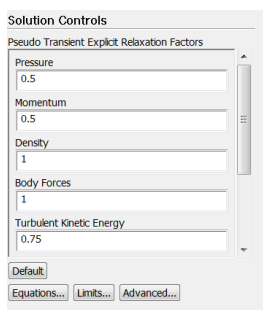


Figura F23. Factors de sota-relaxació

En el mateix apartat estan definits els límits per la pressió i temperatura que no poden ser superats durant la simulació (Figura F24):

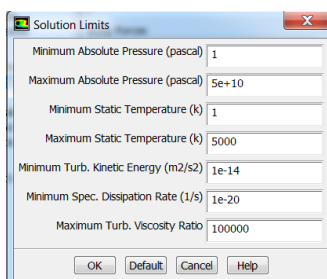


Figura F24. Límits de pressió i temperatura durant la simulació

F.5.12 Monitors

Aquí hem de definir els monitors de la solució. La definició correcta i adequada dels paràmetres a monitoritzar permetrà obtenir les dades necessàries per l'anàlisi posterior.

IC Engine defineix els monitors que inclourà en el report que es genera al final de l'execució de la simulació. Els monitors definits per defecte són els monitors de *swirl* en els plans definits durant la fase de descomposició de la geometria. També es controla el flux màssic a través de la superfície d'entrada d'admissió i la sortida corresponent al part baixa del cilindre. Afegim el monitor de flux màssic. Els monitors corresponents es pot veure a la *Figura F25*:

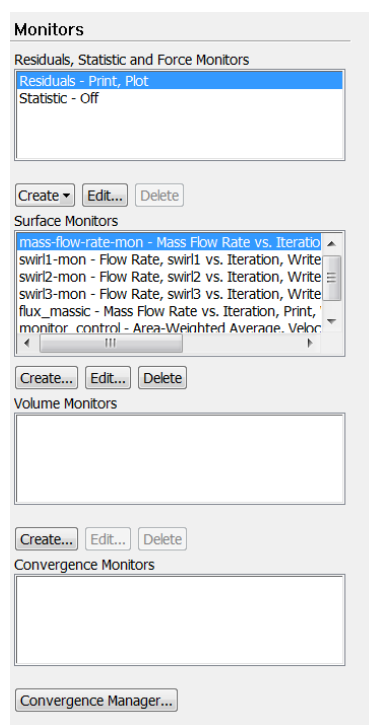


Figura F25. Monitors de la solució

El monitor de convergència serà el monitor superficial basat en control de *Area-Weighted Average* (Àrea mitjana ponderada) de la variable velocitat sobre la superfície *ice-int-chamber1-outplenum*. Aquesta correspon a l'últim pla definit per l'avaluació de *swirl* (*Figura F26*).

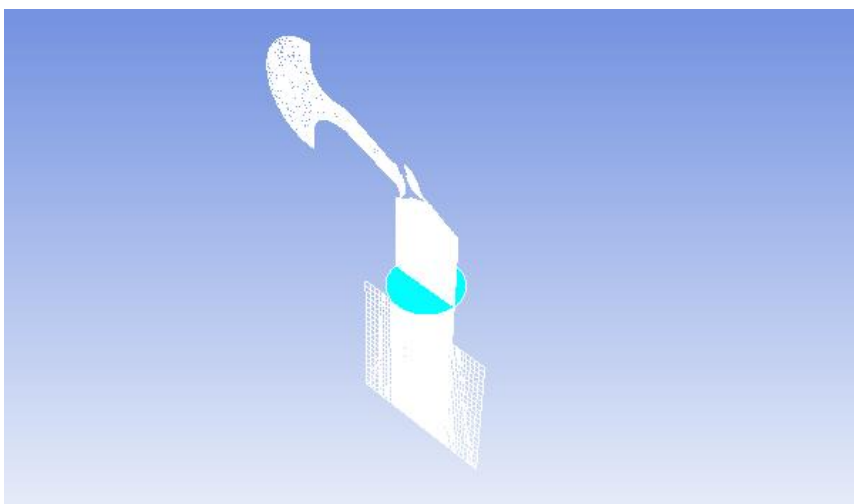


Figura F26. Superfícies de control de la solució

Aquest monitor permetrà avaluar la mitjana de les velocitats (que representen el conjunt de dades) ponderades en el pla i comparar-lo al llarg de la simulació. Quan la variació sigui molt petita, això serà l'indicador de que la solució s'ha convergit.

En l'apartat *Convergence Manager* activem el monitor corresponent (*Figura F27*):

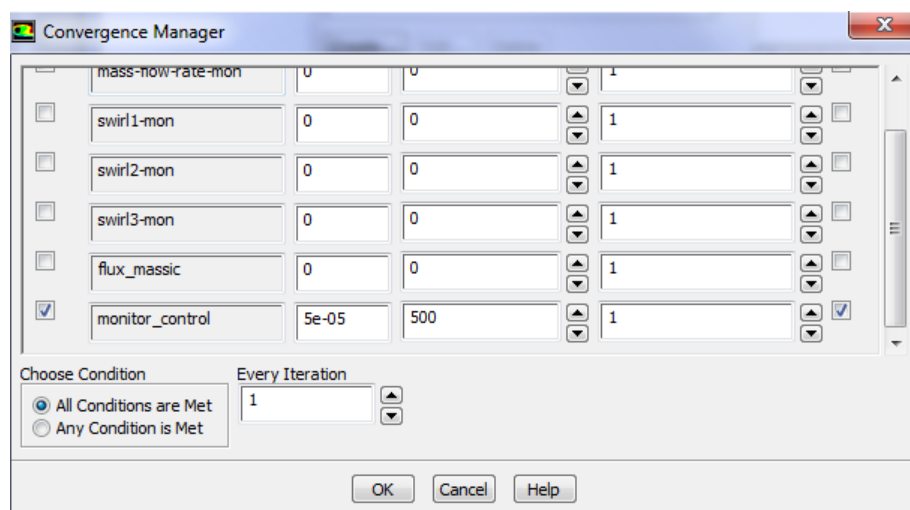


Figura F27. Convergence Manager

Descartem primeres 500 iteracions degut a les fluctuacions inicials, en el criteri de parada introduïm el valor 5e-05 que serà el mínim per a satisfer la condició de parada.

F.5.13 *Solution Initialization* (Inicialització de la solució)

El *toolbox* IC Engine inicialitza la solució de manera automàtica segons el algoritme FMG.

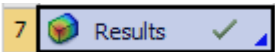
F.5.14 *Calculation activities*

Es deixen tots els valors per defecte.

F.5.15 *Run Calculation*

En aquest apartat podem indicar el límit d'iteracions a executar. Si la solució no es convergeix al finalitzar el nombre de iteracions establert es pot continuar des de l'últim punt guardat. Deixem el valor *Number of Iterations* igual a 1000.

F.5.16 *Obtenció de resultats.*

Una vegada s'ha convergit la solució podem obtenir les dades necessàries directament des de FLUENT o entrant en la cel·la  (després de tancar el FLUENT s'ha de actualitzar la cel·la 7 corresponent als resultats).

En el FLUENT ens interessa obtenir el valor numèric del cabal circulant. El procediment és següent:

- En la pestanya *Results* seleccionem *Reports* → *Fluxes* i cliquem *Set up*. (Figura F28)
- Per defecte el programa calcula el flux màssic de la superfície que triem. Seleccionem *ice-outlet* i cliquem *Compute*. En la finestra apareix el valor numèric (Figura F29):

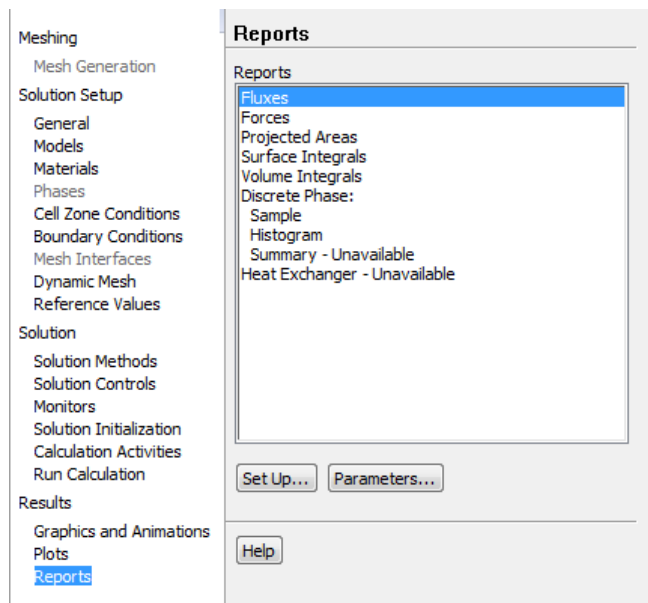


Figura F28. Finestra de resultats

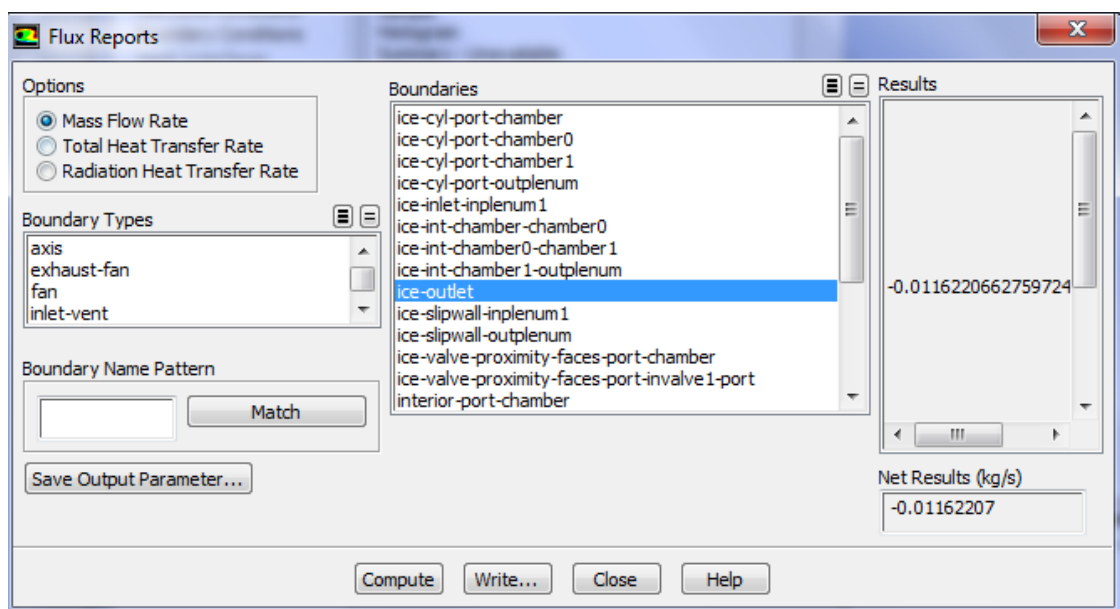


Figura F29. Report del flux màssic

Per la obtenció del nombre de *swirl* la millor manera és consultar el *Report* generat al final de la simulació en format *.html*:

Per fer-ho primer visualitzem tots els arxius de la simulació en la finestra del projecte: *View - > Files*, Despres busquem l'arxiu *Report.html*

Obrint l'arxiu en la carpeta corresponent podem obtenir el resum de tots els monitors controlats i molta més informació. En el nostre cas controlarem la ràtio de flux a través de la superfície situada a 71.3 mm (*Figura F30*):

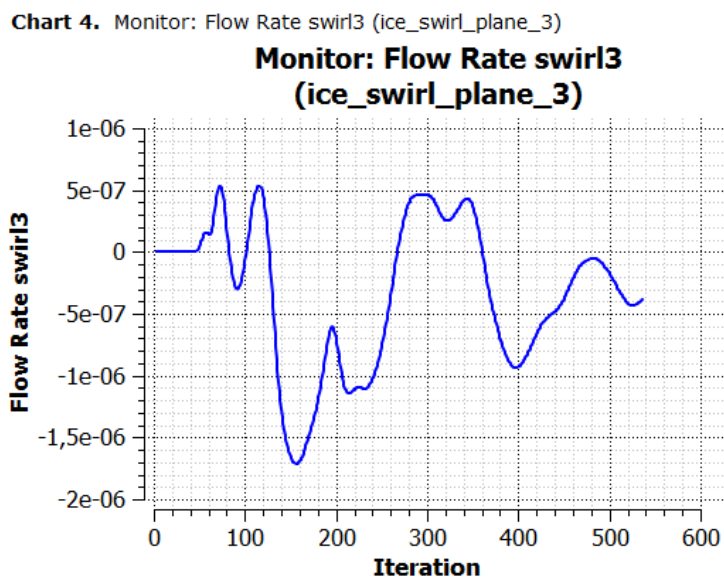


Figura F30. Flow Rate a través de la superfície de control. Part del Report.

Els valors dels monitors de la solució poden ser exportats en l'Excel amb el seu anàlisi posterior.

ANNEX G. GENERACIÓ DE REPORT

G.1 Introducció

En aquest Annex s'explica com interpretar els resultats generats en cada simulació.

G.2 Generació de Report

Una vegada s'ha convergint la solució, tanquem el FLUENT i iniciem la generació del *report* de la simulació, clicant sobre la cel·la corresponent -> *Update* (Figura G1):

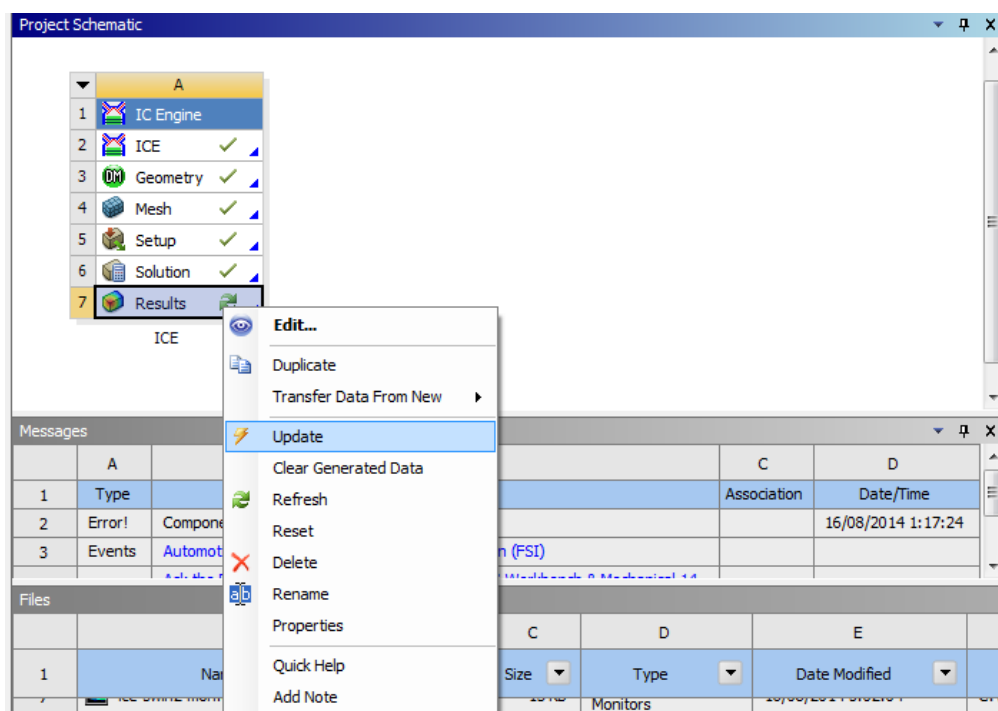


Figura G1. Procés de creació del report

Si consultem els arxius del projecte, trobem l'arxiu *Report.html* (Figura G2):










Files				
	A	B	C	D
1	Name	Cell ID	Size	Type
9	 ice-mass-flow-rate-mon.out	A5	13 KB	FLUENT Surface Monitors
10	 ICE.1.set	A5	49 KB	FLUENT Model File
11	 ICE.1-2.cas.gz	A6	58 MB	FLUENT Case File
12	 ice-swirl3-mon.out	A5	13 KB	FLUENT Surface Monitors
13	 ICE.1-2-00521.dat.gz	A6	363 MB	FLUENT Data File
14	 ICE.1.msh	A4,A5	126 MB	Fluent Mesh File
15	 Report.html	A7	17 KB	Default File
16	 ICEngineView.xml	Global	580 B	.xml

Figura G2. Report generat

Amb la informació disponible en aquest arxiu podem interpretar els resultats obtinguts i obtenir les dades representatives de manera automàtica, sense analitzar manualment els resultats. A la *Figura G3* poden veure l'índex del *report* generat de la simulació *Port Flow* i la *Figura G4* mostra l'índex del report *Cold Flow*:



Title
IC Engine Port Flow Simulation Report

Date
2014/08/15 00:55:24

Contents

- [1. File Report](#)
- [Table 1](#) File Information for ICE
- [2. Mesh Report](#)
- [Table 2](#) Mesh Information for ICE
- [3. Setup](#)
- [Table 3](#) Boundary Conditions
- [Table 4](#) Models
- [Table 5](#) Equations
- [Table 6](#) Relaxation
- [Table 7](#) Pressure-Velocity Coupling
- [Table 8](#) Discretization Scheme
- [4. Solution Data](#)
- [4.1. Animation: velocity-magnitude on "ice_cutplane_1"](#)
- [4.2. Table: velocity-magnitude on "ice_swirl_plane_1" "ice_swirl_plane_2" "ice_swirl_plane_3"](#)
- [4.3. Table: velocity-magnitude on "ice_cutplane_1"](#)
- [4.4. Residuals](#)
- [4.5. Charts](#)
- [Chart 1](#) Monitor: Mass Flow Rate (ice-inlet-inplenum1 ice-outlet)
- [Chart 2](#) Monitor: Flow Rate swirl1 (ice_swirl_plane_1)
- [Chart 3](#) Monitor: Flow Rate swirl2 (ice_swirl_plane_2)
- [Chart 4](#) Monitor: Flow Rate swirl3 (ice_swirl_plane_3)
- [Chart 5](#) Convergence history of Mass Flow Rate on ice-outlet (in SI units)
- [Chart 6](#) Convergence history of Velocity Magnitude on ice-int-chamber1-outplenum (in SI units)

Figura G3. Índex del report Port Flow



Title

IC Engine Cold Flow Simulation Report

Date

2014/08/21 19:03:46

Contents

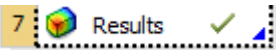
- [1. File Report](#)
- [Table 1](#) File Information for ICE
- [2. Mesh Report](#)
- [Table 2](#) Mesh Information for ICE
- [Chart 1](#) Monitor: Volume-Average Cell Equivolume Skew (fluid-ch)
- [Table 3](#) Cell count at crank angles
- [3. Setup](#)
- [3.1. Physics](#)
- [Table 4](#) Boundary Conditions
- [3.2. Piston and Valves Lift profiles](#)
- [3.3. Valves Lift profiles](#)
- [3.4. Relaxations](#)
- [Table 5](#) Relaxations at crank angles
- [3.5. Dynamic Mesh Setup](#)
- [Table 6](#) Dynamic Mesh Events
- [3.6. IC Engine System Inputs](#)
- [4. Solution Data](#)
- [4.1. Animation: mesh-on-ice_cutplane_1](#)
- [4.2. Animation: velocity-magnitude on "ice_cutplane_1"](#)
- [4.3. Table: mesh-on-ice_cutplane_1](#)
- [4.4. Table: velocity-magnitude on "ice_cutplane_1"](#)
- [4.5. Table: Residuals](#)
- [4.6. Charts](#)
- [Chart 2](#) Swirl Ratio
- [Chart 3](#) Tumble Ratio
- [Chart 4](#) Cross Tumble Ratio
- [Chart 5](#) Monitor: Mass-Average Static Temperature (fluid-ch)
- [Chart 6](#) Monitor: Volume-Average Static Pressure (fluid-ch)
- [Chart 7](#) Convergence history of Mass Flow Rate on ice-inlet-invalve-1-port (in SI units)

Figura G4. Índex del report Cold Flow


En el CD amb material addicional es pot trobar els *reports* de cada simulació realitzada per aquest projecte.

G.3 Results

Per la correcte interpretació dels resultats i la comprensió dels fenòmens analitzats es pot visualitzar els paràmetres bàsics en el domini de la geometria o calcular els paràmetres d'interès.

L'apartat corresponent als resultats  permet visualitzar el comportament de flux per localitzar els punts crítics del disseny, crear gràfiques de diferents paràmetres - en general representa una eina molt potent de postprocés.

El procediment a seguir és:

- Triar el informe que es vol representar: . Per exemple: vectors, contorns, línies de flux, representació volumètrica, etc.
- Triar el domini i el lloc dins de la zona delimitada per la geometria. Triar els ajustos del temps (*Cold Flow*)

- Seleccionar la variable a representar: pressió ,velocitat, densitat, etc.

ANNEX H. MILLORES DEL DISSENY ORIGINAL

H.1 Introducció

Un dels objectius del treball consisteix en l'aplicació del programari estudiat per avaluar les millores proposades per motor a estudiar.

En el disseny del motor hi ha molts aspectes on es pot introduir millores, incloent les parts d'admissió, escapament, ignició, injecció de combustible, etc.

En el treball s'estudia el comportament de flux en la culata del motor, fixant el punt d'estudi sobre la fase d'admissió. Per aquest motiu, l'estudi es concentra en el conducte i la vàlvula d'admissió.

H.2 Fases de l'estudi

La major atenció es concentra en estudiar el conducte d'admissió i la vàlvula corresponent. Per tal de seguir una seqüència de treball ordenada, els passos a realitzar seran els següents:

1. Avaluar el disseny actual
2. Proposar millores a base d'anàlisi de flux i consultant la literatura especialitzada, propostes han de ser realitzables.
3. Modificar el disseny i avaluar-lo amb el programari
4. Si la millora es considera ineficient – tornar al pas 2.

Aquest procediment s'aplicarà a la vàlvula i el conducte per separat, avaluant el coeficient de descàrrega i la millora de *swirl* sobre la geometria estàtica. Una vegada avaluats els dissenys millorats, es farà la simulació del conjunt que dona millors característiques fent l'anàlisi *Cold Flow* i els resultats es compararan amb la geometria inicial, fent les conclusions pertinents.

H.3 Breu descripció teòrica

H.3.1 Conducte d'admissió

La idea bàsica és augmentar la pressió d'admissió de la barreja aire/combustible en la cambra. Un petit augment de pressió afectarà de manera positiva la potència del motor. Per aconseguir-ho s'ha de permetre el pas del flux a major velocitat i la menor resistència possible. La millora s'aconsegueix corregint la forma d'alguns elements del conducte.

Hi ha teories sobre la forma del conducte ideal i com s'ha de millorar el conducte. La idea que es vol transmetre és la necessitat d'evitar els canvis bruscos de secció, no canviar la direcció de flux de manera sobtada i no crear obstacles innecessaris en el pas de flux.

També hi ha la possibilitat d'introduir canvis de forma especialment per induir el *swirl* i *tumble*, però aquest procediment requereix modificacions radicals.

La *Figura H1* mostra el conducte de sèrie A i el conducte B rebaixat inadequadament. La *Figura H2* mostra el port adequat:

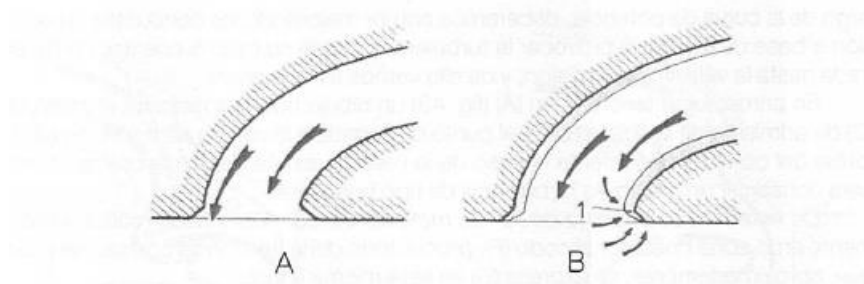


Figura H1. Conducte de sèrie i modificació inadequada (GILLIERI,2005)

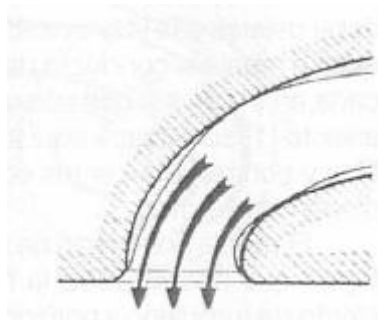


Figura H2. Modificació eficient (GILLIERI,2005)

Per identificar els punt crítics, analitzem el perfil de velocitats en el pla que talla el conducte pel centre (estudiarem el cas d'obertura de 0.5 mm, ja que aquest cas és el mes restrictiu pel pas de fluid). A la *Figura H3* podem veure com els canvis bruscos afecten al flux:

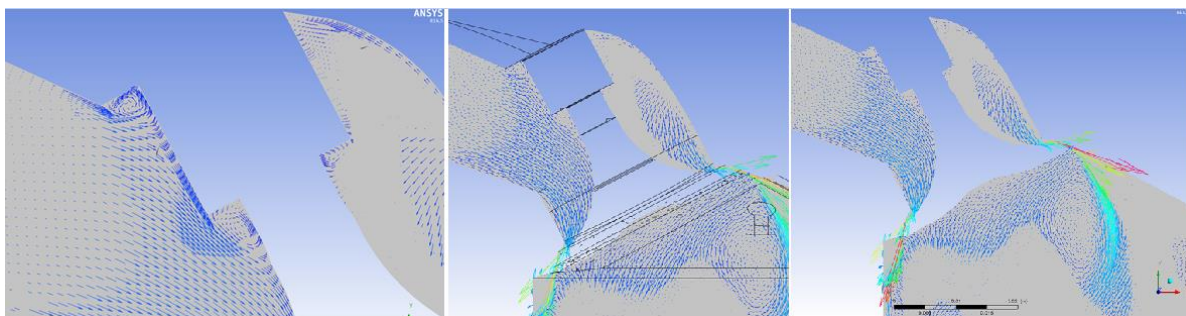


Figura H3. Visualització de vectors de velocitat

La *Figura H4* mostra la geometria de simulació i vectors de velocitats. A la *Figura H5* estan marcats els punts que es consideren crítics.

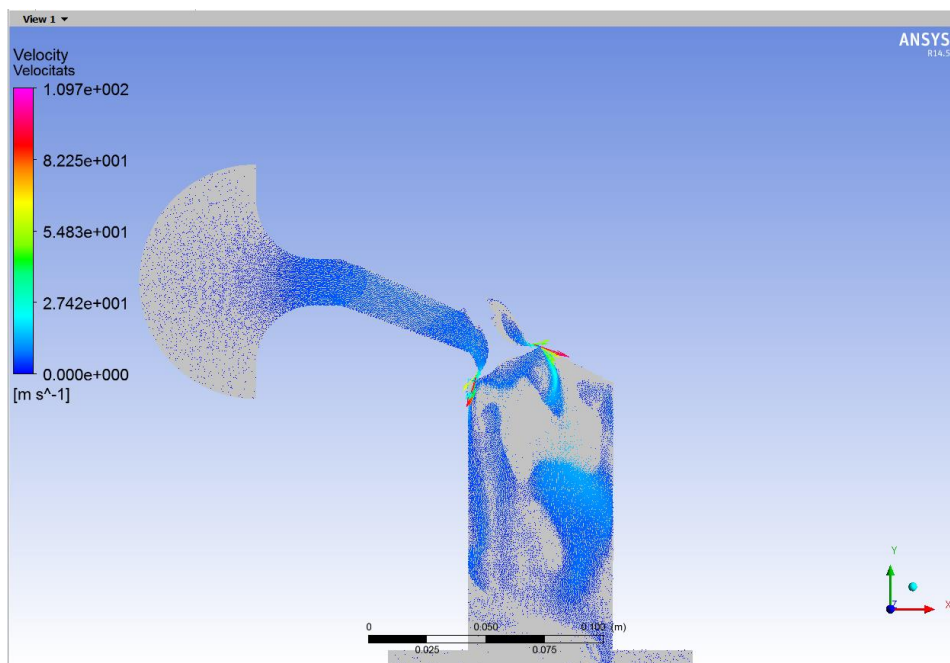


Figura H4. Vectors de velocitat en el pla central

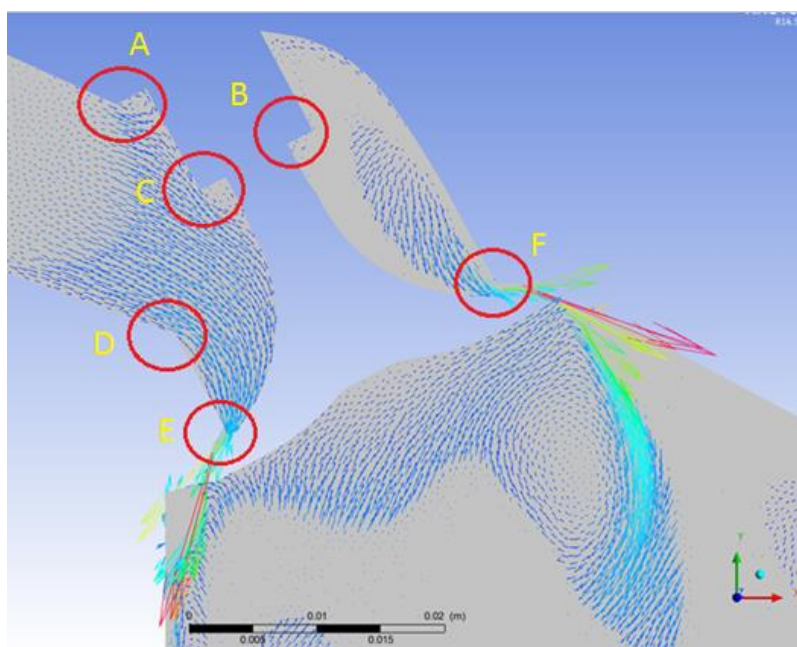


Figura H5. Punts crítics de la geometria

En els punts marcats amb vermell el flux pateix els fenòmens que volem evitar. Per exemple, els punts A, B i C mostren com el disseny inapropiat del conducte genera remolins de l'aire dins del flux d'admissió. A més, el xoc produït genera la pèrdua de càrrega.

L'objectiu és, com a mínim, disminuir aquests fenòmens, però els canvis a introduir han de ser realitzables. Aleshores, arrodonirem les seccions anteriors, però de tal manera que el procediment anterior sigui realitzable mecànicament.

En segon lloc, el punt D és un dels punts claus a millorar, ja que correspon al canvi de secció brusca a prop de la vàlvula. La proposta serà donar la forma més arrodonida a la secció per tal de guiar el flux de manera més eficient.

De manera anàloga en els punts E i F s'ha de rebaixar el material i donar la forma arrodonida al conducte.

La *Figura H6* mostra la geometria original, mentre que a la *Figura H7* s'observen els canvis aplicats.

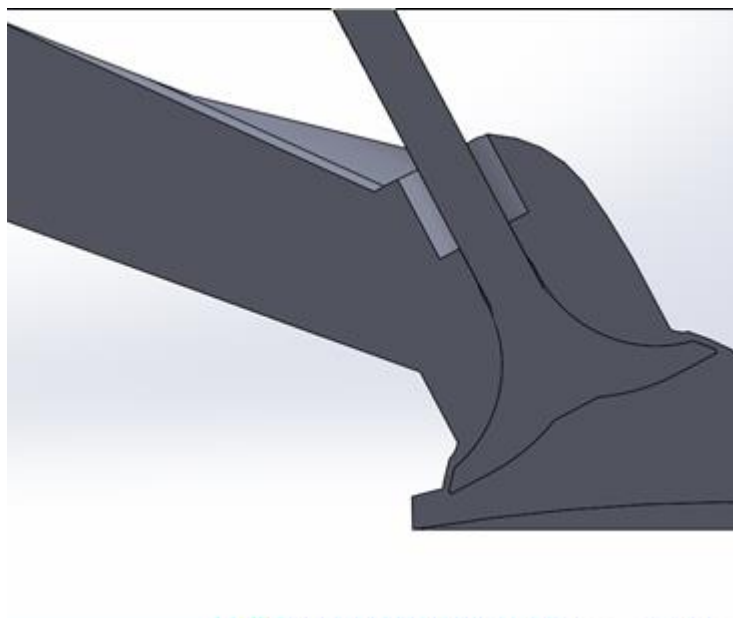


Figura H6. Conducte original

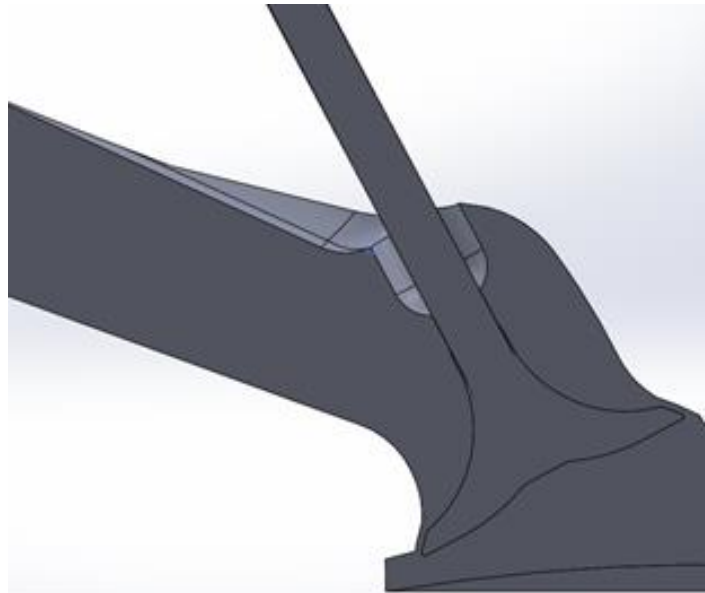


Figura H7. Conducte modificat

H.3.2 Vàlvula d'admissió

En el cas de les vàlvules hi ha molts aspectes que poden ser estudiats:

- Dimensions de les vàlvules
- Inclinació dels seients
- Altura d'obertura
- Forma

Des del punt de vista fluidodinàmic, el punt principal a estudiar és la forma de la vàlvula. L'altura d'obertura, el diàmetre de la vàlvula i la inclinació del seient – tots aquests paràmetres es deixaran sense modificar.

La forma de la vàlvula determina la direcció del flux entrant i també limita la seva quantitat. Aleshores, es procedirà a rebaixar la part més crítica corresponent a l'angle de formació de copa (indicat 1) tal i com mostra la *Figura H8*:

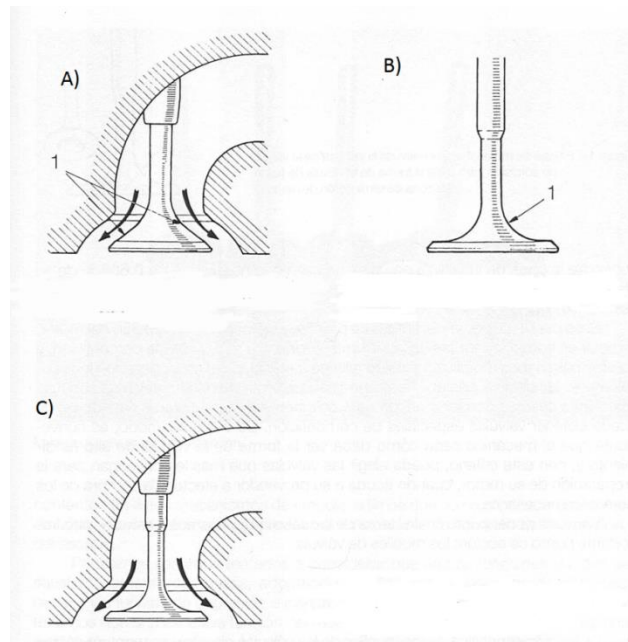


Figura H8. Vàlvula de sèrie A) i modificada B) i C) (GILLIERI,2005)

La hipòtesi que volem estudiar proposa la vàlvula modificada com la solució per introduir més capacitat de flux durant la fase d'admissió.

Seguint les indicacions de la literatura s'ha desenvolupat el disseny alternatiu de la vàlvula tal i com mostra la *Figura H9*.

Cal remarcar que anteriorment s'ha provat molts dissenys diferents i aquest és el millor des de la perspectiva de millora de la massa d'aire admesa.

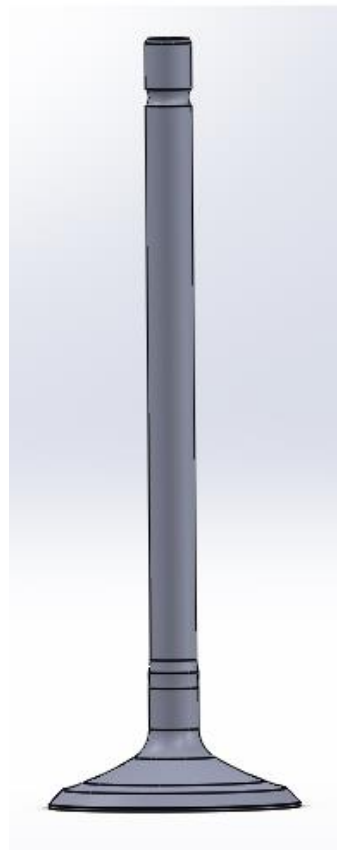


Figura H9. Vàlvula modificada

I les dimensions de la vàlvula d'admissió es pot veure a la *Figura H10*:

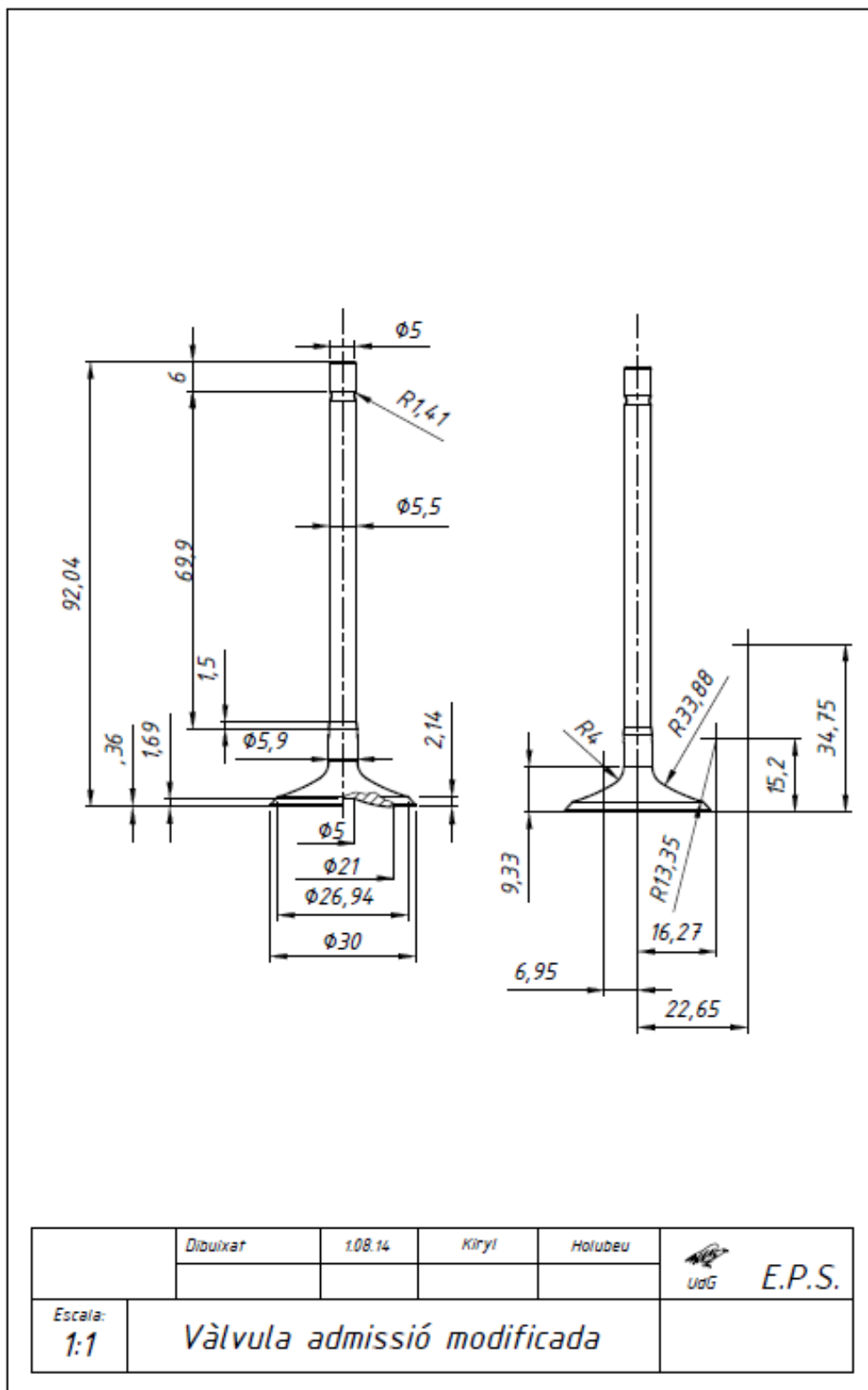


Figura H10. Dimensions de la vàlvula d'admissió modificada

ANNEX I. SEGUIMENT *COLD FLOW*

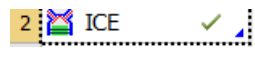
I.1 Introducció

En aquest annex s'expliquen els passos necessaris per la realització correcta de la simulació de flux en fred (*Cold Flow*). El procediment explicat a continuació permet realitzar correctament la simulació i interpretar els resultats obtinguts.

L'anàlisi es realitza mitjançant l'ús del *toolbox* especialment desenvolupat que permet automatitzar el procés d'estudi del motor, proporcionant una eina molt útil i reduint el temps de tots els passos que segueixen a continuació.

I.2 Inicialització entorn ANSYS

Els primers passos de la seqüència de creació del projecte d'anàlisi *Cold Flow* correspon als passos explicats en l'Annex F :

- Obrir el *Workbench* de ANSYS
- En la finestra de *toolbox* seleccionar el sistema d'anàlisi corresponent – IC Engine
- Arrastrar-lo en l'àrea del projecte
- Clicar sobre la cel·la  en la finestra de propietats en el tipus de simulació seleccionar *Cold Flow Simulation*
- Guardar el projecte

Fins aquest moment no hem de carregar cap arxiu ni definir els paràmetres. Durant les etapes posteriors haurem de seguir les indicacions del programa per completar la informació necessària.

I.2.1. Preparació anàlisi *Cold Flow*

Abans de procedir amb la importació de les dades necessàries, en la carpeta on s'ha creat el projecte es necessita copiar dos arxius:

- *LIFT.txt* – arxiu corresponent als perfils d'obertura i tancament de les vàlvules en funció de l'angle de cigonyal. Els perfils corresponen a les dades reals obtingudes dels assaigs fets sobre el motor. El seu format segueix l'esquema representat a la *Figura I1*:

```
((profile-name point m n)
 (angle  a11 a12 ... a1n
        a21 a22 ... a2n
        .
        .
        .
        am1 am2 ... amn)
(lift  l11 l12 ... l1n
      l21 l22 ... l2n
      .
      .
      .
      lm1 lm2 ... lmn))
```

Figura I1. Format de l'arxiu LIFT.txt (ANSYS, Inc., 2012)

Profile-name correspon al nom assignat a la vàlvula (per exemple: *invalve* o *exvalve*). El seu tipus pot ser *point* o *transient*. En el cas de tenir un conjunt de punts s'ha d'indicar el tipus *point*. Els paràmetres dels angles corresponents quan la vàlvula s'obre i tanca corresponen a la columna *angle*, mentre que l'alçada d'obertura – columna *lift*. Aquestes dades s'ha d'introduir per l'ordre, és a dir, a cada *angle* li correspon el *lift* corresponent. A continuació es mostra l'exemple per la vàlvula d'admissió (*Figura I2*):

```
((invalve point 32 1) (lift
 (angle
 0
 315
 350
 362
 371
 378
 385
 390
 398
 405
 412
 419
 428
 438
 452
 468
 476
 487
 500
 510
 518
 525
 532
 538
 545
 551
 558
 565
 574
 585
 607
 720
 )
 0
 0.0005
 0.001
 0.0015
 0.002
 0.0025
 0.003
 0.0035
 0.004
 0.0045
 0.005
 0.0055
 0.006
 0.0065
 0.0067
 0.0067
 0.0065
 0.006
 0.0055
 0.005
 0.0045
 0.004
 0.0035
 0.003
 0.0025
 0.002
 0.0015
 0.001
 0.0005
 0
 0
 0
 ))
```

Figura I2. Format de dades per les vàlvules

Cal dir que el nombre de perfils de vàlvules no està limitat, aleshores es pot tenir tants perfils com vàlvules hi hagi, a més, hi ha la possibilitat d'introduir el perfil de moviment del pistó,

però aquest no és obligatori, ja que posteriorment s'introdueixen les dades que permeten calcular el seu desplaçament de manera automàtica.

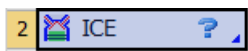
Els perfils d'obertura de les vàlvules es pot trobar consultant l'Annex A.

- CULATA.x_t – arxiu corresponent a la geometria en format *Parasolid*. Per a més informació consultar l'Annex A.

1.2.2 Set up de la simulació del motor

Després de crear el nou projecte i preparar tots els arxius mínims necessaris el pas següent és introduir els paràmetres del motor i seleccionar el tipus d'anàlisi que es vol executar.

Fent un clic doble sobre la línia 2



apareix la finestra amb les propietats del motor (*Figura 13*):

Properties of Schematic A2: ICE				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	P
2	[-] General			
3	Component ID	ICE		
4	Directory Name	ICE		
5	[-] Notes			
6	Notes			
7	[-] Used Licenses			
8	Last Update Used Licenses	Not Applicable		
9	[-] Simulation Type			
10	Simulation Type	Cold Flow Simulation		
11	[-] Engine Inputs			
12	Connecting Rod Length	97	mm	
13	Crank Radius	28,75	mm	
14	Piston Offset/ Wrench	0	mm	
15	Engine Speed	1800	rev min ⁻¹	
16	Minimum Lift	0,3	mm	
17	Valve Lift And Piston Motion Profile	ICE\ICE\LIFT.txt		
18	[-] Solver Setup			
19	Solver Settings File	ICE\ICE\cSolverSettings.txt		
20	Default Boundary Conditions and Monitor Settings	ICE\ICE\cBcSettings.txt		
21	[-] Journal Customization			
22	User Boundary Condition Profiles			
23	User Boundary Conditions and Monitor Settings	ICE\ICE\cUserSettings.txt		
24	Pre Iteration Journal			
25	Post Iteration Journal			

Figura 13. Propietats del motor

Simulation Type

Primer, seleccionem el tipus de simulació (línia 10). En aquest cas és l'anàlisi *Cold Flow*.

Paràmetres geomètrics del motor

La línia següent (11) fa referència als paràmetres geomètrics i de simulació del motor. Aquesta secció és activa només per la simulació del flux en fred. Els paràmetres estan definits en l'Annex A.

Concretament, necessitem la longitud de biela (línia 12), radi de manovella (línia 13) – equivalent a la mitja distància de la cursa, *piston offset/wrench* (línia 14) - desviació del punt de contacte de la biela amb el pistó i el punt corresponent a l'eix que passa pel centre del cilindre, en el cas de *piston offset* representat a la *Figura 14*:

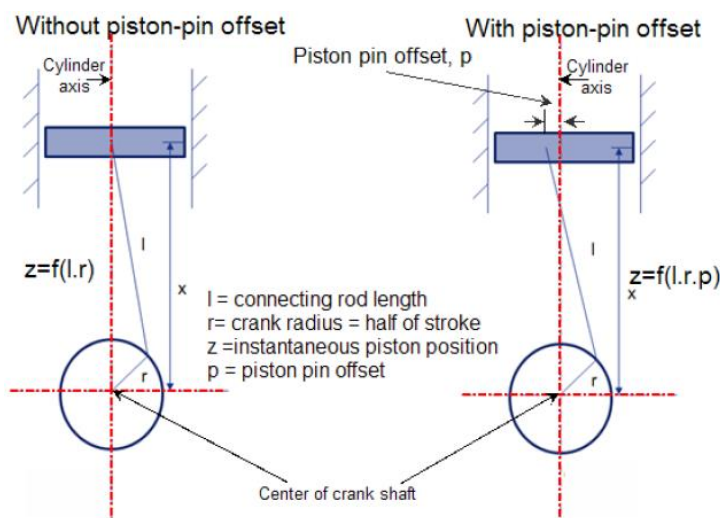


Figura 14. Piston offset (ANSYS, Inc., 2012)

Piston wrenching és la no-alineació de l'eix del cilindre i l'eix que passa pel centre de l'eix del cigonyal (*Figura 15*):

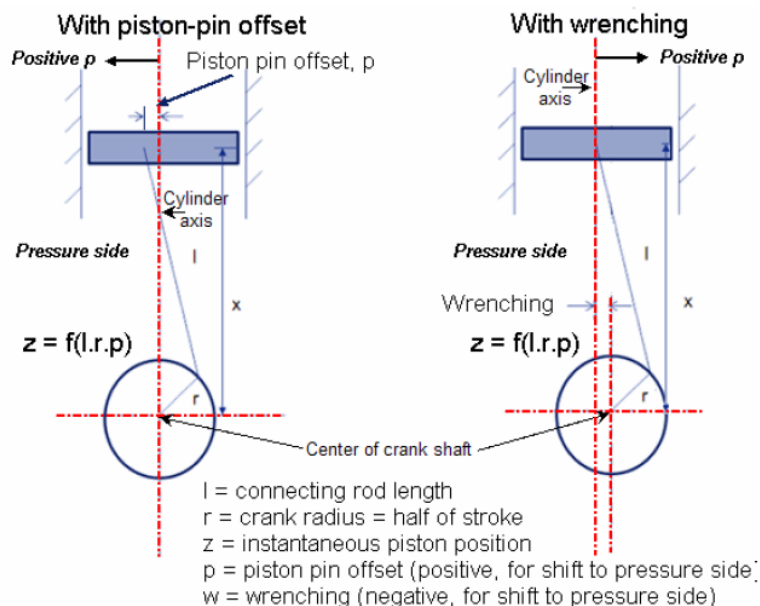


Figura 15. Representació de piston wrenching (ANSYS, Inc., 2012)

Aquestes dues solucions geomètriques persegueixen el mateix efecte – disminució de la resistència de gir del conjunt biela-manovella quan el pistó es troba en el punt mort superior. Com a conseqüència l'esforç que han d'aguantar els materials disminueix, igual que les acceleracions, podem utilitzar els components més lleugers, disminuïm les inèrcies, augmentem la potència útil del motor, els regims de gir poden ser més alts i millorem les prestacions en general.

A la *Figura 15* es pot veure que aquests dos paràmetres poden ser negatius o positius segons les indicacions.

Paràmetres de la simulació

La línia 15 permet seleccionar el regim en revolucions per minut pel qual volem executar la simulació. Aquest paràmetre juntament amb el *step size* del cigonyal determinen la longitud temporal del pas per la simulació.

El paràmetre té el valor definit per defecte igual a 1800 rpm. Executarem la simulació en aquest règim. Si posteriorment tinguem la necessitat de canviar-lo podem seleccionar la casella corresponent i deixar aquest paràmetre com variable *input*.

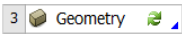
La línia 16 demana l'alçada mínima de les vàlvules i el seu valor per defecte és de 0.2 mm. L'explicació d'aquest paràmetre és la següent: FLUENT assumeix que una vegada que s'ha configurat la topologia de malla, aquesta és invariable al llarg de tota la simulació. Per tant, el software no permet el tancament total de les vàlvules de manera que els elements del mallat entre la vàlvula i el seient de la vàlvula tinguin el volum aproximadament igual a 0 (es converteixen en elements plans, fent impossible el càlcul quan aquestes superfícies vénen en contacte). Per a evitar aquest col·lapse, és necessari definir una elevació de la vàlvula mínima. Aleshores, el programa aturarà automàticament el moviment de la vàlvula quan l'elevació de la vàlvula és menor que el valor mínim d'elevació. Canviem el valor a 0.3 mm, ja que posteriorment aquest canvi permetrà obtenir un mallat de més qualitat.

Totes les dades que fan referència a la configuració del *Solver* (càlcul de solució) i *Boundary conditions* (condicions del contorn) es configuren de manera automàtica i s'aniran actualitzant durant el procés de configuració de cel·les.

I.3 Importació de la geometria

La geometria del motor per ser importada ha de reunir les característiques següents:


- Pistó situat en el punt mort superior
- Vàlvules no han de ser estretes del volum dels conductes. És a dir, la cambra de combustió i els *ports* (conductes) representen la secció de pas disponible per l'aire, mentre que les vàlvules s'importen juntament amb la geometria dels *ports* però sense restar els dos volums.
- Les vàlvules han de ser alineades i posicionades per sota del seient corresponent.

Per l'importar la geometria fem el doble clic sobre la cel·la corresponent 

1.3.1 ICE-DesignModeler

S'obra la finestra corresponent al *ICE-DesignModeler*. És el programari CAD que permet treballar amb les geometries 2D i 3D. Segons l'experiència obtinguda durant la realització de les simulacions amb el software ANSYS l'opció preferible a l'hora de importar la geometria creada és convertir-la en format *Parasolid*, ja que el format original de SolidWorks molt sovint dona problemes.

El següent pas és importar la geometria. En el menú *File* seleccionem *Import External Geometry File* i en la carpeta del projecte triem l'arxiu CULATA.x_t

Una vegada hem carregat l'arxiu s'ha de generar-lo dins del programa. Cliquem sobre el botó  **Generate**. A la *Figura 16* podem veure la geometria importada:

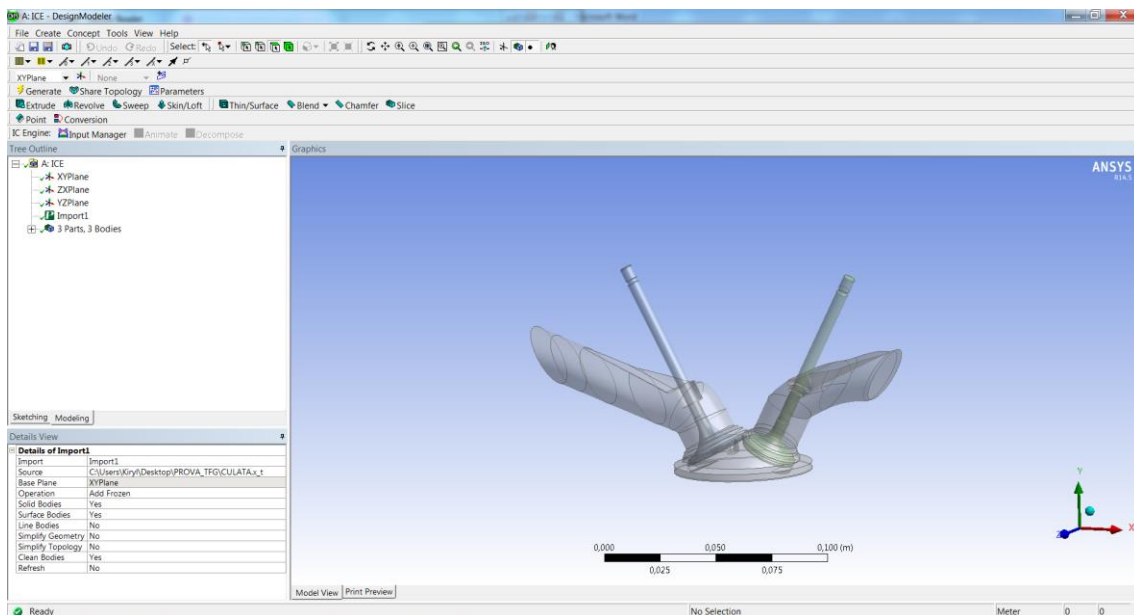
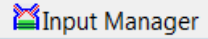


Figura 16. Geometria importada

1.3.2 Descomposició de geometria

Ara s'ha de descompondre el conjunt indicant diferents zones que en formen part.

Obrim el *Input Manager* fent clic sobre el botó . A la *Figura 17* es mostra la finestra on s'ha d'assignar els components:

Details View	
Details of InputManager1	
Name	InputManager1
Inlet Faces	Not selected
Outlet Faces	Not selected
Cylinder Faces	Not selected
Decompose Chamber	Yes
IC Plane Insert Option	Manual
Top Plane/Face	Not Selected
Bottom Plane/Face	Not Selected
Piston Profile Option	No
Symmetry Face Option	No
IC Valves Data 1 (RMB)	
Valve Type	InValve
Valve	Not selected
Valve Seat	Not selected
Valve Profile	invalve
IC Animation Inputs (RMB)	
Start Crank Angle	0 °
End Crank Angle	720 °
Intervals	30 °
Spray Cones Option	No
IC Advanced Options (RMB)	
V Layer Slice	Yes
V Layer Slice Angle	15 °
V Layer Approach	4 Layers
<input type="checkbox"/> FD1, Decompositio...	0 °

Figura 17. Finestra del Input Manager

Les línies marcades amb el color groc demanen l'assignació de cares corresponents. Procedim a fer-ho.

En primer lloc definim *Inlet Faces*. Només hi ha una cara corresponent a l'admissió per tant cliquen en la línia corresponent a *Inlet Faces*, seleccionem la cara d'admissió representat a la *Figura 18* i confirmem l'assignació clicant *Apply*:

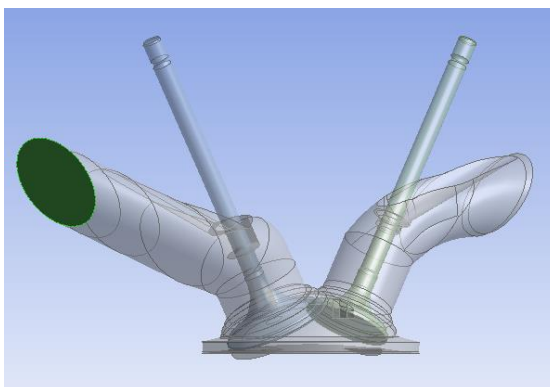


Figura 18. Inlet Face

De manera anàloga definim els *Outlet Faces*. A la *Figura 19* s'ha representat la cara corresponent a la sortida d'escapament:

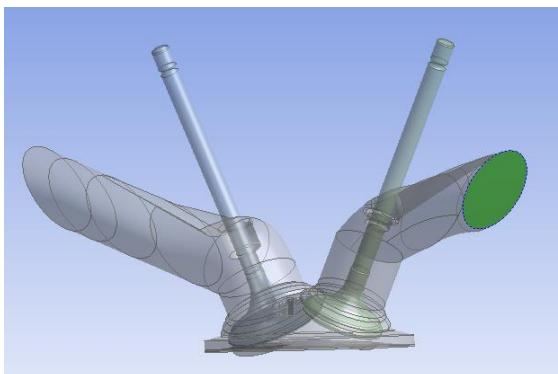


Figura 19. Outlet Face

També definim les cares corresponents al pistó (*Figura 110*):

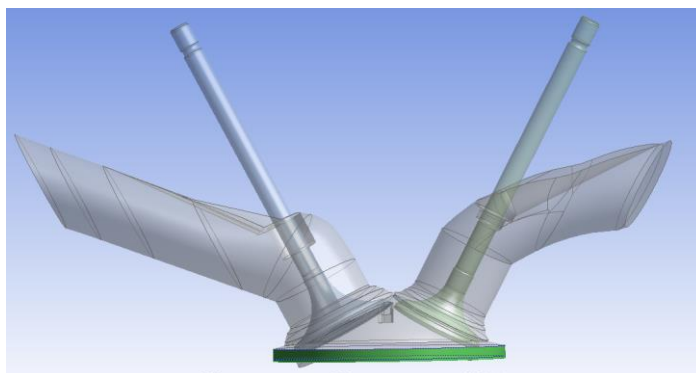


Figura 110. Superfície corresponent als parets del pistó

A continuació hem de indicar si volem descompondre la cambra de combustió. Aquí el procediment és següent: si existeix el volum *squish* que separa el pistó i la cambra seleccionem *Yes*, en el cas contrari triem l'opció *No*. Nosaltres deixem la selecció per defecte *Yes*, en el cas de no tenir el volum de *squish* el programa automàticament no farà la descomposició.

En la casella *IC Plane Insert Option* s'ha de seleccionar el mode *Automatic*. En el cas del motor amb vàlvules planes aquests plans s'ha d'introduir manualment.

Si l'opció seleccionada fos *Manual* hauríem de definir dos plans: *Top Plane/Face* i *Bottom Plane/Face*. El *Top Plane/Face* correspondria al pla que separa la cambra de combustió de la resta del volum i *Bottom Plane/Face* separa el cap del pistó. El volum determinat entre aquest dos plans serà mallat per capes.

L'opció de *Piston Profile Option* deixem l'assignació per defecte → *No*, ja que no disposem de les dades necessàries.

L'opció *Symmetry Face Option* també deixem el seu valor per defecte → *No*, per què la geometria importada no té cares de simetria.

L'últim pas és definir les vàlvules d'admissió/escapament, els seus seients i els perfils d'obertura corresponents.

En el nostre cas tenim dues vàlvules, per tal s'ha de crear una entrada de dades més, clicant sobre la casella corresponent amb el botó dret i seleccionant l'opció mostrada a la *Figura I11*

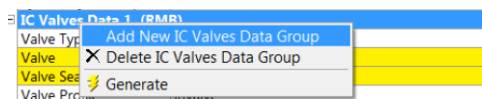


Figura I11. Creació de l'entrada de dades per la vàlvula d'escapament

Definim la vàlvula d'admissió, la cara corresponent al seu seient i el perfil d'obertura, que té el nom "*invalve*" – *Figura I12*:

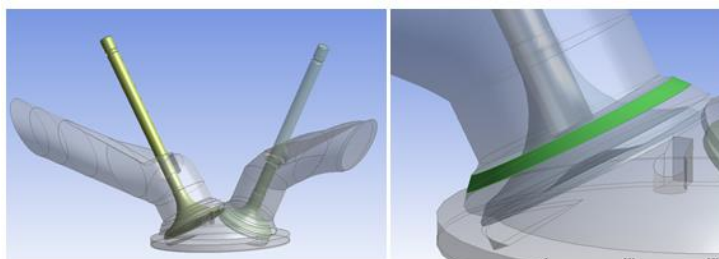


Figura I12. Vàlvula d'admissió i el seient de la vàlvula

A la *Figura I13* podem veure la vàlvula d'escapament i el seu seient. El perfil a triar té el nom "exvalve"

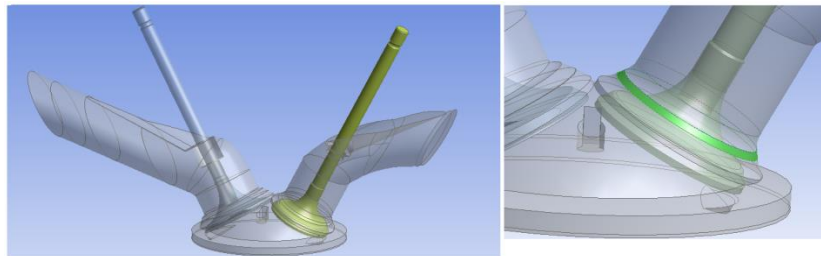


Figura I13. Vàlvula d'escapament i el seient de la vàlvula

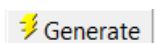
En l'apartat *IC Advanced Options* hi ha la possibilitat de creació de *V layer Slice*. Deixem la selecció per defecte → *YES*. Això fa que la zona de mallat al voltant de la vàlvula tingui més particions i d'aquesta manera la qualitat del mallat sigui més alta.

Els paràmetres que controlen la partició del mallat en la zona de vàlvula són: *V Layer Slice Angle* i *V Layer Approach*.

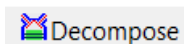
V Layer Slice Angle té el valor igual a 15° per defecte. Si l'angle entre dues cares en qualsevol *vlayer* (cara creada) del cos de la vàlvula és menys de 180, llavors el cos es divideix en dos cossos mitjançant la vora comú d'aquestes dues cares.

V Layer Approach: podem seleccionar 4 capes o 1 capa de la llista desplegable. Per defecte s'estableix igual a 4 capes. El seu significat és el nombre de capes creades sobre la superfície de la vàlvula.

Per a acabar, s'ha de confirmar l'assignació i generar les geometries amb el botó



Una vegada s'ha finalitzat el pas anterior descomponem la geometria clicant sobre



I.3.3 Anàlisi de descomposició

Durant el procés de descomposició rebrem el missatge de no-creació dels plans *Top Plane/Face* i *Bottom Plane/Face*. Aleshores no es farà la descomposició de la cambra.

La geometria descomposta es pot veure a la *Figura I14*:

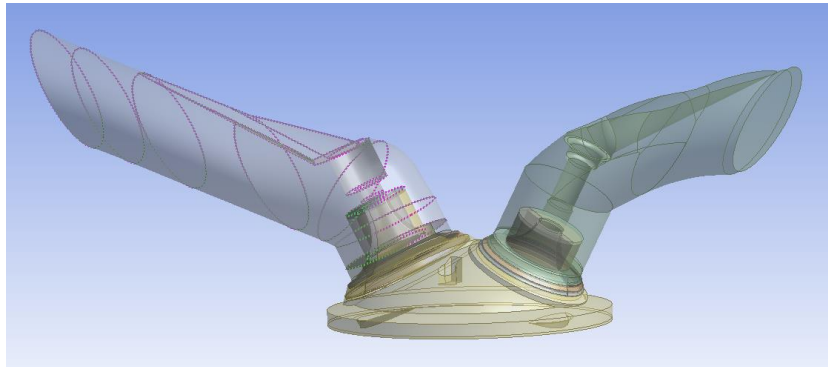


Figura I14. Geometria descomposta amb les vàlvules extretes

El programa descompon la geometria en *Parts* i *Bodies*. Si consultem l'arbre de geometria podem veure que s'han creat molts components corresponents a parts diferents de la geometria (*Figura I15*).

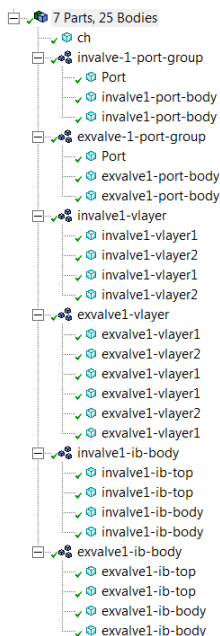


Figura I15. Cossos creats de manera automàtica

La nomenclatura dels paràmetres de la descomposició sense la cambra de combustió segueix l'esquema a la Figura I16, on *valveID* representa el nom de la vàlvula i la numeració corresponent, per exemple, *invalve1*:

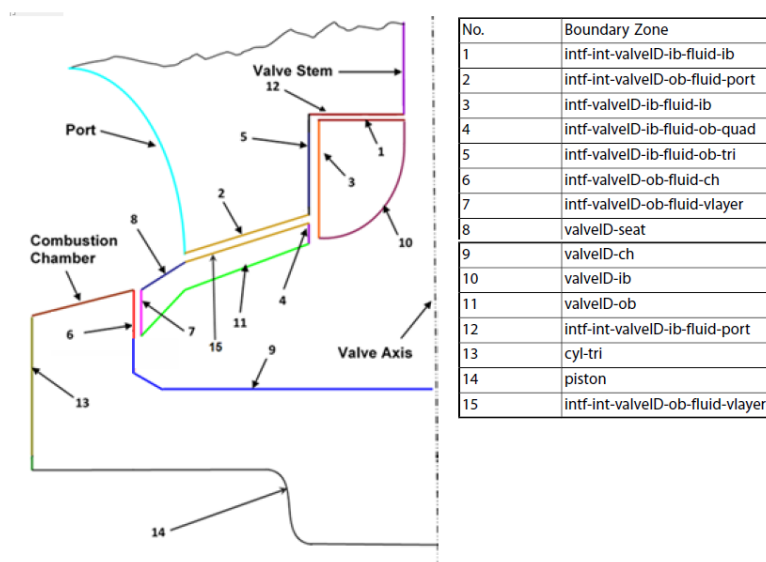


Figura I16. Noms de les condicions del contorn i requeriments del mallat (ANSYS, Inc., 2012)

I per les zones de fluid tenim la configuració següent tal i com indica la Figura I17:

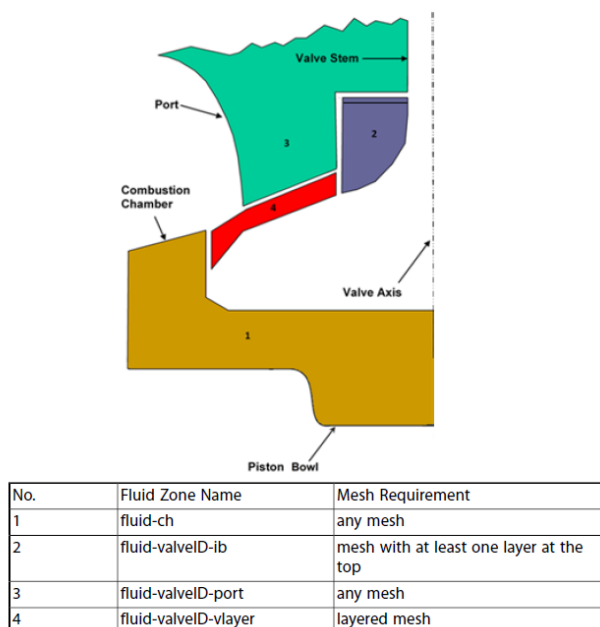
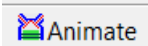


Figura I17. Noms de les zones de fluid i requeriments del mallat (ANSYS, Inc., 2012)

I.3.4 Animació de vàlvules i pistó

El botó  permet fer el moviment del pistó i les vàlvules segons els perfils carregats.

Podem seleccionar l'angle a partir del qual es començarà el moviment, quan es finalitza i els intervals de representació. L'opció de *Spray Cones* és desactivada, ja que no el motor no té injectors integrats a la cambra. Important: aquest paràmetres s'han d'introduir abans de descompondre la geometria. A la *Figura I18* podem veure el moviment capturat del pistó i les vàlvules cada 30 graus de cigonyal:

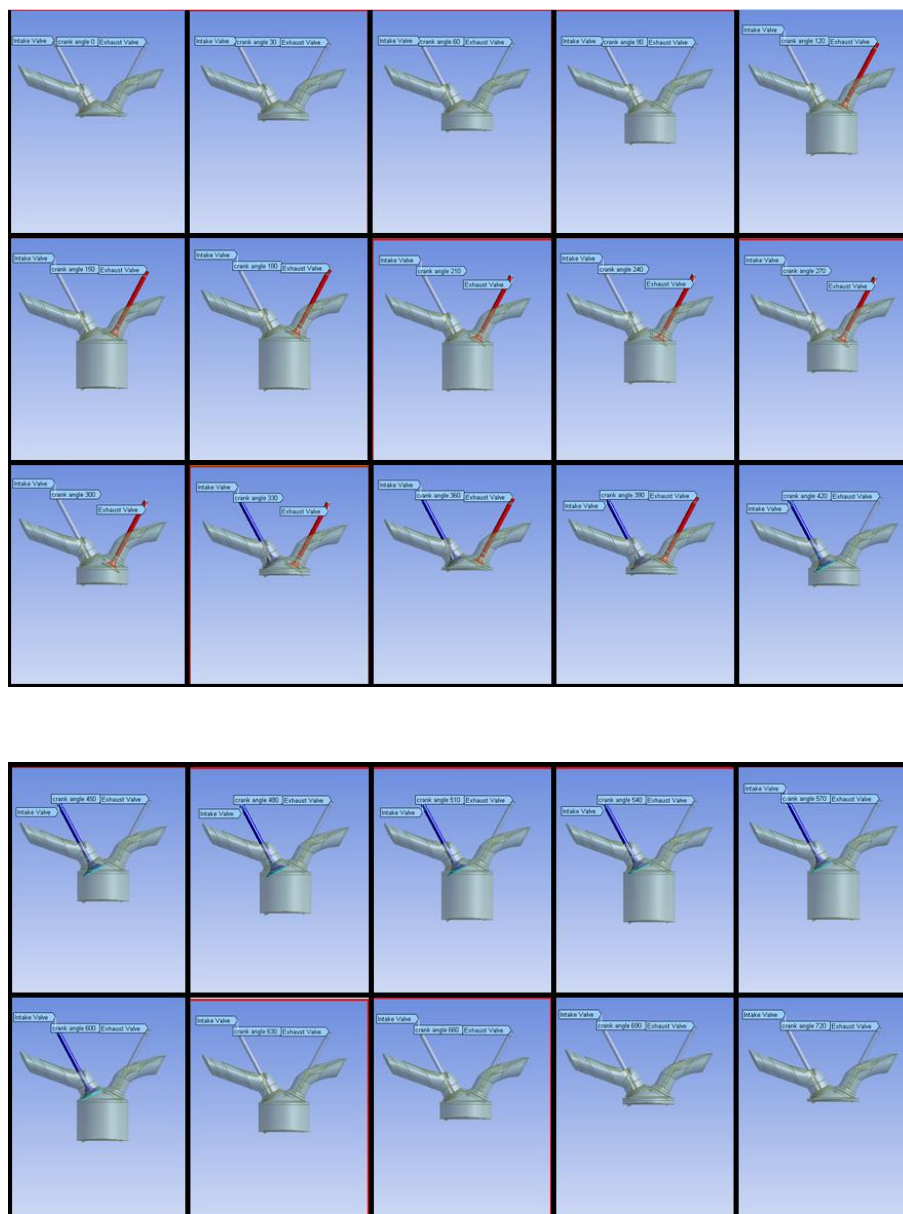


Figura 118. Cicle animat del motor

I.4 Mallat de la geometria

Una vegada tenim la geometria descomposta s'ha de mallar-la per les zones definides anteriorment.

Entrem en l'aplicació d'ANSYS que permet l'execució del mallat fent el doble clic sobre la cel·la 4 mostrada a la Figura 119:

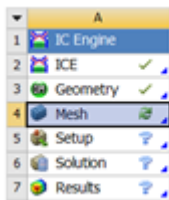



Figura I19. Execució del programa per crear el mallat

La geometria es carrega de manera automàtica.

I.4.1 Definició dels paràmetres del mallat

Clicant sobre el botó  Setup Mesh podem definir els paràmetres necessaris per la malla. A la *Figura I20* es pot observar la finestra que presenta les opcions del mallat de diferents zones i parts configurades anteriorment. Tots els paràmetres que apareixen estan configurats per defecte i poden ser modificats.

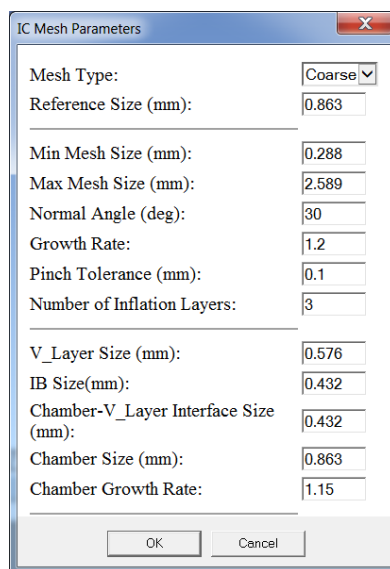


Figura I20. Paràmetres del mallat

- *Mesh Type*: aquest paràmetre determina les dimensions-base del mallat. La llista desplegable permet triar entre els dos valors: *Fine* (més precís) i *Coarse* (menys precís). Tots els paràmetres que venen després estan afectats pel paràmetre descrit.

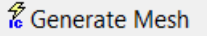
- *Reference Size*: És el valor de referència, totes les mides posteriors són dependents d'aquest paràmetre. El seu valor per defecte és: Perímetre del marge de vàlvula/100
- *Min Mesh Size*: Igual a *Reference Size*/3.
- *Max Mesh Size*: Igual a *Reference Size* × 3.
- *Normal Angle*: Aquest paràmetre depèn del tipus del mallat que s'utilitza (*Mesh Type*).
- *Growth Rate*: Aquest valor per defecte és 1.2
- *Pinch Tolerance*: Aquest valor per defecte és 0.1
- *Number of Inflation Layers*: Valor depèn del *Mesh Type*. Pren el valor de 3 si triem el *Coarse* i 5 per tipus *Fine*

Les propietats descrits anteriorment corresponen als ajustos globals del mallat. A continuació definim els ajustos locals:

- *V_Layer Size*: Igual a *Reference Size* × (2/3).
- *IB Size*: Igual a *Reference Size*/2.
- *Chamber-V_Layer Interface Size*: Igual a *Reference Size*/2.
- *Chamber Size*: Igual a *Reference Size*
- *Chamber Growth Rate*: Aquest valor per defecte és 1.15

Clicant *Ok* iniciem el procés d'assignació de paràmetres a les zones definides anteriorment. Per la primera execució deixem tots els valors per defecte, posteriorment avaluarem la qualitat de malla generada i si serà necessari – procedirem a millorar-la.

1.4.2 Mallat i inspecció de resultats

Per acabar de generar la malla cliquem el botó . Si en el panel d'informació no apareixen missatges d'error això indica que el procés s'ha finalitzat correctament. Els *Warning* (si n'hi ha) permeten identificar els punts a millorar.

La malla generada queda representada a la *Figura I21*:

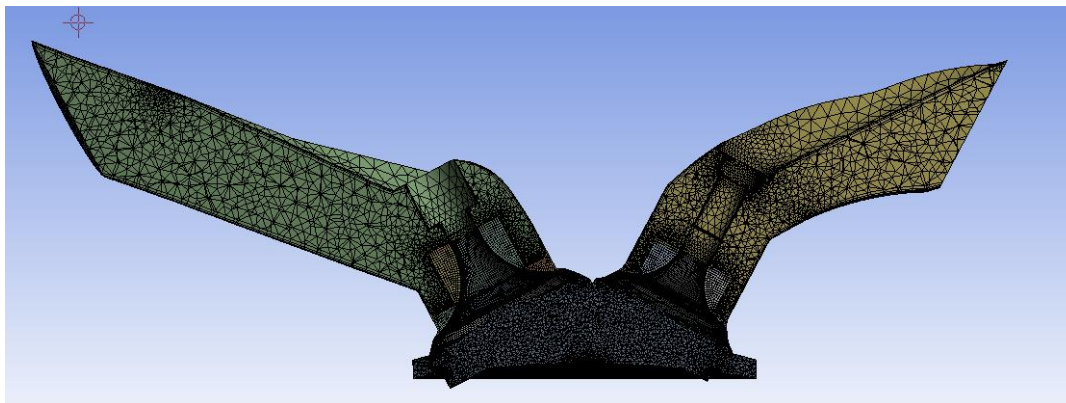


Figura I21. Geometria mallada.

I la zona corresponent a les vàlvules es pot veure a la *Figura I22*:

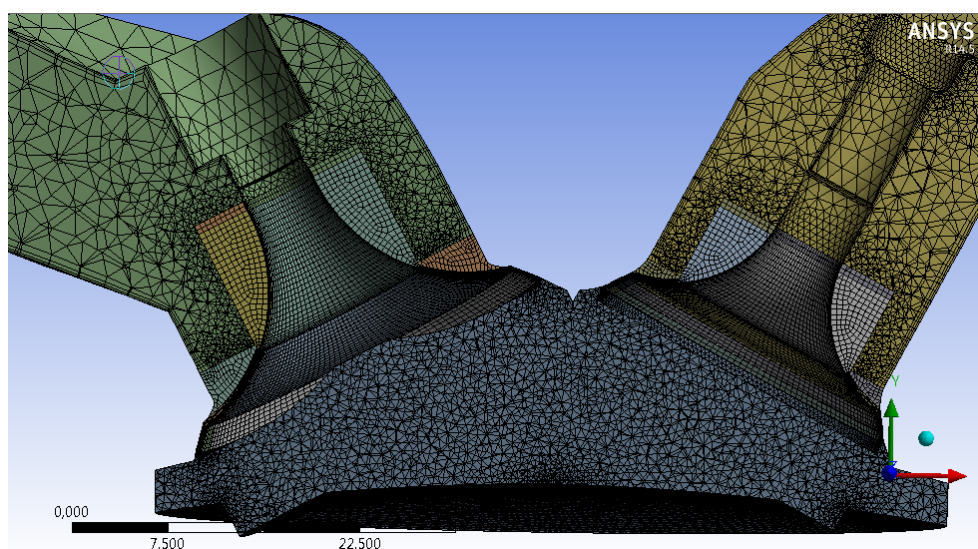


Figura I22. Malla al voltant de la zona de vàlvules

El programa crea la malla individual per les zones definides durant la importació i preprocés de la geometria. Si la zona presenta la importància per l'anàlisi, hi ha la configuració especial de la malla i la reducció de les seves mides.

Els ajustos globals es pot veure i modificar clicant sobre la icona de la malla (*Figura I23*):

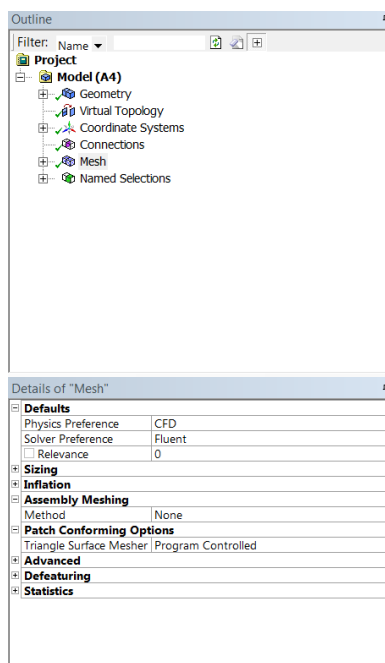


Figura I23. Ajustos generals malla

Si s'obre la llista desplegable de la malla es pot visualitzar diferents zones de malla i clicant sobre cada una hi ha la possibilitat de informar-nos sobre els paràmetres bàsics de la malla i refer o modificar-la si és necessari (*Figura I24*).

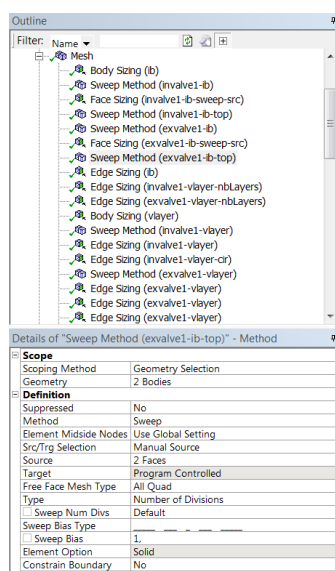


Figura I24. Exemple d'ajustos locals.

La quantitat de paràmetres disponibles per a ser modificats és impressionant, el significat de cada es pot trobar consultant els tutorials corresponents.

En el nostre cas generem la malla amb els paràmetres per defecte i posteriorment avaluarem la seva qualitat, ja que és essencial per la correcta execució de la simulació. El procediment a seguir és:

- Al finalitzar el mallat llegirem els missatges en la consola i identificarem els problemes existents, procedirem a corregir-los si afecten de manera directa al resultat.
- Farem la inspecció visual sobre la geometria des de diferents perspectives i fent servir plans de tall.
- L'eina més important és el panel d'estadística. Aquest presenta el nombre total de nodes i elements que componen el mallat. De la llista desplegable podem seleccionar quin paràmetre volem representar i automàticament obtenim la informació. Hi ha la possibilitat de representar-lo gràficament (*Figura I25*).

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	236921
<input type="checkbox"/> Elements	799968
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	2,86811875209736E-05
<input type="checkbox"/> Max	0,998938238901652
<input type="checkbox"/> Average	0,235122993821705
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,137203028437689

Figura I25. Panel d'estadística

Un dels paràmetres més important a l'hora d'avaluar el mallat és el *skewness* (asimetria). De manera breu, aquest paràmetre estadístic és una mesura de la simetria (o asimetria, segons com es vulgui dir) d'una distribució de probabilitat d'una variable aleatòria de valors reals a un costat i altre de la mitjana. Aplicat al camp de mallat, asimetria determina com prop de l'ideal (és a dir, equilàter o equiangular) una cara o l'element.

D'acord amb la definició de la asimetria, un valor de 0 indica un element equilàter (millor) i un valor d'1 indica una cèl·lula completament degenerada (pitjor). Cèl·lules degenerades es caracteritzen pels nodes que són gairebé coplanars (col·lineal en 2D). Aquestes són

inacceptables perquè les equacions que es resolen suposen que les cèl·lules són relativament equilàters o equiangulars.

A nivell pràctic si hi ha molta quantitat d'elements que superen el valor de asimetria de 0.95 és molt probable l'aparició d'errors que faran impossible el càlcul de la solució.

Segons el panel d'estadística la asimetria màxima arriba fins a 0.99. Representem els elements per rang de 0.95 al valor màxim (*Figura I26*):

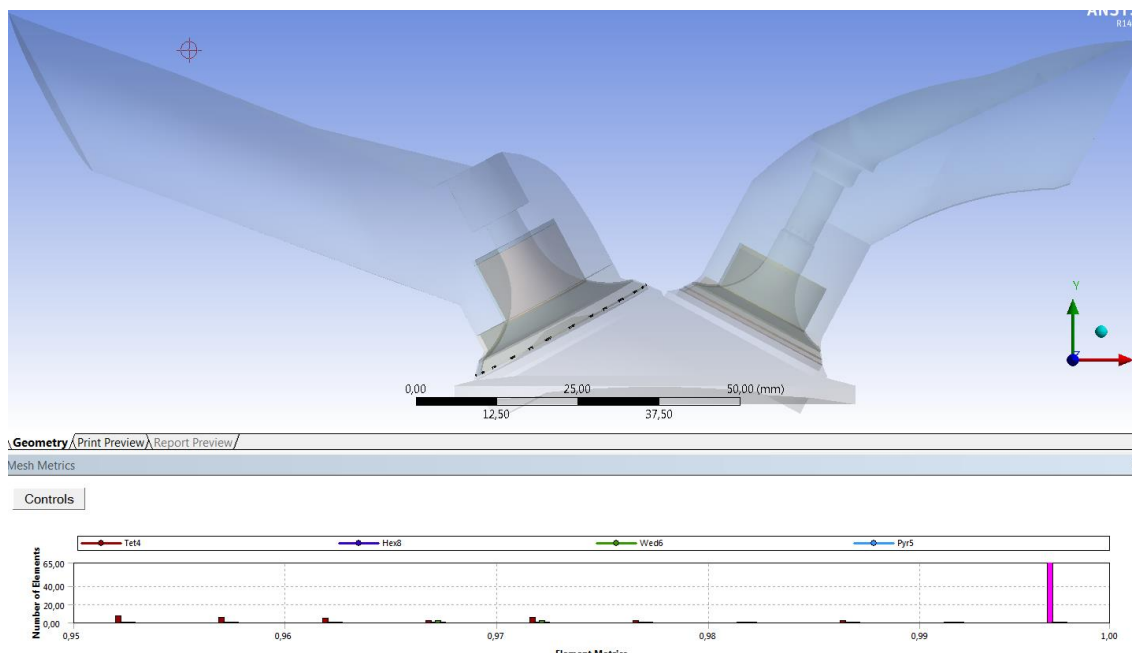


Figura I26. Elements de la malla degenerats

Podem observar que els elements problemàtics es localitzen a l'admissió, en la zona del seient de la vàlvula. Una vegada identificat el problema procedim a la seva resolució.

Podem localitzar la zona en la llista del mallat. Aquesta correspon a *intf-ch-vlayer-top-edges*. Disminuïm les dimensions del mallat en la zona (*Element size*). Canviem el valor de 0.375 a 0.2 mm. A més, en *Patch Conforming Options* triem *Advancing Front*. L'últim pas canvia la forma de mallar la geometria. Regenerem la malla i comprovem l'estadística (*Figura I27*):

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	245155
<input type="checkbox"/> Elements	833504
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	9.57221737529768E-06
<input type="checkbox"/> Max	0.945426587964536
<input type="checkbox"/> Average	0.234836973170361
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.135908516191574

Figura I27. Asimetria del mallar modificat

Podem veure que hem eliminat els elements problemàtics, però també hi ha alguns que encara estan per sobre del 0.9. Si consultem la mètrica de mallat podem localitzar-los i veure que d'aquests hi ha aproximadament 60. Com que no hem deixat cap cèl·lula que superi el llindar crític de 0.95 podem continuar.

I.5 Set up de la simulació

En aquest apartat es descriu com configurar la simulació i definir tots els paràmetres necessaris. A més, es defineixen els monitors i controladors de la solució.

I.5.1 Inicialització del programa

Fem el doble clic sobre la cel·la *Setup* i se'ns obrirà la finestra de FLUENT que podem veure a la *Figura I28*:

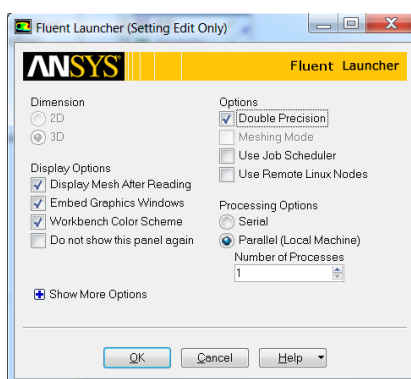


Figura I28. Inicialització FLUENT

Aquí seleccionem la precisió doble de càlcul i nombre de processadors d'ordinador.

Al clicar el botó *OK* l'aplicació llegirà l'arxiu corresponent a la geometria mallada i ajusta la simulació. El *software* farà:

- Llegir els perfils d'obertura de vàlvules i de pistó
 - Crear diverses zones de malla dinàmiques
 - Crear interfícies necessàries per la configuració dinàmica de malla
 - Configurar els paràmetres de malla dinàmiques
 - Configurar els models requerits
 - Configurar les condicions de contorn predeterminades i material
 - Crear tots els esdeveniments necessaris per modelar obertura i tancament de vàlvules i les modificacions corresponents en la configuració per la resolució de la simulació, igual que els factors de relaxació.
-
- Configurar els monitors predeterminats.
 - Inicialitzar la solució.

Després d'executar la seqüència d'operacions podem observar la finestra principal del programa a la *Figura I29*:

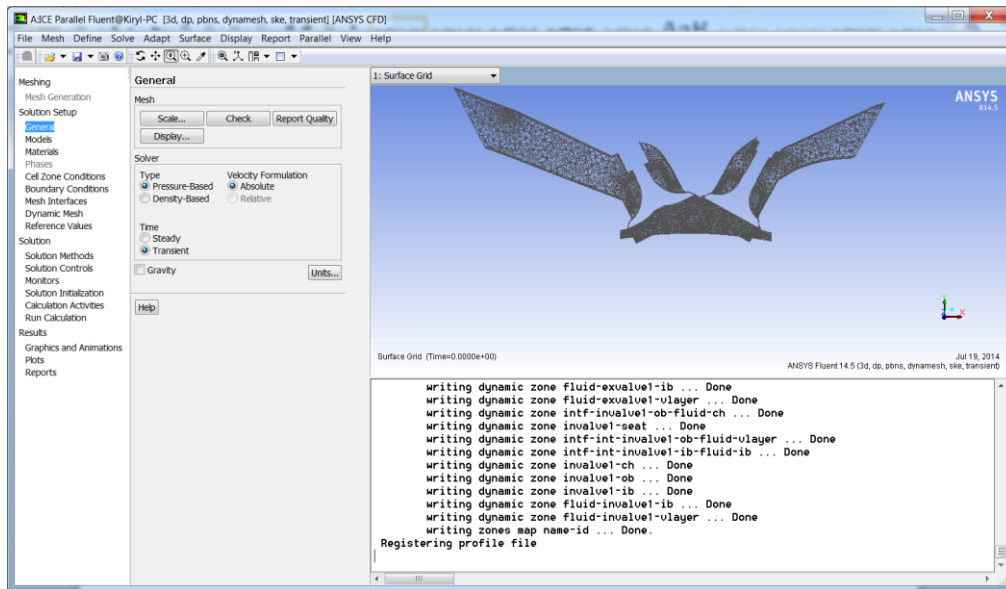


Figura I29. Interfície gràfica ANSYS FLUENT

Es pot veure components de la interfície gràfica. A l'esquerra hi ha el panel de navegació que permet accedir en cada apartat de simulació i introduir o modificar els ajustos que s'ha fer de manera automàtica.

A continuació farem l'explicació dels paràmetres que hi ha per modificar:

1.5.2 General and Models (ajustos generals i models utilitzats)

El *Solver* és *Pressure-Bassed* i el *Time* és *Transient*. El mode seleccionat correspon a l'anàlisi de flux en fred que té lloc durant un període del temps físic.

En l'apartat *Models* s'ha seleccionat l'equació d'energia i també s'ha definit el model de turbulència *k-epsilon (2eqn)* i les seves característiques: *Model – Standard, Near Wall Treatment – Standard Wall Function* (Figura I30 i Figura I31):

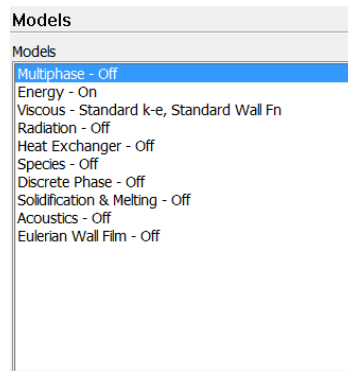


Figura I30. Models aplicats.

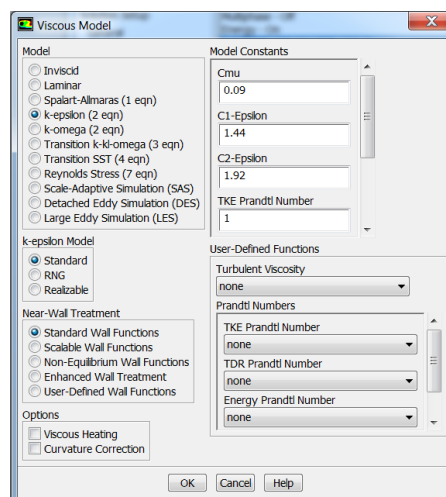


Figura I31. Model de viscositat

1.5.3 Materials

Hi ha dos materials que hem de tenir definits: aire (corresponent al fluid) i alumini (corresponent als parets de la geometria - sòlid).

Cliquem sobre l'apartat corresponent i comprovem els materials (*Figura I32*):

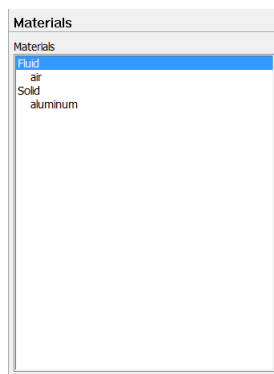


Figura I32. Materials definits

Les característiques de l'alumini corresponen al metall i s'han definit com a constants, mentre que l'aire s'ha definit com el gas ideal (*Density – ideal gas*) i la capacitat calorífica dependent de la temperatura (*Cp – piecewise-polynomial*), la viscositat i conductivitat tèrmica constants (*Figura I33*).

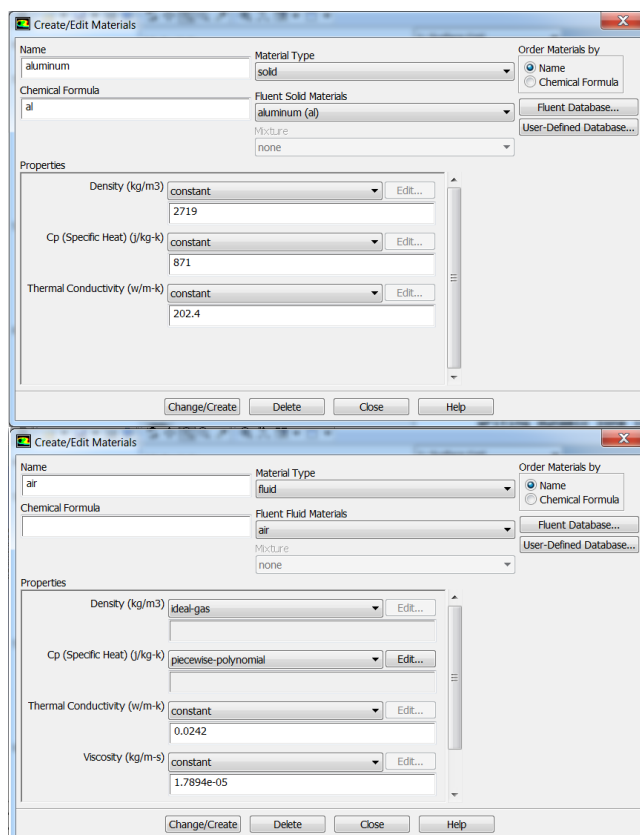


Figura I33. Paràmetres dels materials

1.5.4 Phases

L'apartat següent està desactivat, ja que en la simulació només treballarem amb una fase del fluid corresponent a l'aire.

1.5.5 Cell zone conditions

Per la correcta simulació hem de definir les zones corresponents al fluid on se solucionaran les equacions actives. Segons la descomposició feta anteriorment el programa reparteix tot el volum de l'aire en parts segons la seva localització i assigna el material corresponent. En la zona activa no tenim parts corresponents al sòlid per tant no s'ha creat cap zona del tipus *Solid*.

1.5.6 Boundary conditions (condicions del contorn)

Hi ha moltes zones que s'han definit segons la descomposició feta anteriorment. Existeix l'arxiu que permet veure les condicions del contorn i monitors definits anteriorment:

`icBcSettings.txt`

Les condicions del contorn els trobem en l'apartat corresponent tal i com mostra la *Figura 134*:

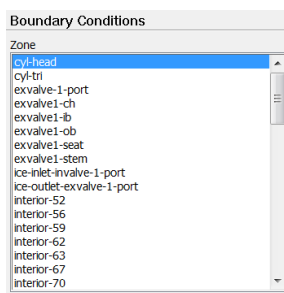


Figura 134. Condicions del contorn

Nosaltres inspeccionem dues zones que presenten l'entrada i sortida de flux: *Inlet* i *Outlet*. També cal dir que per defecte la temperatura té el valor de 300 K. Si fos necessari modificar-la hauríem de canviar el valor corresponent en totes les zones del tipus *Wall*.

A la *Figura I35* podem veure condicions del contorn de l'entrada de flux que correspon al *Pressure Inlet* (Entrada de pressió)

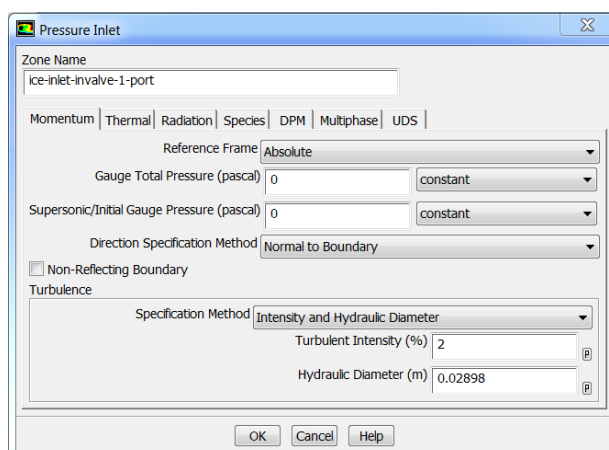


Figura I35. Condicions del contorn per l'entrada de flux

La pressió relativa és 0 Pa, assumint que el motor és d'aspiració natural. La temperatura és de 300 K.

Specification Method (Mètode d'especificació) per la turbulència s'ha seleccionat *Intensity and Hydraulic Diameter* (Intensitat i diàmetre hidràulic). Hi ha altres mètodes per configurar la turbulència d'aire, però aquest permet fer-ho només indicant la intensitat en %, ja que el diàmetre hidràulic és calculat automàticament.

La intensitat de turbulència és de 2%, valor que s'assumeix correcte per aquest tipus de simulació, sense considerar situacions especials.

La *Figura I36* mostra la configuració de la sortida de pressió, corresponent a la sortida del conducte d'escapament:

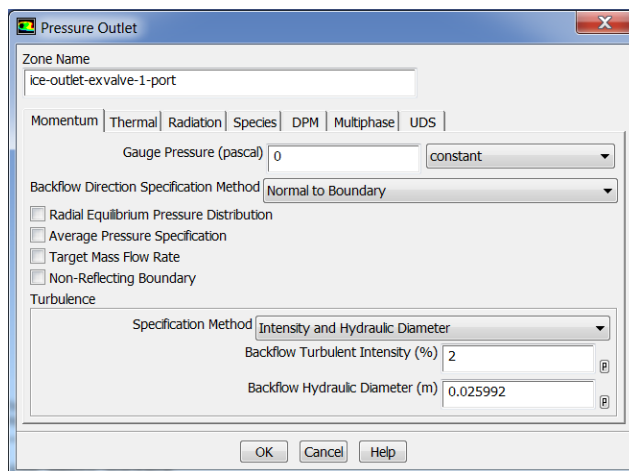


Figura I36. Condicions del contorn de la sortida del conducte d'escapament

La pressió relativa és 0 Pa, corresponent a la sortida atmosfèrica. La temperatura del *Backflow* és de 300 K. Igual que per l'entrada de pressió, deixem el valor de la turbulència del *Backflow* igual a 2%

1.5.7 Mesh Interface

En aquest apartat s'han definit de manera automàtica el tipus de malla en les zones de contacte (*Figura I37*):

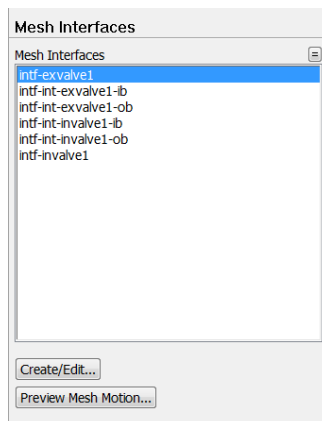



Figura I37. Interfícies del mallat

Fent el clic sobre la interfície creada i posteriorment al botó  podem veure les interfícies de contacte i la informació sobre el tipus d'interfície.

1.5.8 Dynamic Mesh

En la finestra *Dynamic Mesh* podem comprovar els mètodes de mallat dinàmic i canviar el paràmetres si és necessari (*Figura 138*):

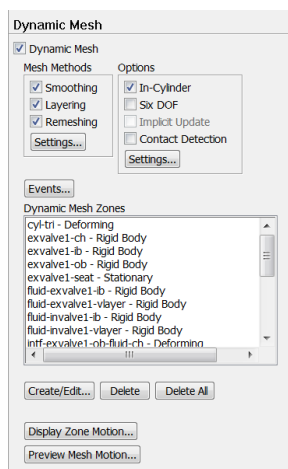


Figura 138. Finestra d'ajustos del mallat dinàmic

Clicant sobre el botó **Settings...** accedim als paràmetres de mallat. Ens apareix la finestra amb 3 llistes: *Smoothing*, *Layering* i *Remeshing*.

Tots els paràmetres i la seva influència sobre el procés de mallat es pot consultar en el manual de FLUENT. Nosaltres deixem aquests paràmetres per defecte.

Pel que fa a les zones del mallat dinàmic la seva estructura depèn de la descomposició feta en la cel·la de geometria. L'estructura corresponent al nostre cas és a la *Figura 139*:

cyl-tri - Deforming
 exvalve1-ch - Rigid Body
 exvalve1-ib - Rigid Body
 exvalve1-ob - Rigid Body
 exvalve1-seat - Stationary
 fluid-exvalve1-ib - Rigid Body
 fluid-exvalve1-vlayer - Rigid Body
 fluid-invalve1-ib - Rigid Body
 fluid-invalve1-vlayer - Rigid Body
 intf-exvalve1-ob-fluid-ch - Deforming
 intf-int-exvalve1-ib-fluid-ib - Stationary
 intf-int-exvalve1-ob-fluid-vlayer - Stationary
 intf-int-invalve1-ib-fluid-ib - Stationary
 intf-int-invalve1-ob-fluid-vlayer - Stationary
 intf-invalve1-ob-fluid-ch - Deforming
 invalve1-ch - Rigid Body
 invalve1-ib - Rigid Body
 invalve1-ob - Rigid Body
 invalve1-seat - Stationary
 piston - Rigid Body

Figura I39. Zones de mallat dinàmic

Els tipus descrits anteriorment permeten entendre el comportament de la zona:

- *Stationary*: La zona estacionària, els nodes són exclosos durant el procés de renovació del mallat en funció del temps.
- *Rigid Body*: Les zones següents tenen el moviment d'un cos rígid
- *Deforming*: La zona que pateix deformació.

Per més informació és pot consultar els tutorials corresponents al mallat.

Abans d'executar la simulació és recomanable comprovar el moviment del mallat al llarg del temps. Per fer-ho cliquem el botó (Figura I40), anàlogament seleccionem el nombre de passos, confirmem la selecció (*Apply*) i visualitzem el moviment (*Preview*).

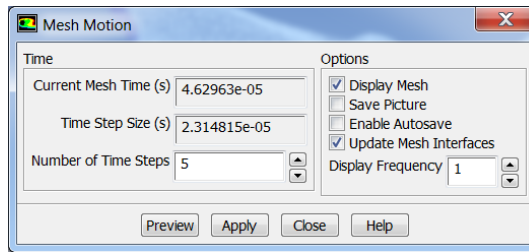



Figura 140. Configuració del moviment de la malla

Finalment, s'ha de comentar els processos d'obertura i tancament de vàlvules. El menú corresponent amb totes les operacions que s'executaran durant la simulació s'obre clicant el botó .

Els processos d'obertura i tancament es modelen trencant algunes interfícies no conformes. Es pot observar gradients de flux grans en els moments temporals quan vàlvules s'obren i es tanquen, per això, és una bona pràctica reduir la mida de pas del temps de l'angle de cigonyal predeterminat de 0.25 a 0.125. Quan es crea la malla dinàmica alguns esdeveniments s'estableixen per canviar l'interval de temps en funció de l'obertura de les vàlvules.

Els esdeveniments s'especifiquen per a un cicle complet del motor. En subcicles, els esdeveniments s'executen en el moment establert d'acord amb l'Equació 11:

$$\theta_{esdeveniment} = \theta_{angle\ cigonyal} + n\theta_{periode} \quad (Eq. 11)$$

On:

$\theta_{esdeveniment}$ – angle d'esdeveniment

$\theta_{angle\ cigonyal}$ – angle de cigonyal en un moment donat

$\theta_{periode}$ – període de l'angle de cigonyal per un cicle

n - un nombre enter

Per exemple, per la simulació en cilindre els esdeveniments poden executar-se no exactament per l'angle introduït, sinó el programari executarà l'esdeveniment si l'angle del cigonyal pertany a l'interval $\pm 0.5 \Delta\theta$, on $\Delta\theta$ és el canvi equivalent per pas temporal.

Els esdeveniments no només corresponen als processos d'obertura i tancament sinó també als preprocessos i postprocessos necessaris als esdeveniments i la inicialització i execució de *reports* i monitors de la solució (Figura I41).

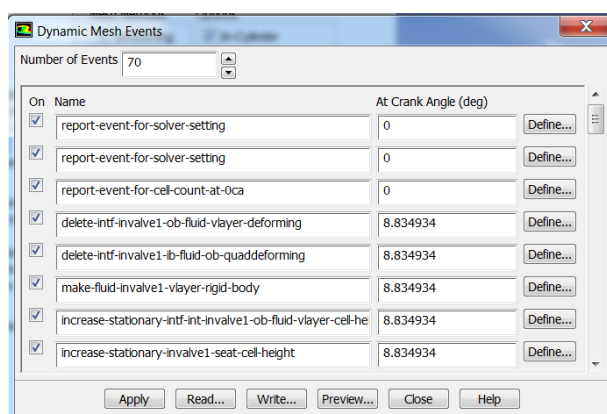


Figura I41. Esdeveniments

Alguns esdeveniments generals són els següents:

- El pas de temps (referint a l'angle de cigonyal) s'estableix en 0.25 graus durant la simulació.
- Quan s'obren les vàlvules, es fa el canvi del pas de temps a partir de:
 - de 0.25 a 0.125 graus a partir d'angle de cigonyal corresponent a l'obertura
 - de 0.125 a 0.25 graus d'almenys 5 graus després de l'obertura completa de la vàlvula
- Quan es tanquen les vàlvules, el temps de pas canvia de:
 - 0.25 a 0.125 almenys 5 graus abans del tancament complet de la vàlvula
 - 0.125 a 0.25 en l'angle corresponent al tancament complet de la vàlvula
- El nombre d'iteracions per pas del temps s'estableix en 30.

Podem comprovar els esdeveniments fent clic a *Define* situat un al costat del nom de l'esdeveniment.

Cal comentar que l'obertura i tancament de la vàlvula són calculats de nou, ja que hi ha un *lift* mínim que hem de satisfer, per tant els angles d'obertura i tancament poden tenir els valors diferents dels angles experimentals. El programa utilitza el mètode d'integració trapezoïdal per tal de conservar el flux màssic teòric que hauria d'entrar o sortir sense tenir en compte la correcció del *lift*.

1.5.9 Reference Values

Aquesta pestanya permet establir els valors de referència per càlcul de les variables normalitzades. No establim cap valor de referència.

1.5.10. Solution

Aquest apartat reuneix la informació que fa referència al *set up* de la solució i la inicialització i ajustatge del monitors i controladors de la solució per la correcte execució d'anàlisi i posterior interpretació dels resultats.

1.5.11 Solutions methods

Els ajustos per la resolució dels problemes transitoris es mostra a continuació a la *Figura 142*:

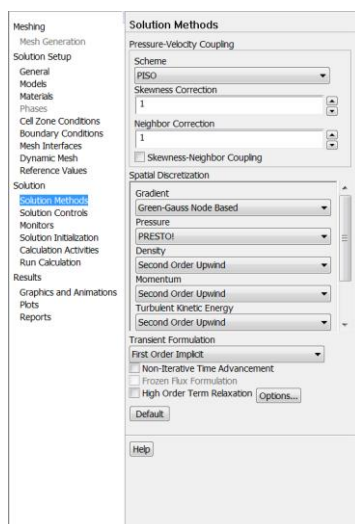


Figura 142. Esquema del mètode de la solució

Alguns aspectes que s'ha de comentar:

- L'esquema de la solució és el PISO – *Pressure-Velocity Coupling*. Aquest esquema és recomanat per la resolució de problemes transitoris quan els passos temporals utilitzats no són grans.
- Correcció d'asimetria té el valor de 1. Això és degut a que molt sovint la qualitat de mallat es deteriora a mesura que s'està actualitzant i és recomanable aplicar la correcció.
- *Skewness-Neighbor Coupling* per defecte és desactivat. Si durant la simulació la distorsió del mallat provoqui problemes – repetirem la simulació amb aquest paràmetre activat.

Tots els paràmetres anteriors venen configurades per defecte per *toolbox* IC Engine.

1.5.12 Solution Controls

El *Solver* basat en pressió utilitza sota-relaxació d'equacions per controlar l'actualització de les variables calculades en cada iteració (per més informació és recomanable consultar el guió de teoria corresponent). Això significa que totes les equacions tindran *under-relaxation* factors associats amb ells.

En ANSYS FLUENT, els factors de sota-relaxació per defecte són gairebé òptims per al major nombre possible de casos. Aquests valors són adequats per a molts problemes, però per a alguns problemes particularment no lineals (per exemple, alguns fluxos turbulents o d'alt número de Rayleigh - problemes de convecció natural) és important reduir els aquests factors.

Aleshores, es deixen els paràmetres per defecte, tal i com ho mostra la *Figura 143*:

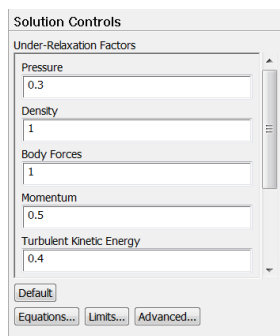


Figura I43. Under-relaxation factors

Cal comentar que durant el procés d'obertura i tancament de les vàlvules el flux d'aire presenta el comportament difícilment previsible. Aleshores, cinc graus abans i després del tancament o obertura de la vàlvula els factors de sota-relaxació agafen els valors següents:

- *Pressure*: 0.2
- *Momentum*: 0.4
- *Turbulent Kinetic Energy and Turbulent Dissipation Rate*: 0.2
- *Turbulent Viscosity*: 1
- *Density, Body Force, and Energy*: 1

El canvi aplicat permet assegurar l'estabilitat de la solució i evitar errors de càlcul.

Els límits per la pressió i temperatura que no poden ser superats durant la simulació es mostren a la *Figura I44*:

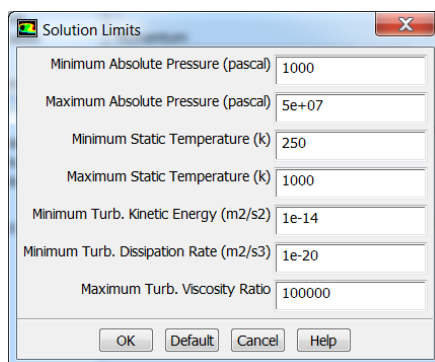


Figura I44. Límits de pressió i temperatura durant la simulació

Aquest límits són adequats per la simulació de flux en fred, ja que no hi ha combustió i les temperatures i pressions no haurien de superar els límits establerts.

I.5.13 Monitors

Aquí hem de definir els monitors de la solució. La definició correcta i adequada dels paràmetres a monitoritzar permetrà obtenir les dades necessàries per l'anàlisi posterior.

IC Engine defineix els monitors que inclourà en el *report* que es genera al final de l'execució de la simulació. Els monitors definits per defecte són els monitors de volum. Aquest són:

- *Volume Average of pressure*
- *Mass Average of temperature*
- *Volume Average of cell skewness*

Aquests monitors es defineixen en la zona de la cambra.

Però nosaltres ens interessa quantificar els fenòmens de turbulència durant el procés d'admissió. Els indicadors d'aquesta són el *swirl* i *tumble*.

Les ràtios monitoritzats d'aquest dos paràmetres també estan definits per defecte. Per identificar com es calculen les ràtios podem consultar l'arxiu `ice-incylinderoutput.txt` creat per ANSYS FLUENT en el directori del projecte. Els detalls que es graven en l'arxiu són següents tal i com mostra la *Figura 145*:

CA	(L, sa)	(L, ta)	(L, cta)	L	I _{sa}	I _{ta}	I _{cta}
350.00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.1474e-07	7.0881e-08	6.8234e-08
365.00	6.4910e-07	7.6332e-07	-2.3923e-08	1.0023e-06	9.9355e-08	6.1951e-08	5.9120e-08
380.00	-1.6684e-06	-2.3585e-06	-7.8704e-08	2.8900e-06	1.5460e-07	9.2601e-08	9.2951e-08
395.00	-3.0125e-05	8.1780e-06	2.9730e-06	3.1357e-05	2.9557e-07	1.7709e-07	1.8031e-07
410.00	-8.9259e-05	1.7637e-05	-1.3191e-05	9.1936e-05	4.9396e-07	3.1077e-07	3.1660e-07
425.00	-2.1336e-04	2.4657e-05	-4.6908e-05	2.1984e-04	7.3845e-07	5.1056e-07	5.1811e-07
440.00	-3.9555e-04	6.6114e-05	-1.0156e-04	4.1370e-04	1.0084e-06	7.8920e-07	7.9931e-07
455.00	-6.0621e-04	1.2651e-04	-1.7990e-04	6.4487e-04	1.2833e-06	1.1499e-06	1.1623e-06
470.00	-8.1472e-04	2.0109e-04	-2.6251e-04	8.7927e-04	1.5486e-06	1.5784e-06	1.5913e-06
485.00	-9.9456e-04	2.7342e-04	-3.6243e-04	1.0933e-03	1.7921e-06	2.0409e-06	2.0526e-06
500.00	-1.1160e-03	2.9711e-04	-4.5477e-04	1.2412e-03	2.0003e-06	2.4850e-06	2.4945e-06

Figura I45. Arxiu de dades (ANSYS, Inc., 2012)

On:

CA – angle de cigonyal

L – vector del moment de la massa del fluid continguda en les zones seleccionades respecte al centre de *swirl*

$|\vec{L}|$ – magnitud del moment angular del fluid

\vec{s}_a – eix de *swirl*

\vec{t}_a – eix de *tumble*

\vec{cta} – Eix de *cross tumble*

I_{sa} – moment d'inèrcia de la massa del fluid al voltant de l'eix de *swirl*

I_{ta} – moment d'inèrcia de la massa del fluid al voltant de l'eix de *tumble*

I_{cta} – moment d'inèrcia de la massa del fluid al voltant de l'eix de *cross tumble*

El *swirl ratio* i *tumble ratio* es dedueixen a partir de l'arxiu descrit anteriorment segons les expressions següents (Equació 12 i Equació 13):

$$\frac{L \cdot s_a / I_{s_a}}{RPM_{Motor} \cdot 2 \cdot 3.141 / 60} \quad (Eq. 12)$$

$$\frac{L \cdot t_a / I_{t_a}}{RPM_{Motor} \cdot 2 \cdot 3.141 / 60} \quad (Eq. 13)$$

Si volem que el temps necessari per calcular la solució sigui més curt podem reduir el criteri de convergència. Seleccionem *Residuals – Print, Plot*, cliquem *Edit* i en la finestra que ha sortit reduïm el *Absolute Criteria* de 0.001 a 0.1. Aquest canvi es fa perquè el temps de càlcul de l'anàlisi és relativament llarg i es vol reduir-lo. Confirmem el canvi clicant *OK*.

1.5.14 Solution Initialization (Inicialització de la solució)

El *toolbox* IC Engine inicialitza la solució en el moment de carregar la geometria mallada en el FLUENT. Els valors són:

En la cambra: ajustament (*patch*) de la Temperatura (*Figura 146*):

Valor de temperatura està ajustat a base de l'angle de cigonyal.

Als 0 ° i 720 ° temperatura es fixa 900 K.

Entre l'obertura de la vàlvula d'escapament (EVO) i el tancament de la vàlvula d'admissió (IVC) s'assignarà el valor de 300 K.

En els altres angles de cigonyal els valors de temperatura s'interpolen linealment.

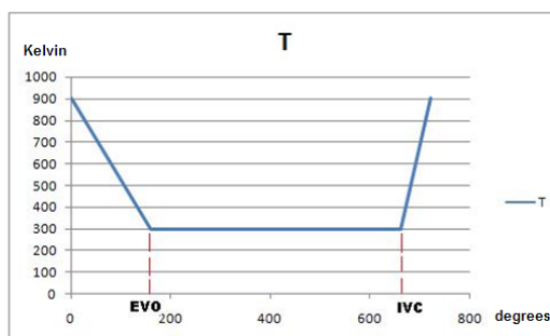


Figura I46. Temperatura ajustada en la cambra de combustió (Ansys, Inc. 2012)

En la cambra: ajustament (*patch*) de la Pressió (Figura I47):

El valor de pressió depèn de l'angle del cigonyal.

Als 0 ° i 720 ° de pressió s'igualava a 10 bar.

A EVO i IVC s'igualava a 1 bar.

En els altres angles de cigonyal els valors de pressió s'interpolen linealment.

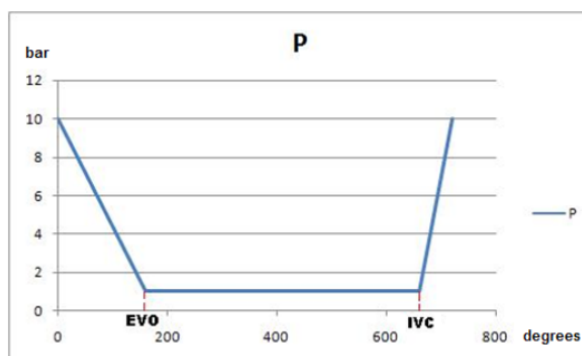


Figura I47. Pressió ajustada en la cambra de combustió (Ansys, Inc. 2012)

En els conductes: La pressió pren el valor de 1 bar i la temperatura és 300 K durant tot el cicle de 720 graus.

I.5.15 Calculation activities

Aquí deixem tots els valors per defecte.

I.5.16 Run Calculation

La decisió que hem de prendre aquí és la quantitat de passos temporals que s'ha d'executar. Sabem que el regim del motor és de 1800 rpm, aleshores la quantitat de cicles de 720 graus en un segon és igual a 15. Passant en l'espai temporal es necessari 0,06667 segon per simular el cicle del motor. Amb la longitud de pas temporal donada això correspon a 2880 passos. S'ha de dir que hi ha activada l'opció de reducció del pas temporal durant l'obertura i tancament. Per compensar l'efecte augmentem la quantitat de passos fins a 3000 (*Figura I48*).

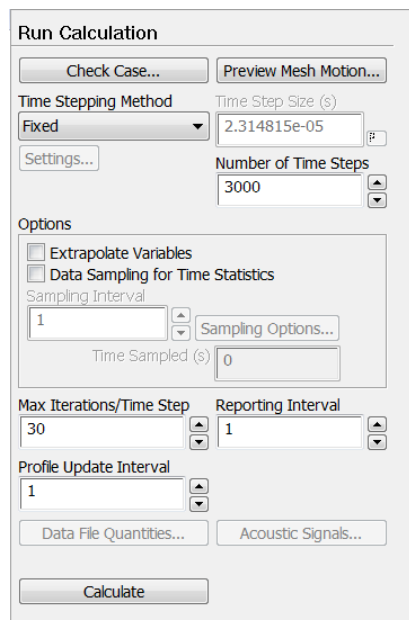
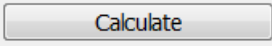


Figura I48. Panel de inicialització de càlcul

Abans de continuar comprovem el mallat amb la comanda `/mesh/repair-improve> report` i si no es detecta cap problema – continuem. En el cas contrari hem de millorar la qualitat de mallat amb les comandes en la consola de FLUENT. Una vegada seleccionat el nombre de passos cliquem  i inicialitzem la simulació.

Girona, de setembre de 2014

Kiryl Holubeu