

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol:**

SIMULACIÓ D'UN MOTOR MONOCILINDRIC 4T AMB LOTUSENGINE®  
PER A PRÀCTIQUES EN BANC DE PROVES

**Document:** MEMÒRIA I ANNEXOS

**Alumne:** MARIO PÉREZ MARTÍN

**Tutor:** Martí Comamala Laguna

**Departament:** Enginyeria mecànica i construcció industrial

**Àrea:** Màquines i motors tèrmics

**Convocatòria (mes/any)** setembre del 2015

# ÍNDEX

<b>1</b>	<b>INTRODUCCÓ</b> .....	<b>4</b>
1.1	Antecedents .....	4
1.2	Objecte.....	5
1.3	Especificacions i abast.....	5
1.3.1	Programació del treball.....	6
<b>2</b>	<b>CARACTERÍSTQUES DEL MOTOR</b> .....	<b>8</b>
2.1	Funcionament motor 4T .....	8
2.2	Característiques principals del motor.....	8
2.3	Característiques tècniques motor .....	9
2.4	Dades geomètriques motor.....	11
2.4.1	Pesos parts mòbils motor .....	11
2.5	Geometria dels conductes .....	11
2.6	Dades fluidomecàniques dels conductes.....	13
2.6.1	Definició coeficients de descàrrega .....	13
2.6.2	Banc de fluxos utilitzat .....	14
2.6.3	Mecanisme utilitzat .....	17
2.6.4	Adquisició de dades banc de flux .....	19
2.6.5	Resultats banc de flux .....	20
2.7	Diagrama distribució vàlvules .....	22
2.7.1	Obtenció obertura vàlvules .....	22
2.7.2	Obertura vàlvules segons angle cigonyal .....	23
<b>3</b>	<b>SIMULACIÓ LOTUSENGINE®</b> .....	<b>25</b>
3.1	Funcionament LotusEngine®.....	25
3.2	Esquema simulació.....	26
3.3	Introducció dades simulació.....	27
3.3.1	Entrada d'aire i carburador .....	27
3.3.2	Conducte i vàlvula d'aspiració .....	29
3.3.3	Conducte i vàlvula d'escapament .....	30
3.3.4	Conducte i vàlvula d'escapament .....	30
3.3.5	Tub d'escapament i condicions aire .....	31
3.4	Resultats simulació .....	31
<b>4</b>	<b>PROVES EXPERIMENTALS</b> .....	<b>33</b>

4.1	Banc de proves utilitzat.....	33
4.1.1	Funcionament banc proves .....	33
4.1.2	Parts banc proves.....	34
4.2	Adquisició dades experimentals .....	36
4.3	Resultats experimentals.....	37
<b>5</b>	<b>AJUST SIMULACIÓ .....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>POSSIBLES PRÀCTIQUES .....</b>	<b>42</b>
6.1	Entorn visualització Lotus .....	42
6.2	Variació cambres combustió.....	45
6.3	Variació diagrama distribució vàlvules.....	47
<b>7</b>	<b>RESUM PRESSUPOST.....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>RELACIÓ DE DOCUMENTS.....</b>	<b>53</b>
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>54</b>
	<b>ANNEXOS.....</b>	<b>55</b>
	<b>ANNEX A. FUNCIONAMENT MOTOR 4T OTTO .....</b>	<b>56</b>
A.1	Introducció al motor 4 temps .....	56
A.1.1	Etaques del cicle Otto.....	58
A.2	Cicle Otto.....	59
A.2	Paràmetres de disseny.....	61
A.2.1	Paràmetres operatius .....	61
A.2.2	Propietats geomètriques dels motors .....	62
A.2.3	Parell i potència .....	64
A.2.4	Treball indicat per cicle .....	64
A.2.5	Eficiència mecànica .....	66
A.2.6	Consum específic de combustible i eficiència .....	67
A.2.7	Relació aire/combustible.....	67
	<b>ANNEX B. MANUAL MOTOR PRÀCTIQUES.....</b>	<b>69</b>
B.1	Introduction.....	71
B.2	Unit description.....	72
B.3	Safety instructions .....	84
B.4	Fundamental principles .....	85
B.5	Experiments .....	56
B.6	Annex .....	92

<b>ANNEX C. MANUAL LOTUSENGINE.....</b>	<b>95</b>
C.1 Tutorial 1 .....	96
C.2 Tutorial 2 .....	112

# 1 INTRODUCCÓ

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 de l'escola politècnica de la Universitat de Girona disposa d'un laboratori equipat on s'imparteixen algunes de les pràctiques del Grau en enginyeria Mecànica i compte amb una plantilla de professors per realitzar-les. Aquest laboratori està equipat amb diferents bancs de potència i de fluxos que permeten l'estudi de màquines tèrmiques destinat a la docència, així com també en la recerca realitzada per la Universitat. El laboratori està dissenyat de tal manera que centè una habitació tancada on es realitzen els treballs amb els motors en marxa ja que està insonoritzada però té una gran finestra per poder treballar des de fora evitant així els sorolls i els gasos. A l'interior disposa d'un extractor d'aire per mantenir la habitació sense gasos d'escapament del motor amb el que s'estigui treballant al banc de proves corresponent.

També disposa de una selecció de motors tèrmics de diferents característiques per realitzar aquestes pràctiques, ja siguin de gasolina, diesel, de motocicleta o de cotxe,. Hi ha des del motor més simple perquè els alumnes puguin visualitzar les parts més importants d'un motor 2T o 4T fins a un motor sencer d'un cotxe actual que ja té una disposició molt més complicada per assolir millors rendiments, i parts que en un motor de ciclomotor no i són com podria ser un turbocompressor.

Un d'aquests motors més simples de que disposa la universitat és un motor Otto mono cilíndric de 4T de Briggs&Stratton destinat a realitzar pràctiques docents de laboratori en banc de proves del grau en enginyeria mecànica.

També es disposa d'una gama de programes informàtics per realitzar simulacions informàtiques de motors, màquines tèrmiques o parts d'aquests. Un dels programes de que es disposa és el LotusEngine® que permet fer una simulació del funcionament del motor i extreure'n les corbes característiques i els paràmetres més importants

La Universitat vol simular diversos paràmetres del motor per millorar les pràctiques ja existents i que els alumnes pugin entendre millor el funcionament d'un motor 4T així com també coneguin un exemple de programa de simulació.

## 1.2 Objecte

L'objectiu del present projecte és realitzar una simulació del motor 4T amb el programa LotusEngine® de manera que quedi el més semblant a la realitat. Es vol incorpora aquestes simulacions a les pràctiques en el banc de proves de motors per tal de millorar l'aprenentatge dels alumnes i aprofundir en el coneixement dels motors tèrmics.

Posteriorment es volen validar els resultats obtinguts del programa informàtic LotusEngine® respecte els que proporcionen les dades experimental. Amb la simulació ajustada al motor físic, es simularan diferents variacions d'aquest motor.

## 1.3 Especificacions i abast

Per dur a terme aquest projecte s'han tingut en compte les condicions mostrades en la taula 1.1. Són unes especificacions bastant generals ja que el que ens importa més és que la simulació sigui el més fiable possible.

Especificació	Especificacions generals
1	Realització de la simulació del motor 4T amb el programa LotusEngine®
2	La simulació ha de contenir totes les mides i especificacions reals del motor
3	Obtenció de les corbes característiques amb la simulació
4	Comparació de les corbes reals amb les obtingudes de la simulació i ajust del model si cal

***Taula 1.1 Especificacions***

Pel que fa a l'abast del projecte es centrarà en realitzar una simulació del motor amb el programa informàtic perquè ens doni uns resultats els més semblant als obtinguts de manera experimental ja que això ens indica una bona simulació del motor significat que el nostre model té un comportament similar al motor real. Per arribar així a l' integració d'aquesta en les pràctiques amb els alumnes. També es proposen alguns possibles apartats de les noves pràctiques.

### **1.3.1 Programació del treball**

Per arribar a una bona simulació es comença per la recopilació de dades geomètriques més importants del motor, la parametrització completa del motor 4T incloent els motlles de silicona en els conductes d' admissió i escapament, així com també el diagrama de distribució d'obertura de les vàlvules.

Una vegada s'han recopilat totes les dades geomètriques s'utilitza el programa Autodesk Inventor per realitzar els dibuixos en 3D de les parts més importants del motor i treure'n els plànols en 2D.

Es crea el model de la simulació del motor amb el LotusEngine® i s'obtenen els primers resultats. Es realitzen les proves experimentals en el banc de potència del motor i s'obtenen les

corbes característiques i els paràmetres fonamentals, que serviran per fer la comparació amb els resultats obtinguts de la simulació.

Amb les dades obtingudes experimentalment s'ajusta el model informàtic i amb l'exploració dels resultats es busquen possibles aplicacions directes que es puguin introduir en les pràctiques ja existents.



## 2 CARACTERÍSTIQUES DEL MOTOR

### 2.1 Funcionament motor 4T

El motor que s'utilitza en el projecte és un motor d'explosió Otto de funcionament en quatre temps, és a dir que necessita quatre curses del pistó per realitzar un cicle complet.

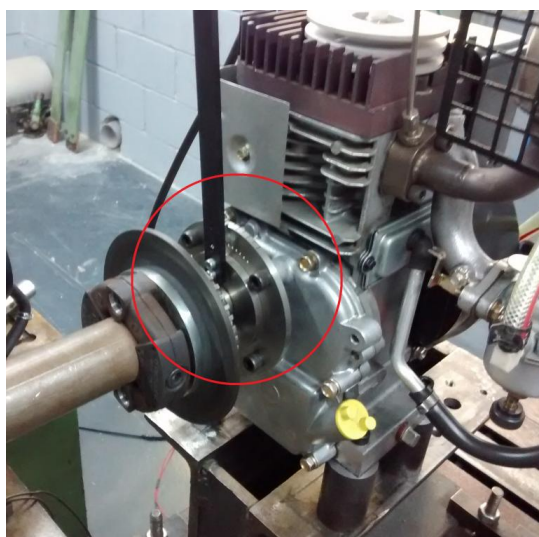
En cada un d'aquests temps es realitza una part del cicle, així es separen en l'admissió de la mescla d'aire i combustible, la compressió d'aquest, l'expansió dels gasos de la combustió i finalment l'escapament d'aquests gasos.

Es pot trobar informació més detallada del funcionament en l'Annex A.

### 2.2 Característiques principals del motor

El motor que s'utilitza per realitzar tan el projecte com les pràctiques és el model de la sèrie 475 de la marca Briggs&Stratton, que té una cilindrada de 148cc. La peculiaritat d'aquest motor és que es tracta d'un model destinat a la docència ja que permet regular la compressió i l'encesa.

La encesa es pot regular en 11 posicions variant la posició en  $5^\circ$  des de  $10^\circ$  després del punt mort superior fins a  $40^\circ$  abans del punt mort superior. En la figura 2.1 es pot observar que hi ha una tipus de manovella que és la que fixa l'encesa escollint un dels punts marcats. En la figura el motor ja està acoblat al banc de proves.



**Figura 2.1** Abans o retard de la encesa

La compressió la podem variar simplement canviant la cambra de combustió per una altra. Es disposa de fins a cinc cambres de combustió diferents, cada una amb una relació de compressió independent. Així podem obtenir les relacions de compressió de 1:10, 1:8.5, 1:7, 1:5.5 i 1:4. Aquestes cambres de combustió juntament amb una part intermèdia al càrter, formen els diferents conjunts de culates que es té.

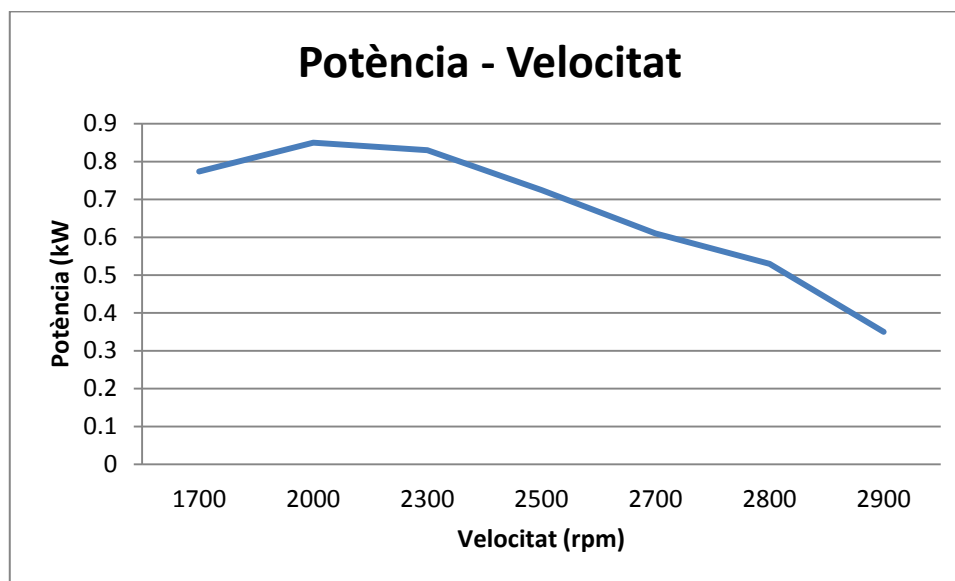
Perquè sigui senzill poder variar d'una cambra a una altra el motor disposa d'una peça intermèdia al càrter amb forat roscat on s'acoblen amb facilitat les diverses parts superiors d'ela culata. En la figura 2.2 podem veure la carrera del pistó i les vàlvules a través del forat rosat de la peça intermèdia. En canvi en la figura 2.3 ja i està muntada una cambra de combustió, en aquest cas com s'observa és d'una relació de compressió de 1 :8.5 .



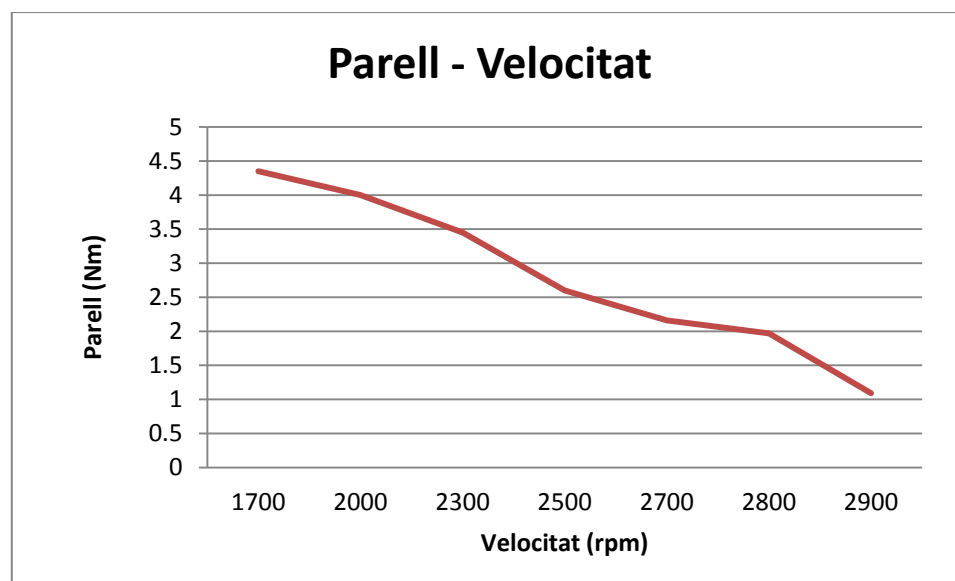
**Figura 2.2** Motor sense cambra de combustió    **Figura 2.3** Motor amb cambra de combustió

## 2.3 Característiques tècniques motor

El motor pot proporcionar una potència màxima d'uns 1.5 kW però aquets varia segons la relació de compressió i el moment de l'encesa. Té una carrera de 44.4 mm i el diàmetre del cilindre és de 65.1 mm. Amb aquestes dades i una compressió de 1:7, que és amb la que es treballarà per fer la simulació, s'obtenen les corbes de parell i potència de les següents gràfiques 2.1 i 2.2



**Gràfica 2.1** Potència en relació a la velocitat



**Gràfica 2.2** Potència en relació el parell

Es poden consultar més característiques específiques en el manual d'usuari del motor utilitzat que conté l'Annex B.

## 2.4 Dades geomètriques motor

Es vol obtenir les mides més importants del motor per tal que la simulació sigui el més exacte possible. El motor té una geometria complexa però s'obvien moltes parts que no influeixen a l'hora de realitzar la simulació com són la part del carter que conté l'oli del carter i el cigonyal. També hi ha molts detalls com els cargols i parts que només serveixen per subjectar el les peces o donar estabilitat.

Totes les peces s'han dibuixat amb el programa Autodesk Inventor® de dibuix en 3D i s'han passat a plànols 2D que es poden consultar en el document de *Plànols* d'aquest projecte.

La majoria de les mides són fàcils d'obtenir amb un peu de rei , ja que el motor es pot dividir en la culata, peça intermèdia del càrter, càrter, vàlvules, pistó i biela. Aquestes són les parts que influeixen en la simulació i de les que s'obtenen les mides més important. Per mesurar els conductes d'admissió i escapament es realitzen uns motlles de silicona

### 2.4.1 Pesos parts mòbils motor

Els pesos que són importants per la simulació són aquells de les parts mòbils i més en les que ho fan a gran velocitat per això es necessita pesar el pistó amb el boló i els aros , i per altra banda la biela. Per realitzar les mesures s'utilitza una balança analítica ja que els pesos són força petits i es necessita una balança que tingui precisió.

Els pes del pistó amb el boló i els aros és de 179.08g i el de la biela de 85.52g.

## 2.5 Geometria dels conductes

Tot i que el motor es pot desmuntar en part fàcils de mesurar, els conductes d'admissió i escapament tenen una estructura difícil on les eines de medicació són difícils d'utilitzar ja que no

i caven al conducte i si ho fan les mesures no són gaire fiables. Per això es busca una altra via de medicació que són els motlles de silicona.

Al laboratori de motors tèrmics es disposa de una silicona tèrmica reutilitzable per fer motlles, així una vegada s'han tret les mides necessàries es pot reutilitzar en cas que no es disposés de més silicona o no es volguessin guardar. També es podria utilitzar algun altre tipus de silicona no reutilitzable sempre que sigui compatible amb la tècnica d'emmotllament utilitzada.

Per realitzar els motlles s'utilitza la tècnica de colada, és a dir escalfant la silicona fins que estigui fosa per després abocar-la a dins dels conductes. Per dur a terme aquesta acció primer s'han de tapar tots els forats deixant-ne només un de lliure perquè entri la silicona. Per això es realitza la colada amb les vàlvules posades i pressionades amb un mecanisme perquè quedin totalment tancades, així segellen per dalt. Per la part de baix tampoc pot baixar la silicona ja que les tiges de les vàlvules van molt ajustades amb el càrter. En la figura 2.4 s'observa el mecanisme utilitzat, fen servir unes peces metàl·liques, cargolades en el càrter, per fer pressió sobre les vàlvules .

Una vegada s'ha enfredat la silicona ja es pot desmuntar el mecanisme per retirar els motlles.

Primer es retiren els cargols i les peces que fan pressió per tots seguit poder treure les vàlvules perquè aquestes travessen els motlles i no els podríem treure. Les vàlvules surten molt fàcilment per dalt.

Una vegada ja s'han tret les vàlvules, ja es poden treure els motlles. S'ha de tenir molt de compte alhora de treure'ls ja que es té el risc de que es trenquin per culpa de la seva geometria i més en el conducte d'escapament ja que al final està roscat.

Quan es tenen els motlles es veu que és molt més fàcil prendre les mides tot i que com són de silicona tova s'ha de tenir cura quan s'estrenyen al mesurar.



**Figura 2.4** Mecanisme emmotllament conductes

## 2.6 Dades fluidomecàniques dels conductes

### 2.6.1 Definició coeficients de descàrrega

Quan els fluxos de gas passen a través d'una vàlvula, el desenvolupament de la separació i recirculació dóna lloc a una vena-contracta en el qual l'àrea de secció transversal real del corrent de gas (àrea efectiva) és menor que l'àrea geomètrica de l'orifici. L'àrea efectiva d'una vàlvula és un concepte hipotètic que permet que el flux de massa a través de la vàlvula pugui ser avaluat per una diferència de pressió donada a través d'ella. Aquesta diferència produeix un rendiment de flux del motor depenent de la geometria dels conductes, les vàlvules i la fricció amb les parets del cilindre. Per mesurar-la utilitzem el coeficient de descàrrega.

Aquest coeficient va relacionat amb el rendiment volumètric del motor. El coeficient de descàrrega és la relació que hi ha entre el flux màssic real de l'aire que entra o surt i el flux màssic ideal en les mateixes condicions. Quan es refereix a flux ideal es aquell que correspon al flux sense pèrdues de pressió degudes a la fricció amb les parts internes del motor. L'Equació 1 mostra la fórmula del coeficient de descàrrega.

$$C_D = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (\text{Eq.1})$$

On:

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

$\dot{m}_{real}$  - flux màssic d'aire real (kg/s)

El flux ideal es calcula fent servir la hipòtesi del flux isentròpic adiabàtic passant a través de la tubera d'admissió o escapament (equació 2), en canvi el real l'obtenim del banc de flux.

$$\dot{m}_{ideal} = A \cdot \frac{P_0}{T^{0.5}} \sqrt{\frac{2\gamma}{R(\gamma-1)} \left( \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \quad (\text{Eq.2})$$

On:

A – àrea de flux de la vàlvula ( $m^2$ )

T – temperatura atmosfèrica (K )

$P_0$  – pressió atmosfèrica (Pa)

$\gamma$  – exponent adiabàtic d'aire, igual a 1,4

P – pressió mesurada sobre el pla localitzat sota la vàlvula (Pa)

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

L'àrea que utilitzem és igual al de la secció transversal de la vàlvula i depèn de l'alçada d'obertura i del diàmetre, com s'observa en l'equació 3.

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad (\text{Eq.3})$$

On:

D – diàmetre de la vàlvula (m)

L – alçada d'obertura de la vàlvula (m )

### 2.6.2 Banc de fluxos utilitzat

En el laboratori de motors es disposa d'un banc de fluxos o fluxòmetre de la marca Saenz, model D-680. Aquest banc de fluxos permet una lectura Electrónica però les operacions han de ser manuals, és a dir la regulació i el muntatge del mecanisme es realitza per part de l'operari.

Aquest sistema permet realitzar les proves amb lectura directa en temps real en la pantalla LCD, amb lectures puntuals o promitjos. També consta d'un software que rep, processa i emmagatzema tota la informació rebuda en el procés d'adquisició de dades.

El model en concret de que es disposa a la universitat és un banc de proves de gran capacitat, molt robust i que conte amb 10 motors de buit que permeten arribar a fluxos de 680 cfm, peus cúbics per minut, a 28 polzades d'aigua de pressió de treball. Està calibrat sota les normes ASME MFC-3M.1989 en els seus 4 rangs de medició en l'admissió i l'escapament, per això ofereix una excel·lent sensibilitat i precisió. En la següent figura 2.5 es pot observar la forma que té el fluxòmetre del que disposem. Una de les desavantatges que té aquest banc és que al ser americà no treballa amb el sistema internacional de unitats però no és de gran importància ja que el resultat és adimensional.

El banc de fluxos permet mesurar els fluxos d'aire i els coeficients de descàrrega dels conductes d'admissió i escapament del motor en que s'està treballant.



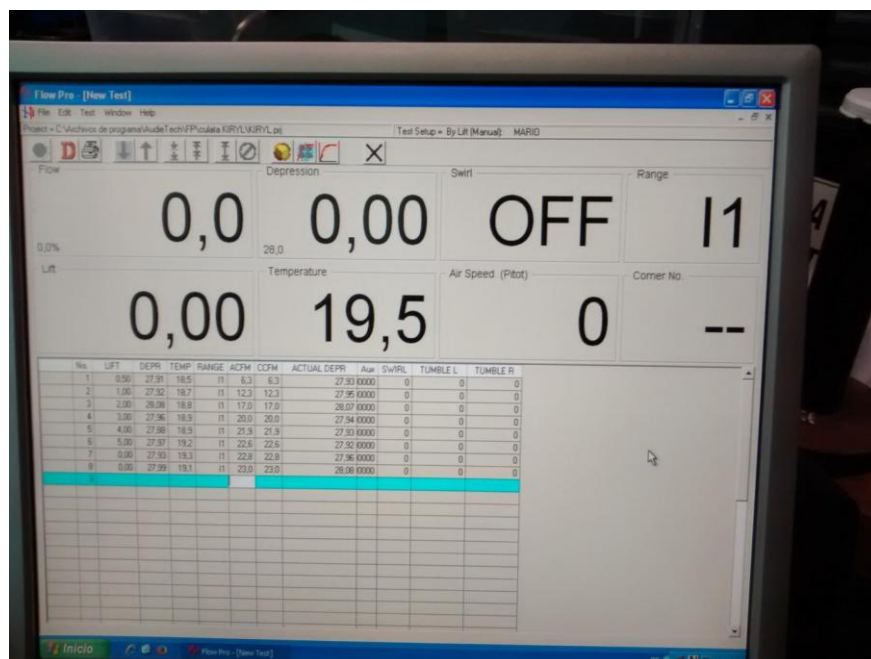
**Figura 2.5** Fluxòmetre utilitzat (foto extreta de [www.saenzdynos.com](http://www.saenzdynos.com))



La segona part són els comandaments que serveixen per regular la màquina. A la part superior es disposa d'unes botonera amb els pulsadors d'arrencada i parada d'emergència així com també els de la regulació dels diferents motors per si es necessita més o menys potència. A la zona davantera central es troba una manovella que ens permet elegir si es vol treballar amb aspiració o expulsió d'aire. Als seus costats es troben dos manovelles circulars que ens permeten regular el flux de l'aire d'admissió o expulsió, cada un per separat. Per motius de seguretat també hi ha situada una parada d'emergència en aquests comandaments, ja que són de més ràpid accés perquè és on treballa l'operari.

Aquesta part també engloba un pedal situat al terra que és el que ens guarda, en el programa, la mesura en el punt exacte seleccionat. Ja que encara que es pot veure en temps real les dades, prement el pedal s'elegeix el moment en que es fa la mediació.

La última part consta del software de la màquina amb el qual es pot treballar mitjançant una pantalla LCD com es mostra seguidament a la figura 2.6. Aquesta pantalla permet visualitzar en temps real les mesures de flux del banc per poder regular-lo. A més de la temperatura real, el valor de l'alçada de la vàlvula per saber la obertura i finalment la depressió produïda per el pas de l'aire. A part ens mostra el canal d'adquisició de dades amb el que estem treballant i si el banc esta en funcionament en aquell moment.

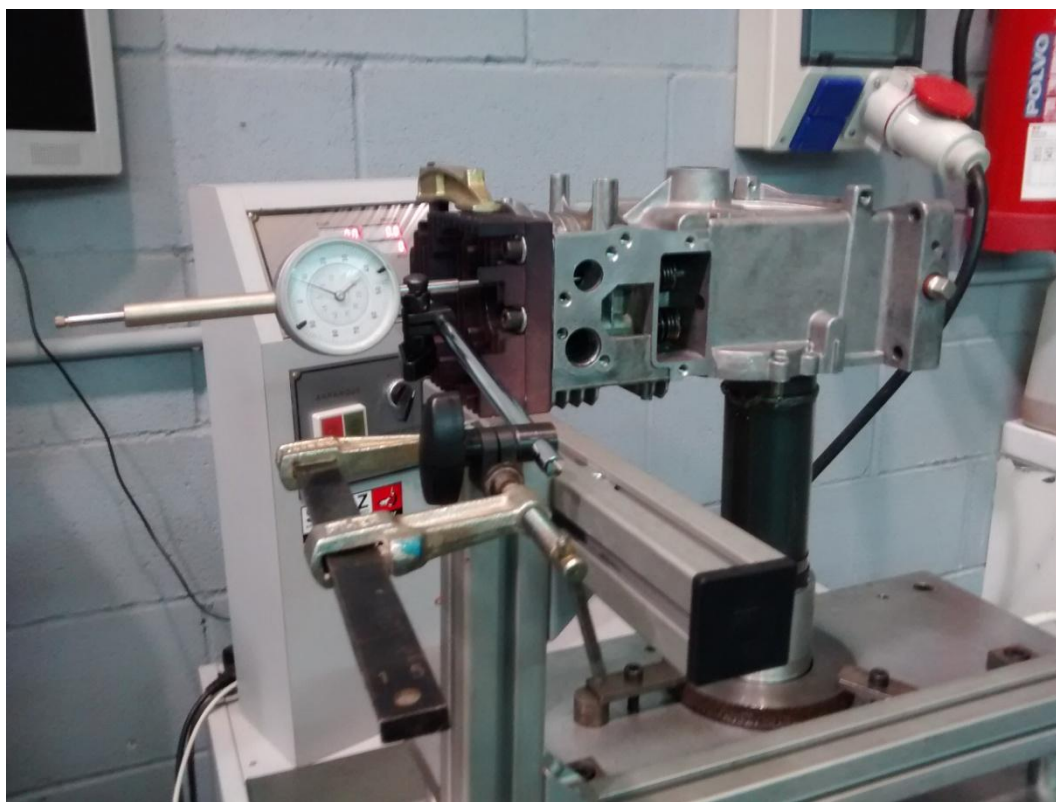


**Figura 2.6** Pantalla fluxòmetre

També es disposa d'un programa amb el que es pot treballar amb les dades obtingudes que s'han anat guardant a mesura que s'ha fet la recopilació de dades. Aquestes dades són les que s'obtenen prement el pedal que hem mencionat anteriorment. Gràcies al programa i el que s'ha obtingut de les mesures es pot trobar els fluxos d'aire de l'aspiració i l'escapament així com també els coeficient de descàrrega.

### 2.6.3 Mecanisme utilitzat

S'ha hagut de dissenyar un mecanisme que permeti la obertura de les vàlvules en alçades mesurades i que no es perdi aire en el funcionament. S'ha utilitzat una tubera de ferro per fer una bona unió amb el motor i la màquina, un rellotge comparador per mesurar les alçades i una estructura simple amb serjants perquè s'aguanti bé. En la següent figura 2.7 s'observa el mecanisme complet.



**Figura 2.7** Mecanisme adquisició dades de fluxos

Es col·loca el motor de costat per poder treballar més fàcilment ja que l'orifici de treball de la màquina està situat en posició vertical. Per culpa de la geometria del nostre motor hem d'utilitzar un tub en forma de L ja que és la única opció per canalitzar l'aire fins la entrada inferior de la carrera del pistó. Per assegurar la estanquitat en la unió s'introdueix un casquet per aconseguir el diàmetre de la carrera i es posa silicona segadora entre les peces una vegada ja s'ha col·locat el mecanisme de forma que quedi estable i no s'hagi de moure més. En la figura 2.8 es mostra la unió segellada.

Per realitzar el moviment d'alçament de les vàlvules s'ha introduït a sota el seient d'aquestes un petit mecanisme que ens facilita un moviment lent i bastant estable. Consta de dues parts roscades, un cargol que fa pressió amb la part inferior del carter, i una peça més gran roscada en aquest cargol i que fa pressió a la vàlvula. Així a mesura que s'actua sobre la segona peça obrint aquesta unió roscada la vàlvula va pujant. També es pot observar aquest petit mecanisme en la posterior figura 2.8.



**Figura 2.8** Unió motor i mecanisme regulador d'alçada

Per mesurar l'alçada, de manera exacte, de la vàlvula s'utilitza un rellotge comparador situat en la zona plana del centre de cada vàlvula. Per mantenir recte i estable el rellotge es monta un braç articulat fàcilment subjectat amb un serjant a l'estructura d'alumini així ens permet un sistema estable. El mateix braç articulat permet el moviment del rellotge ja que cada vegada que es vol fer una medició s'ha d'apartar per posar la culata.

#### **2.6.4 Adquisició de dades banc de flux**

El primer que s'ha de realitzar és col·locar el mecanisme que volem estudiar de manera que quedi totalment segellat amb l'orifici de la màquina, sinó es produirien pèrdues d'aire que i els resultats obtinguts serien erronis.

Seguidament es posa en funcionament la part del software i s'introdueixen les dades amb les que s'estan treballant, en el nostre cas s'introdueixen els intervals de les diferents alçades d'obertura de les vàlvules amb les que es treballen. La alçada màxima es pot mesurar de l'arbre de lleves del motor. També s'introdueixen les dimensions de les vàlvules i el diàmetre dels conductes, així quan s'acabi l'adquisició de dades es poden obtenir directament del programa els valors dels fluxos d'aire i els coeficients de descàrrega. Les dimensions del motor es poden trobar en el document de *Plànols* del projecte.

Una vegada s'han entrat els valor es regula el fluxòmetre per una potència que sigui adient al mecanisme, encara que sempre es pot fer una prova inicial per acabar de ajustar-lo.

Ja està el banc de fluxos a punt per fer l'adquisició de dades, ara s'ha de triar si es vol aspiració d'aire per fer la vàlvula d'admissió o expulsió, per fer la d'escapament. No s'ha de variar la unió entre el motor i el banc depenent de la variació de l'aire però si que s'ha de tancar totalment la vàlvula amb la que no es treballa i posar el regulador d'alçada i el rellotge comparador en la que estem treballant. És molt important que abans de fer qualsevol medició es reguli el banc de flux per la temperatura i humitat relativa en que s'està treballant.

Per començar a obtenir les dades de fluxos s'ha de partir de la vàlvula totalment tancada i utilitzant el rellotge comparador alçar-la 0.5mm que és la distancia d'interval en que es treballa. S'ha de retirar el rellotge i tancar el motor col·locant la culata amb la bugia per poder encendre la màquina.

Per aconseguir el nostre flux d'aire per cada alçada utilitzem el model de Jenny [J] que ens especifica una depressió constant que es fixa en 28 polzades columna d'aigua en els motors de

combustió interna de quatre temps. Per això el que s'ha de realitzar per obtenir el nostre flux d'aire és anar-lo regulant fins aconseguir una depressió de 28", és en aquell moment on es té la mesura adequada del nostre flux en peus cúbics per minut CFM. S'ha de anar repetint el procés per cada alçada de la vàlvula tenint en compte que cada vegada s'ha d'obrir la culata i amb el comparador incrementar la posició en 0.5 mm fins arribar a la totalitat de la vàlvula oberta.

Finalment s'obtenen els resultats en forma de taula i gràfiques.

### 2.6.5 Resultats banc de flux

Admissió					Escapament			
L	L/D	T	Flux	CD	L/D	T	Flux	CD
0.5	0.023	18.7	7.3	0.068	0.026	19.9	5.7	0.072
1	0.045	18.8	12	0.112	0.053	20.2	10	0.126
1.5	0.068	18.7	16.4	0.153	0.079	20.2	13.5	0.17
2	0.091	18.7	20.4	0.191	0.105	19.9	16.5	0.208
2.5	0.114	18.6	21.8	0.204	0.132	20	18.3	0.23
3	0.136	18.6	22.6	0.212	0.158	19.9	19.4	0.244
3.5	0.159	18.5	22.8	0.214	0.184	19.9	20.3	0.255
4	0.182	18.5	22.9	0.215	0.211	19.3	21	0.264

**Taula 2.1** Resultat banc de flux

On:

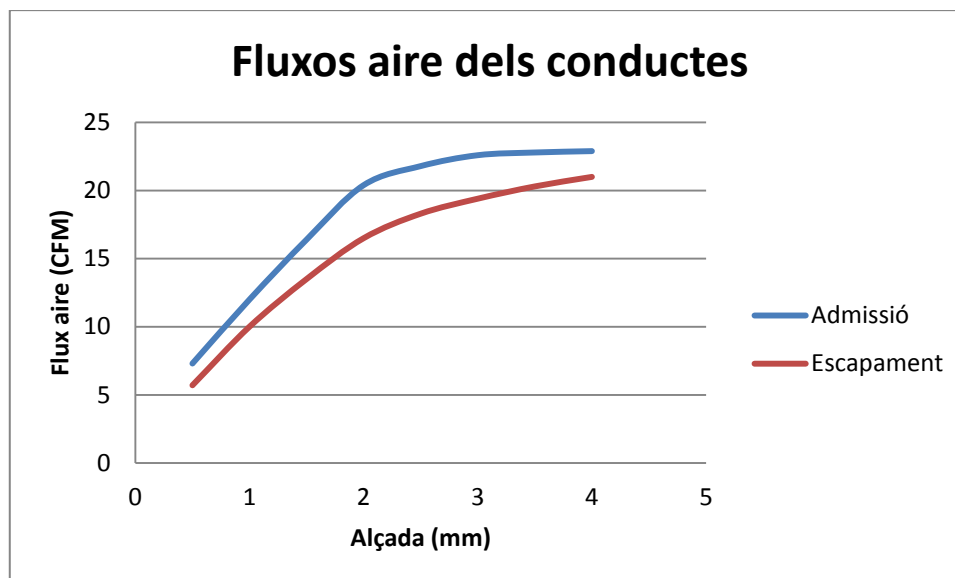
Alçada- alçada d'obertura de la vàlvula (mm)

T- temperatura de l'aire (°C)

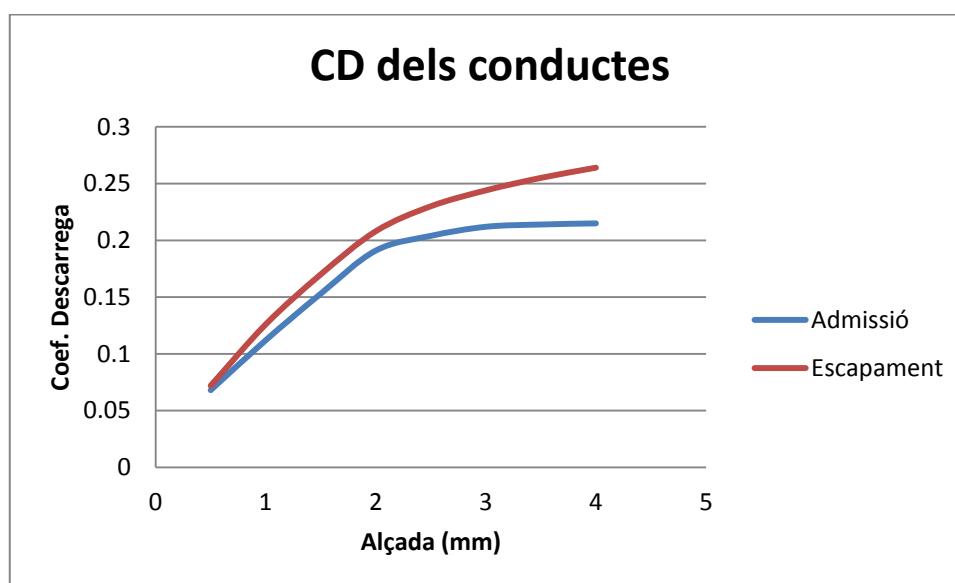
Flux- flux d'aire (CFM o peus cúbics per minut)

CD- coeficient de descàrrega (adimensional)

D – Diàmetre del conducte d'admissió o escapament (mm)



**Gràfic 2.1** Fluxos d'aire dels conductes



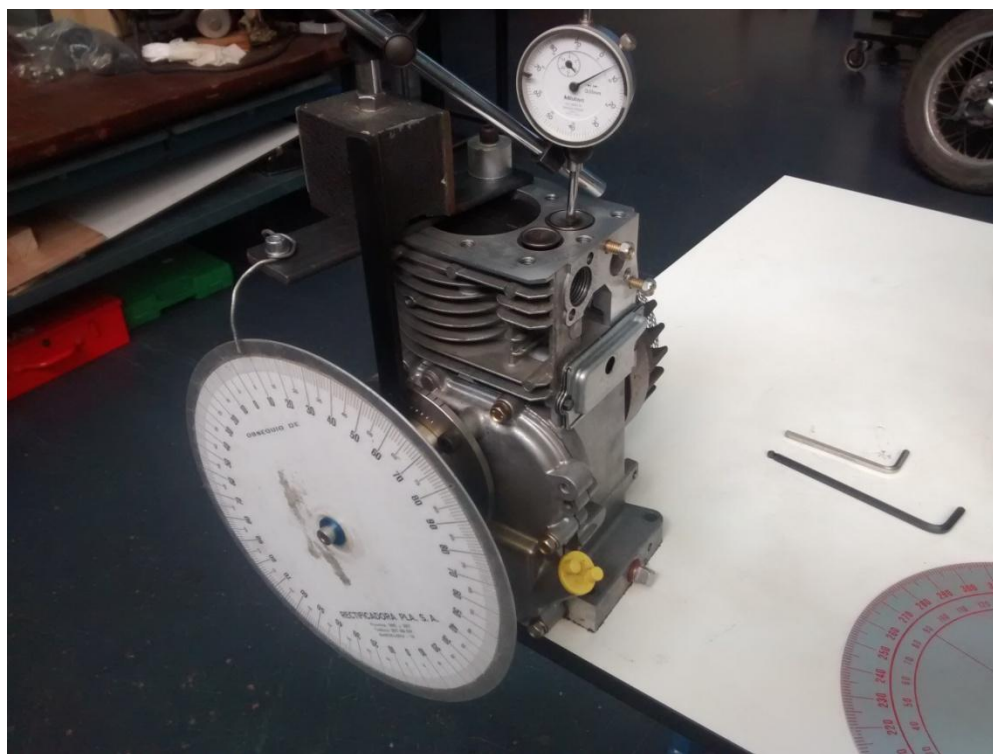
**Gràfic 2.2** Coeficient de descàrrega dels conductes

Els resultats del programa del fluxòmetre es poden visualitzar en la taula 2.1 i en els gràfics 2.1 i 2.2. Es pot observar que els coeficients de descàrrega són molt pobres i tindran molt de pes en el rendiment final del motor.

## 2.7 Diagrama distribució vàlvules

### 2.7.1 Obtenció obertura vàlvules

Per aconseguir els diagrames d'obertura de les vàlvules d'admissió i escapament s'ha muntat un mecanisme amb un transportador d'angles calibrat de 360° fixat a l'eix del cigonyal. Per fer les mesures s'utilitza un rellotge comparador, a sobre de la vàlvula que s'estudia, amb un sistema de braç articulat subjectat amb un imant a la bancada. En la mateixa bancada es posa un tros de fil ferro perquè realitzi les funcions d'agulla mesuradora dels graus. En la següent figura 2.9 es mostra aquest mecanisme.



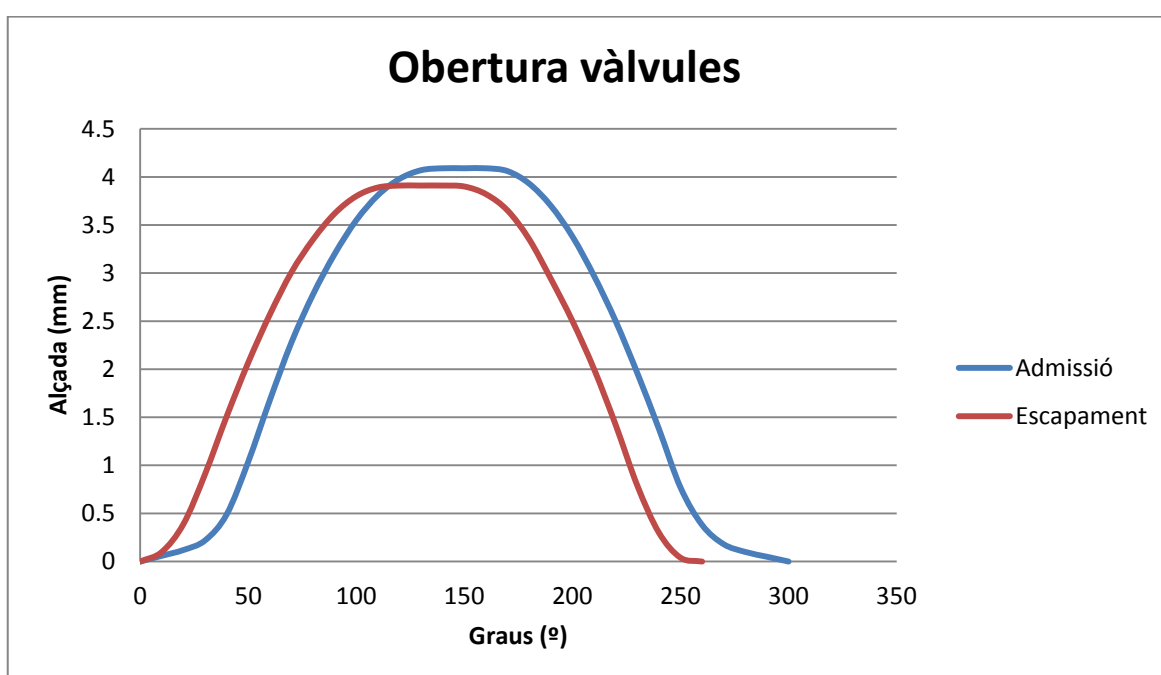
**Figura 2.9** Mecanisme de mesura de les alçades segons els graus

El sistema d'adquisició de les dades és el mateix per la vàlvula d'admissió que per la d'escapament tenint en compte el moviment del cigonyal. Es comença buscant el punt just on la vàlvula s'obre i es col·loca el 0° del transportador d'angles allà. S'ha de posar el rellotge comparador a zero ja que ara es va avançant el cigonyal en intervals de 10° i s'apunta l'alçada de la vàlvula fins que aquesta es torni a tancar.

Per saber el punt d'obertura de la vàlvula d'admissió es col·loca el transportador a  $0^\circ$  en el punt mort superior PMS i amb la ajuda del rellotge comparador es busca el punt just abans del PMS en que la vàlvula es comença a obrir. Com que tenim els graus que es manté oberta la vàlvula fins que es tanca, també podem saber el punt exacte del tancament de la vàlvula.

Per obtenir el punt d'obertura de la vàlvula d'escapament e realitza el mateix procés però el  $0^\circ$  s'ha de posar en el punt mort inferior PMI i recular fins trobar el moment d'obertura.

## 2.7.2 Obertura vàlvules segons angle cigonyal

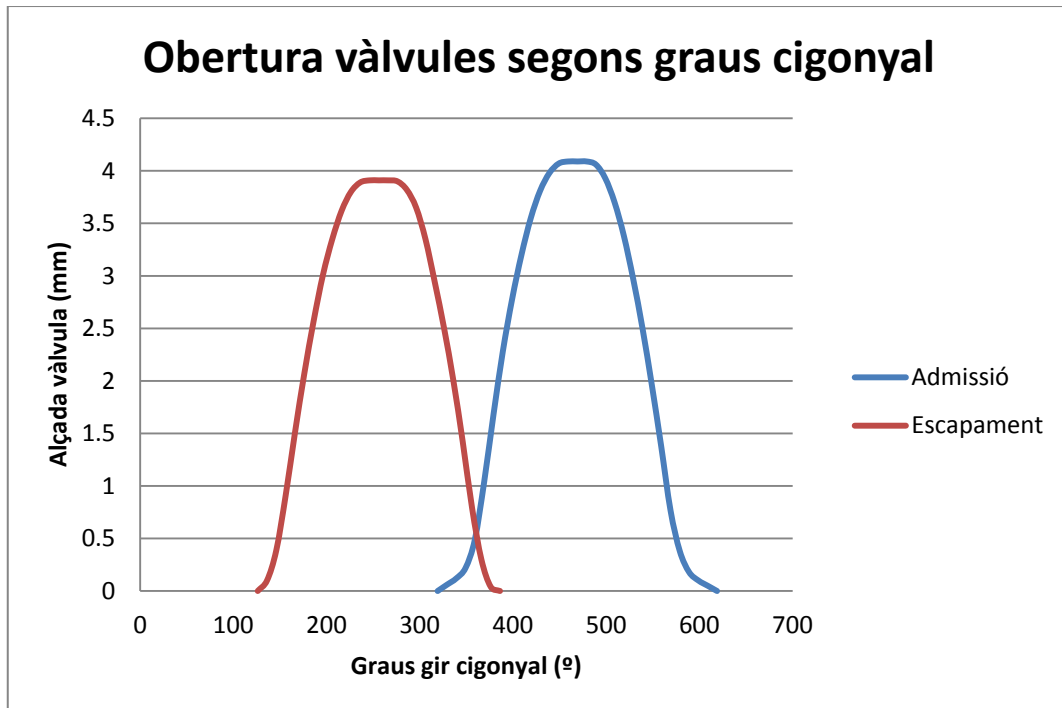


**Gràfic 2.3** Obertura de les vàlvules segons graus relatius

En la gràfica 2.3 s'observa l'obertura de les vàlvules segons els graus relatius del cigonyal, sense tenir en compte la posició d'aquest. L'obertura de l'admissió és més lenta al principi i al final però s'obre una mica més i durant més temps. Pel contrari l'escapament té una obertura més ràpida i està menys temps oberta. La vàlvula d'admissió s'obre  $40^\circ$  abans del punt mort superior, es tanca a  $75^\circ$  després del punt mort inferior i es manté  $28^\circ$  totalment oberta, per tant el punt mig d'obertura de la vàlvula es troba a  $98^\circ$  després del punt mort superior. En canvi la d'escapament s'obre  $54^\circ$  abans del punt mort inferior, es tanca a  $23^\circ$  després del punt mort



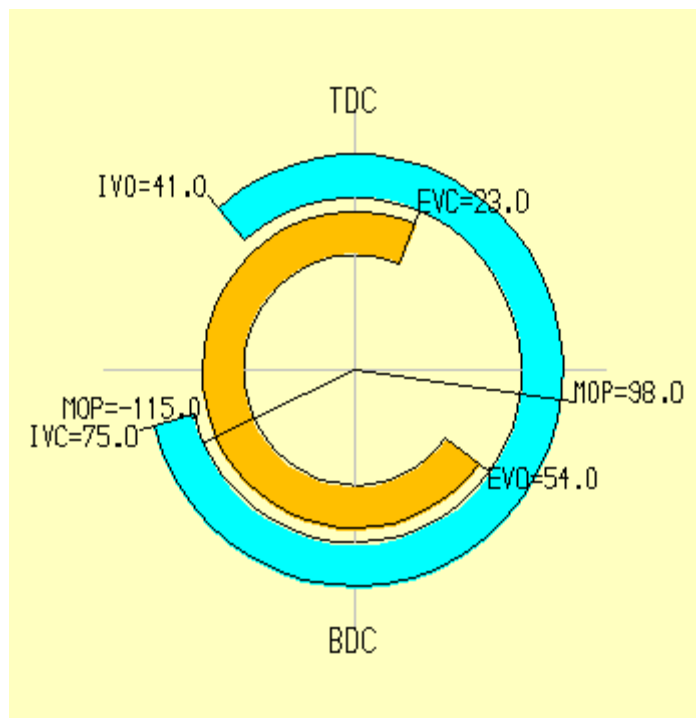
superior i està  $31^\circ$  totalment oberta donant així el punt mig d'obertura de la vàlvula a  $65^\circ$  passat el punt mort inferior.



**Gràfic 2.4** Diagrama d'elevació i creuament de vàlvules segons graus cigonyal

En el gràfic 2.4 s'observa el moviment d'obertura de les vàlvules segons els graus del cigonyal en tot el cicle de combustió tenint en compte el  $0^\circ$  com el moment que el pistó està a dalt de tot i es produeix la explosió per a la combustió.

El gràfic 2.5 també es mostra la obertura de les vàlvules però de una manera radial, marcant el punt mort superior a dalt i l'inferior a baix. En aquest es pot observar que estan marcats els graus d'obertura, tancament i el punt mig, que s'acaba de mencionar.



**Gràfic 2.5** Diagrama de distribució de les vàlvules

## 3 SIMULACIÓ LOTUSENGINE®

### 3.1 Funcionament LotusEngine®

El Lotus Engine software és un programa que permet a l'usuari obtenir ràpidament una apreciació dels paràmetres associats amb una configuració de motor en particular. El programa pot calcular i obtenir:

- Facilitat en realitzar un esquema d'un motor d'un o més cilindres a base d'un model de xarxa de canonades per a una simulació
- Comportament total d'un motor sota les condicions operacionals d'un estat en equilibri i transitori.
- Les dades de transferència de calor del cilindre.
- Les variacions instantànies de les propietats dels gasos dins dels col·lectors del motor.
- Les condicions amb turbocargador i sobrealimentador.
- Eines de simulació independents del concepte del motor, estimador de fricció, anàlisi dels combustible, anàlisi dels conductes d'admissió i escapament i concepte de l'arbre de lleves.
- Establir unes condicions de treball externes i internes, per l'adquisició de dades en forma de tests.
- Obtenció dels valors dels resultats en forma de taules i gràfiques, podent fer comparatives amb valors externs introduïts, com podrien ser valors reals del motor.

- El programa disposa d'una aplicació que es diu entorn de visualització on es mostra una gràfica de la pressió, temperatura, massa i velocitat de l'aire en cada un dels punts d'unió dels diferents parts per cada velocitat que s'hagi fet una mostra en la simulació.

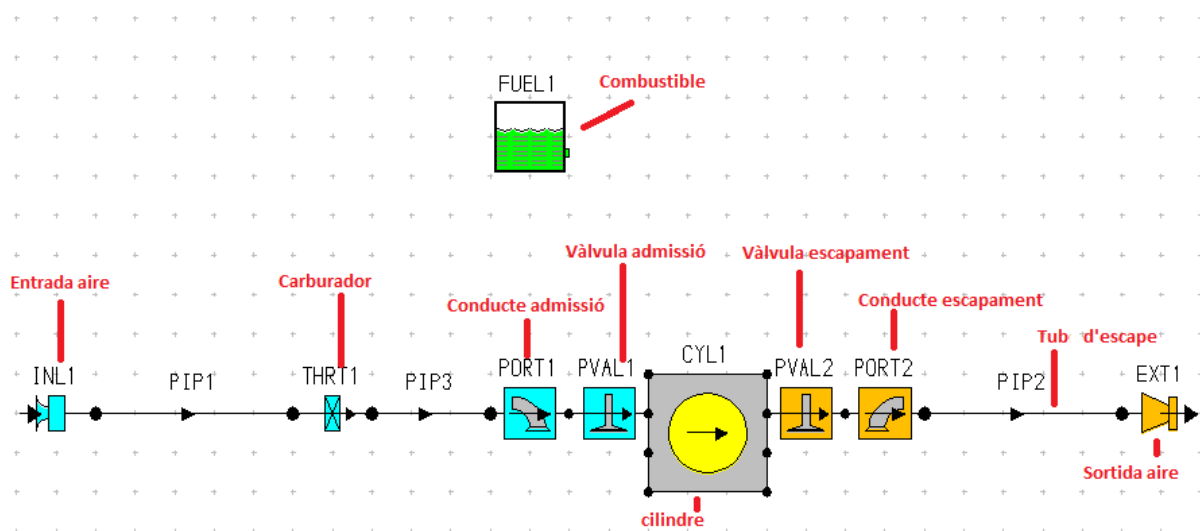
Per realitzar una simulació amb el programa es segueix el següent procediment. Primer es construeix la part del motor i les especificacions del col·lector. S'ha d'introduir el diàmetre del cilindre, la carrera del pistó, les dimensions de la biela, l'índex de compressió de la culata, les dimensions de les vàlvules així com també les característiques d'obertura dels carburadors, turbocompressors i sobrealimentadors si n'hi ha. També tots els tubs d'unió entre les peces.

Una vegada s'han emplenat les característiques del motor es pot variar el combustible si és algun especial. S'ha de ajustar la simulació al rang de velocitat amb el que treballa el motor així com també les condicions dels tests que es faran, com poden ser la pressió, la temperatura o la humitat específica.

Quan ja s'han modificat totes aquestes variables ja es pot realitzar la simulació del motor perquè es pugui obtenir les diverses corbes de potència, parell, pressions, temperatura, volum específic...

Es pot trobar informació més detallada del programa informàtic a l'Annex C.

## 3.2 Esquema simulació



**Figura 3.1** Esquema del motor per la simulació

La simulació que realitzem consta de diverses parts que segueixen aquest ordre en la direcció de l'entrada de l'aire al motor, com es mostra en la Figura 3.1.

Primer comença amb una entrada de aire que ens fa posar el programa per establir les condicions de l'aire d'entrada. El segueix un conducte intermedi que aboca en el carburador connectat al conducte d'entrada del motor per un altre conducte intermedi. El conducte d'admissió toca directament amb la vàlvula d'admissió fins arribar al cilindre.

En la sortida del cilindre es repeteixen diverses parts però en ordre invers, començant per la vàlvula d'escapament i el seu conducte. D'aquí surten els gasos gràcies al tub d'escapament fins finalitzar en una sortida d'aire que en obliga a posar el programa per acabar l'esquema de la simulació. També hi ha el combustible utilitzat que es presenta a la part superior en forma de dipòsit.



### **3.3 Introducció dades simulació**

Es mostrarà en cada part de l'esquema de simulació amb més detall i les característiques importants del motor que s'han d'introduir i algunes que s'han de tractar abans.



#### **3.3.1 Entrada d'aire i carburador**

En l'entrada d'aire fixem una pressió constant de 1 bar absolut i una temperatura de 20° per totes les diferents velocitats de mostreig de la simulació.

Pel que fa als conductes intermedis del carburador s'han simulat com si fossin tubs rectes. En la figura 3.2 i 3.3 es pot observar les característiques més importants dels tubs.

Label	default pipe t1
All Dimensions	
Dimension Summary	
Total Length (mm)	120,00
No. of Diameters	2
Start Diameter (mm)	25,000
End Diameter (mm)	25,000
Pipe Graphical Display	
Pipe Volume (l)	0,0589
Surface Area (mm <sup>2</sup> )	9,4248e+003
No. of Meshes	4
Wall Thickness (mm)	4,000
Cooling Type	Air Cooled ▾
Temperature (°C)	20,00
Ext. HTC (W/m <sup>2</sup> /K)	20,00
Wall Material	Aluminium ▾

**Figura 3.2** Tub anterior al carburador

Label	default pipe t1
All Dimensions	
Dimension Summary	
Total Length (mm)	130,00
No. of Diameters	2
Start Diameter (mm)	16,000
End Diameter (mm)	16,000
Pipe Graphical Display	
Pipe Volume (l)	0,0261
Surface Area (mm <sup>2</sup> )	6,5345e+003
No. of Meshes	4
Wall Thickness (mm)	1,000
Cooling Type	Air Cooled ▾
Temperature (°C)	20,00
Ext. HTC (W/m <sup>2</sup> /K)	20,00
Wall Material	Aluminium ▾

**Figura 3.3** Tub posterior al carburador

On:

Total Length - longitud total del tub

Start Diàmetre – diàmetre d'inici del tub

End diàmetre – diàmetre final del tub

Wall Thickness – els gruix de paret del tub

Cooling Type – tipus de refrigeració, per aire en els dos casos

El carburador és de tipus papallona amb un diàmetre de 13.5 mm i un coeficient de descàrrega de 0.35. La papallona té un angle de gir de 90° , un angle de tancament de 10° i el diàmetre de l'eix de la papallona és de 5mm

### 3.3.2 Conducció i vàlvula d'aspiració

En el conducte d'aspiració s'introdueix el diàmetre de 22mm i els coeficients de descàrrega obtingut en el banc de fluxos, però el programa ens el fa introduir en funció de la relació de l'alçada d'obertura de la vàlvula i el diàmetre del conducte. Per això s'han de dividir totes les alçades i treure una nova gràfica.

L	L/D	Cd
0	0	0
0.5	0.023	0.068
1.0	0.045	0.112
1.5	0.068	0.153
2.0	0.091	0.191
2.5	0.114	0.204
3.0	0.136	0.212
3.5	0.159	0.214
4.0	0.182	0.215

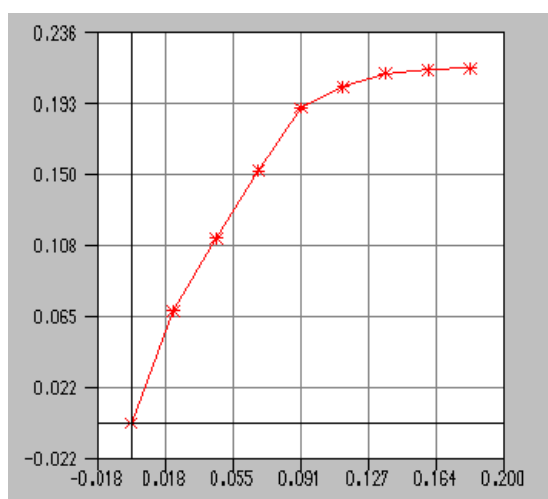
On:

L – alçada de la vàlvula (mm)

D – diàmetre del conducte (mm ), en aquest cas de 22

Cd – coeficient de descàrrega (adimensional)

**Taula 3.1** Relació alçada/diàmetre admissió



Una vegada s'han entrat la nova relació entre l'alçada i el diàmetre, així com també els coeficients de descàrrega, el programa dibuixa una nova gràfica on l'eix de les ordenades és L/D.

**Gràfic 3.1** Coeficient de descàrrega admissió en funció de L/D

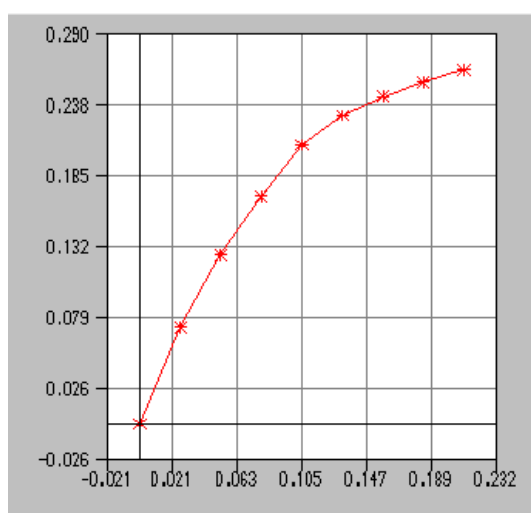
L'apartat de la vàlvula d'admissió s'entren els valor obtinguts dels temps i alçada d'obertura segons els graus, sense necessitat de fer algun pas previ, així com també l'alçada màxima de la vàlvula que s'ha obtingut amb el rellotge comprador i és de 4,09mm.

### 3.3.3 Conducte i vàlvula d'escapament

Pel que fa al conducte d'escapament es repeteix el mateix procediment que amb el d admissió però en aquest cas el diàmetre del conducte és de 19mm.

L	L/D	Cd
0.0	0	0
0.5	0.026	0.072
1.0	0.053	0.126
1.5	0.079	0.170
2.0	0.105	0.208
2.5	0.132	0.230
3.0	0.158	0.244
3.5	0.184	0.255
4.0	0.211	0.264

**Taula 3.2** Relació L/D admissió



**Gràfic 3.2** Cd admissió en funció de L/D

L'alçada de la vàlvula d'escapament, com ens mostra la gràfica d'obertura, en aquest cas és una mica inferior al de l'admissió, ja que és de 3.91mm

### 3.3.4 Conducte i vàlvula d'escapament

En el cilindre s'entren les dades geomètriques més importants que són el diàmetre dels cilindre de 65.1mm , la carrera de 44.4mm i la longitud entre centres de la biela 80mm. També s'introdueixen els pesos del cilindre i la biela.

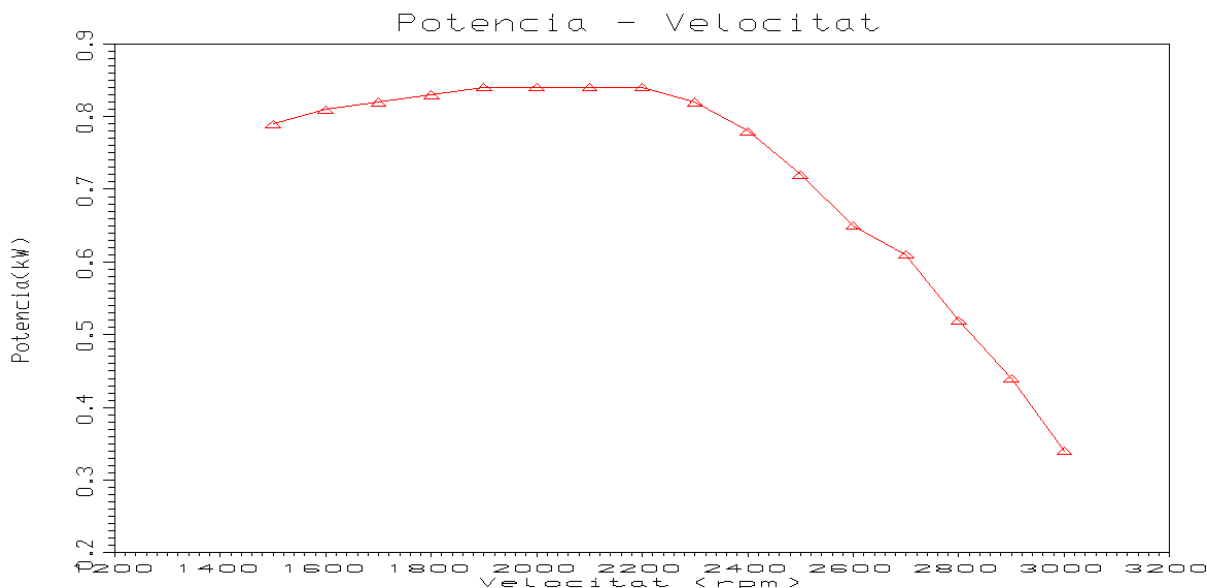
En aquest cas es treballa amb la culata de relació de transmissió 1:7 i mantenint la encesa al punt mort superior, que són les característiques que es poden variar del motor de pràctiques.

### 3.3.5 Tub d'escapament i condicions aire

El tub d'escapament té una geometria que no es coneix ja que està soldat i no es pot veure el curs que té el tub a dins d'aquest, ni si varia de diàmetre. Per això s'ha simulat com si fos un tub recte de 290mm de llargada, un diàmetre de 15.5mm refrigerat per aire i un gruix de paret de 1.5mm. El material de que està construït és acer.

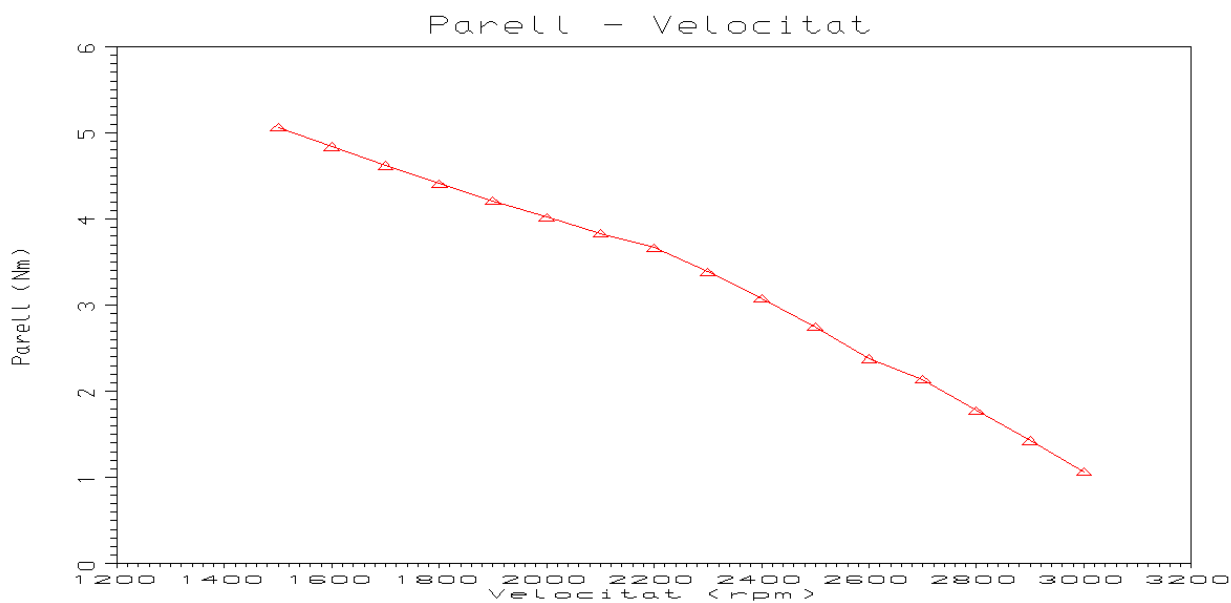
Les condicions de l'aire d'escapament del motor són d'un augment de la pressió absoluta a 1.2 bars i s'utilitza gasolina per a la combustió.

## 3.4 Resultats simulació

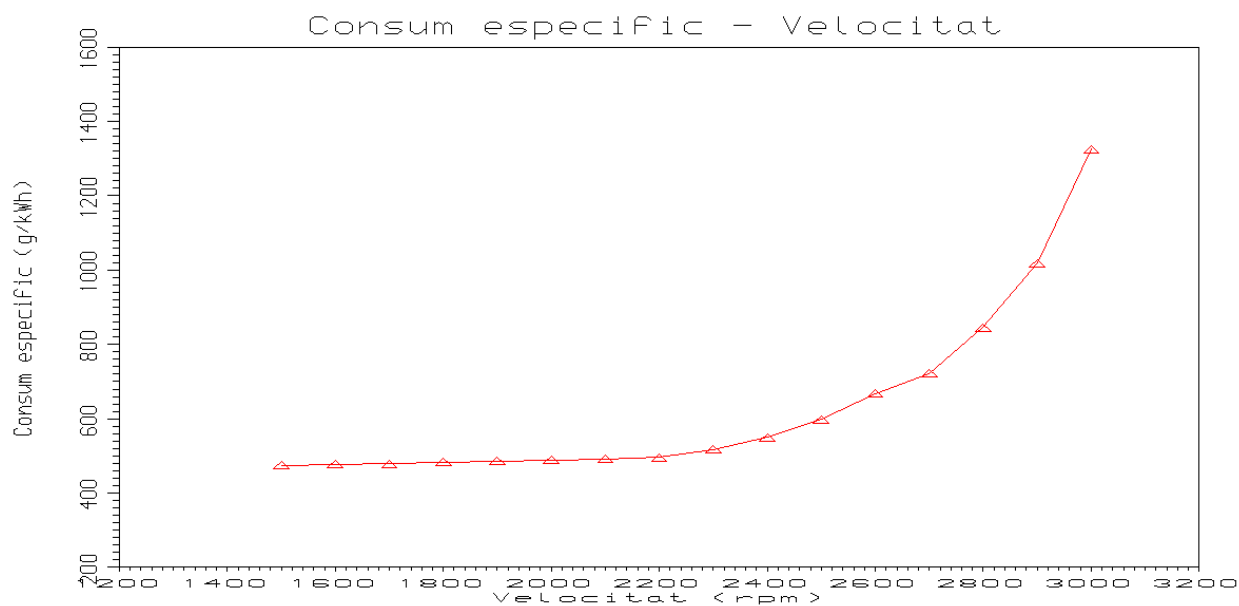


**Gràfic 3.3** Resultat Potència / Velocitat





**Gràfic 3.4** Resultat Parell / Velocitat



**Gràfic 3.5** Consum específic / Velocitat

En les gràfiques mostrades s'observen els resultats finals de la simulació, ja ajustada als valors reals del motor. Es mostren les corbes de potència, parell i consum específic depenent de les diverses velocitats que s'ha fet el mostreig.

## 4 PROVES EXPERIMENTALS

Per saber si la simulació realitzada del motor està ben feta s'ha de comparar amb les dades reals del motor. Per fer-ho s'utilitza un banc de proves i es realitzen una sèrie de tests per obtenir els paràmetres del motor i així poder-los comparar amb els de la simulació

### 4.1 Banc de proves utilitzat

#### 4.1.1 Funcionament banc proves

En el laboratori es disposa d'un banc de proves en motors de combustió. Aquest banc de proves conté un fre dinamomètric per realitzar testos de potència . Aquests frens són els encarregats de crear un parell resistent el qual proporciona la carga al motor, aquesta carga ha de ser variable per assajar les diverses condicions operatives del motor.

El fre dinamomètric utilitzat en el banc de proves és de tipus elèctric de corrents paràsites de 50kW de la marca ApiCom. Es tracta d'una màquina Eléctrica, on el seu principi de funcionament e basa en les corrents paràsites de Foucault o corrents de Eddy que es produeixen en les màquines elèctriques en el seu funcionament. Al contrari que en un motor elèctric on es desitja reduir el màxim aquetes corrents paràsites per elevar el seu rendiment, en un fre, potència i aprofita aquestes corrents, que es produeixen en l'estator, per oposar resistència al gir del eix. En efecte, el rotor es construeix dentat i al girar arrastrat pel motor produeix en l'estor unes correts que s'oposen al moviment sota la influència d'un camp magnètic generat per una bobina en l'estator i de característiques regulables pel control electrònic. El parell resistent és proporcional a la intensitat que travessa la bobina i la potència de frenada és el producte d'aquest parell per la velocitat de gir.

Tota la potència de frenada es transforma en calor, per tant és necessari refrigerar la màquina evacuant-lo per la circulació d'aigua en unes "camises" mecanitzades en l'estator. La carcassa o estator del fre està balancejada i seria arrastrada per d'influència magnètica del rotor en el seu gir si no fos perquè està impedita per la unió a la bancada a través d'un sensor d'esforç o cèl·lula de carrega extensiomètrica. Aquest sensor pot mesurar la força o parell amb que

s'intenta girar l'estator, que és el mateix que els que transmet el rotor, que s'anomena parell resistent i que és també el mateix que el parell del motor. El fre dinamomètric no sols oposa la resistència al gir, sinó que evacua el calor generat en el procés i mesurar el parell motor. Com a més és possible mesurar la velocitat de gir en el fre, que és la mateixa que el motor, es pot obtenir la potència mecànica del motor amb tan sols multiplicar el parell per el règim de gir en cada instant.

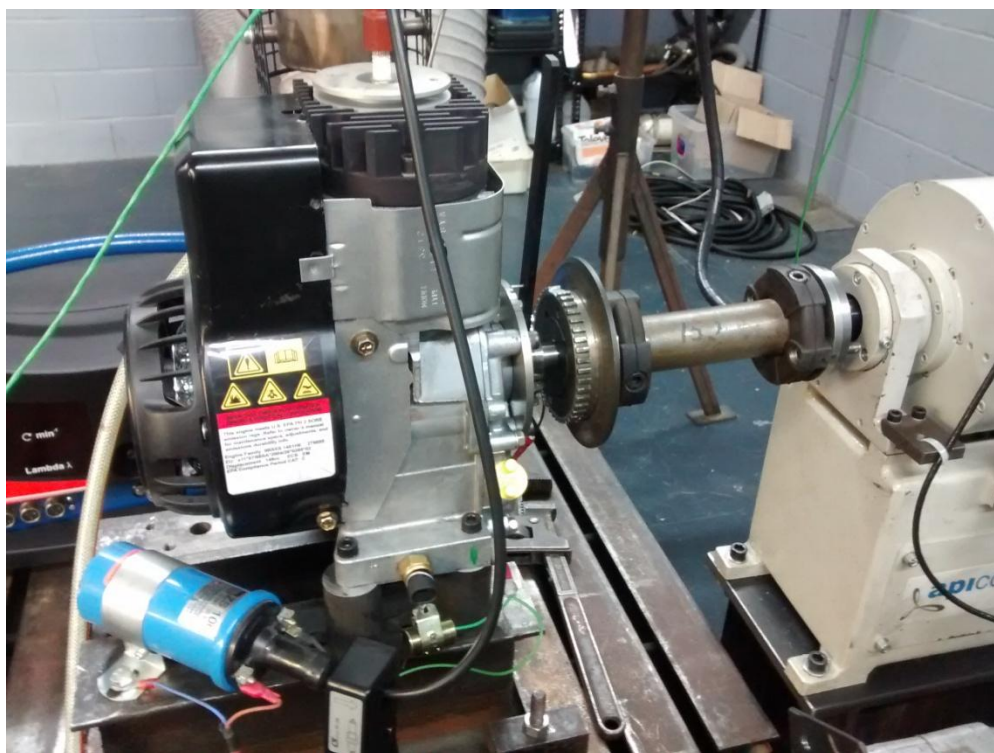
El control del parell resistent del fre es realitza electrònicament mitjançant un regulador P.I.D. (Proporcional, Integral, Derivatiu) que permet estabilitzar el conjunt fre-motor en condicions de parell i règim predeterminat, manualment o de forma automàtica comandant des de l'ordinador segons un cicle de treball programat per l'usuari. Els frens dinamomètrics elèctrics són fàcilment regulables y molt estables però per grans potències resulten molt cars.

#### **4.1.2 Parts banc proves**

Els bancs de proves estan compostos per diferents dos parts molt diferenciades, el dispositiu de frenada que s'acobla al motor i el de control. Aquestes dos parts estan separades ja que el monitor de control està situat a fora de l'espai on es realitzen les proves, per així s'aïlla l'operari dels sorolls, gasos i possibles problemes o accidents que puguin haver en el procés. La part pròpiament dita com banc de proves, el dispositiu de frenada, consta bàsicament dels següents elements:

- Una cimentació que absorbeixi les vibracions que es produeixen degut a l'existència en el motor de les forces d'inèrcia no equilibrades i dels corresponents moments resultants.
- Una bancada per fixar el motor de manera que quedi ben regulat en alçada i alineació amb el fre.
- Fre dinamomètric que absorbeixi la potència desenvolupada pel motor, oferint una resistència al gir d'aquest, i que estigui connectat a la part de control.
- Transmissió que permeti la connexió fre-motor amb una certa elasticitat i capacitat d'absorbir desalineacions. La transmissió conté una junta universal de ròtula tapada amb un tub de certa elasticitat per evitar atrapaments en el gir.

- Sistema d'alimentació del combustible per el motor.
- Red d'aigua. Els frens dinamomètrics transformen tota l'energia mecànica que reben del motor en calor, i aquest és eliminat per el sistema de refrigeració del fre que és mitjançant un proveïment continu d'aigua.
- Sistema d'evacuació dels gasos d'escapament, que són enviats a l'atmosfera després d'haver passat per un silenciador.
- Sistema de ventilació de la sala. Ha d'evitar el sobreescalfament del local per la radiació de calor del motor i la temperatura dels gasos d'escapament.



**Figura 4.1** Acoblament motor al banc de proves

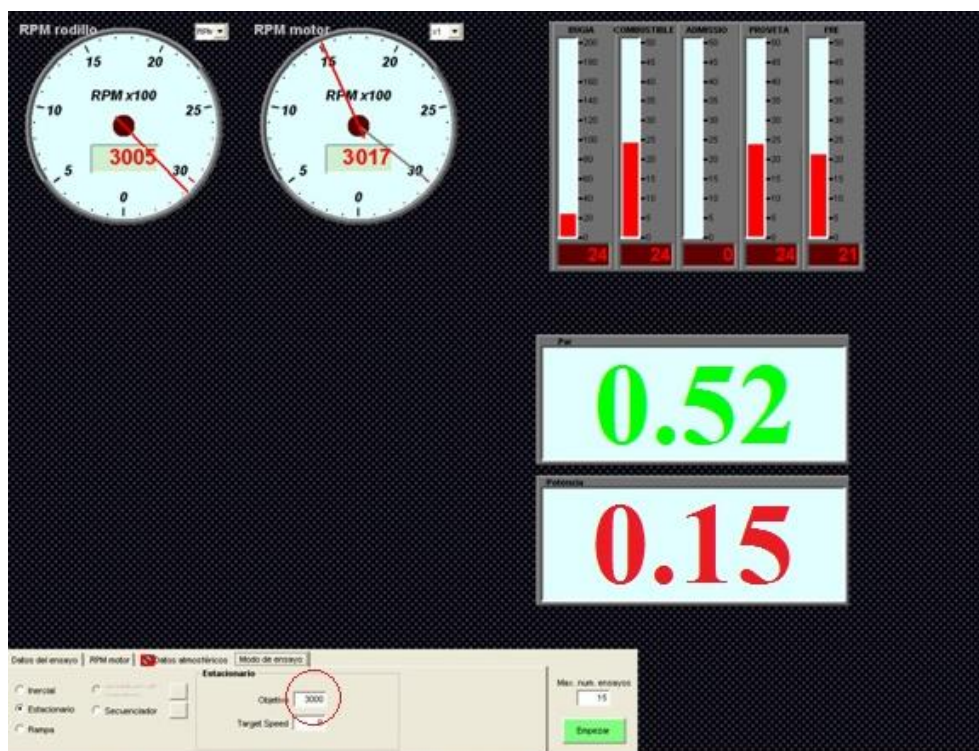
En la figura 4.1 s'observa l'interior de la sala de proves, on es té el motor fixat a la bancada i al fre dinamomètric preparat per l'adquisició de dades experimentals.

D'altra banda es disposa d'un pupitre a l'exterior de la sala aïllada. Aquest pupitre d'instruments conté els òrgans de posta en marxa i govern del motor i fre, així com també els instruments de control i registre. Aquest control es realitza amb el programa vinculat al banc de proves i es visualitza gràcies a una pantalla en el pupitre.

## 4.2 Adquisició dades experimentals

Per realitzar els assajos de potència del motor, primer l'hem d'assegurar a la bancada de manera que no es pugi moure per culpa de les vibracions o moments d'inèrcia, i fixar-lo al fre dinamomètric de manera que quedi totalment centrat i a la mateixa alçada. També s'ha de connectar l'escapament a l'extractor de sortida de gasos i ja es pot encendre per començar a obtenir les dades. L'adquisició es realitza amb el carburador totalment obert, és a dir en plena càrrega.

L'adquisició de les prestacions del motor es realitza amb el programa del banc de proves. Aquest programa ens permet regular la velocitat del motor aplicant-li una càrrega determinada i ens mostra la potència i el parell que transmet el motor en aquell moment. Així per treure les gràfiques anem anotant els valors dels resultats per les velocitats desitjades.



**Figura 4.2** visualització dades motor en temps real amb el programa del banc de proves

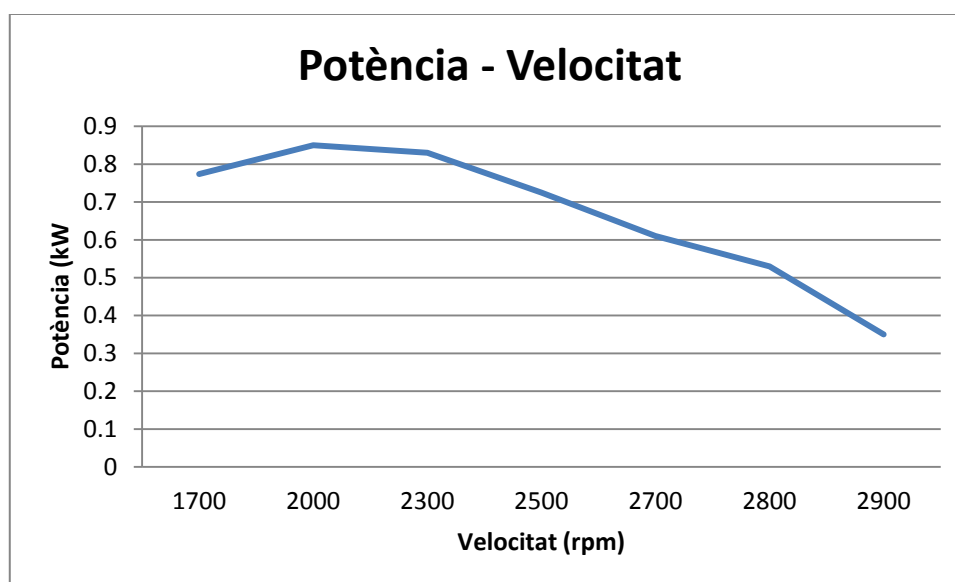
En la figura 4.2 es pot observar el programa en el que es treballa amb el banc de potència. En petit i encerclat en vermell és el valor objectiu de velocitat que volem que vagi el nostre motor i a dalt a la dreta ens marca la velocitat real que va el fre i el motor. A la dreta ens mostra els

valors de parell, en color verd, i potència, en color vermell. A la part superior dreta tenim diferents valors per assegurar que s'està realitzant correctament l'adquisició de dades, com pot ser el voltatge de la bugia, el combustible que ens queda o el bon funcionament del fre.

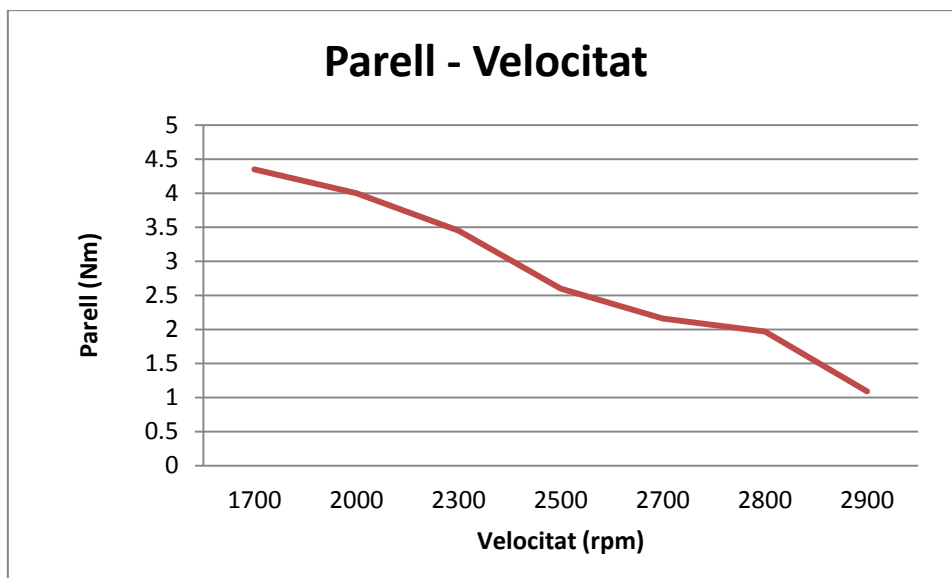
Les velocitats sempre tenen una petita variació ja que el motor no funciona molt fi i fa que no s'acabi d'estabilitzar la velocitat en el valor objectiu, això produeix que els valor de potència també tinguin una mica de tolerància. Per cada velocitat de mostreig s'ha de variar una mica la relació d'aire/combustible de manera que el motor treballi el millor possible. Per això per cada velocitat es manté un temps abans de anotar el valor perquè el motor s'estabilitzi i proporcioni la mesura el més correcte possible. Per aquesta qüestió s'agafen mesures de 1700 a 3000 rpm , ja que són les velocitats més estables per l'adquisició de dades. Aquest és el rang on el motor pot treballar, encara que als extrems en males condicions, però si sortim d'aquest rang el motor es para quan li posem la càrrega del fre, o els valors de mesura són molt inestables.

### 4.3 Resultats experimentals

Amb els valors de mesures experimentals podem treure les següents gràfiques de prestacions del motor.



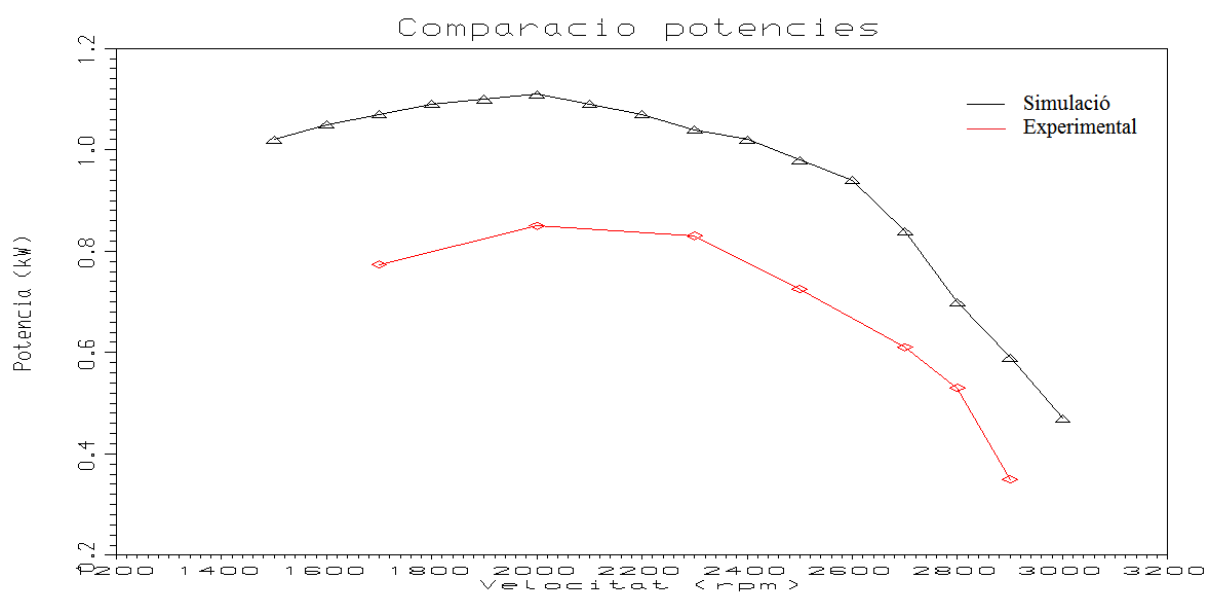
**Gràfic 4.1** Potència en funció de la velocitat



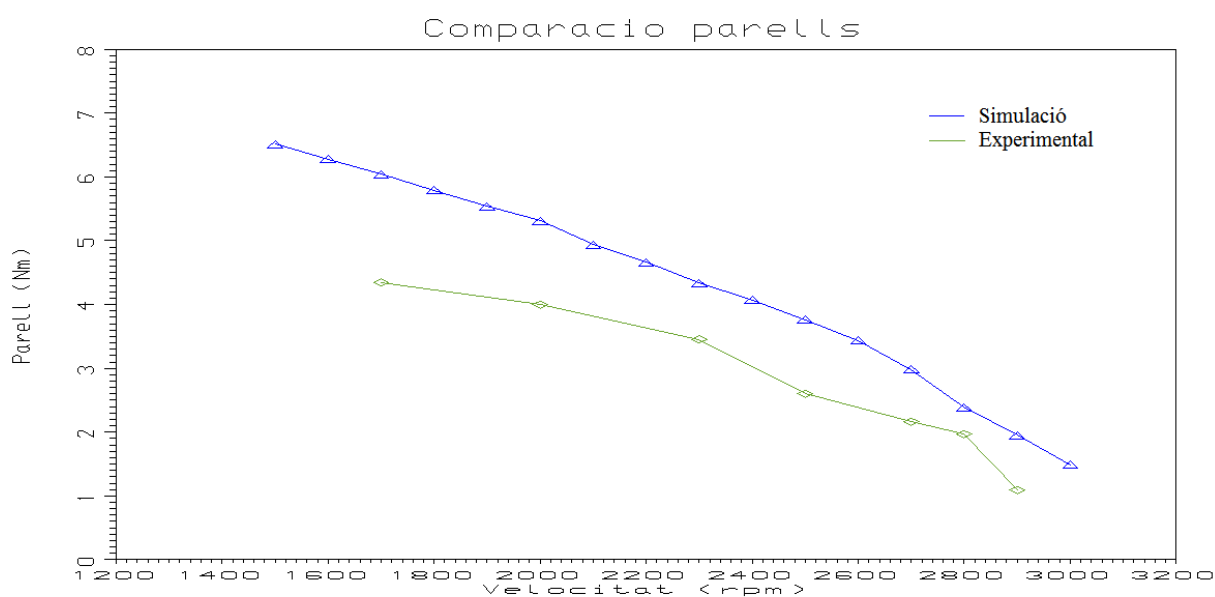
**Gràfic 4.1** Parell en funció de la velocitat

## 5 AJUST SIMULACIÓ

En la primera simulació s'obtenen uns resultats que s'han de comparar amb els experimentals per poder ajustar els factors que no s'han pogut obtenir, ja sigui perquè no són geomètrics o perquè no es disposa de la suficient informació. Per això al principi s'han introduït valors estàndards per motors de combustió interna que s'hauran d'ajustar a partir de la diferència amb els resultats experimentals. En les següents gràfiques es pot visualitzar aquesta diferència.



**Gràfic 5.1** Comparació de les potències simulació inicial



**Gràfic 5.2** Comparació dels parells simulació inicial



En els gràfics 5.1 i 5.2 es pot observar que la nostre simulació dona unes prestacions, tant de potència com de parell, superiors als reals obtinguts en el banc de proves. S'ha d'ajustar la simulació reduint els rendiments, ja que les simulacions tendeix a donar rendiments més alts als reals. Com que la forma de les gràfiques surt força bé, es treballa sobre dos factors principalment, el coeficient de descàrrega del carburador que s'ha suposat massa elevat i també pot servir per rectificar la possible variació en la relació aire/combustible. També s'actua sobre el rendiment mecànic, com per exemple les pèrdues de fricció, que és inferior al que s'esperava o l'eficiència de la combustió. En la taula 5.1 es mostren els valors que s'han canviat.

	Valor anterior	Valor corregit
<b>Coeficient descàrrega carburador</b>	0.55	0.36
<b>Eficiència mecànica per fricció</b>	1	0.70
<b>Eficiència de la combustió</b>	1	0.95
<b>Llargada tub escapament</b>	200	290

**Taula 5.1** Correccions simulació

On:

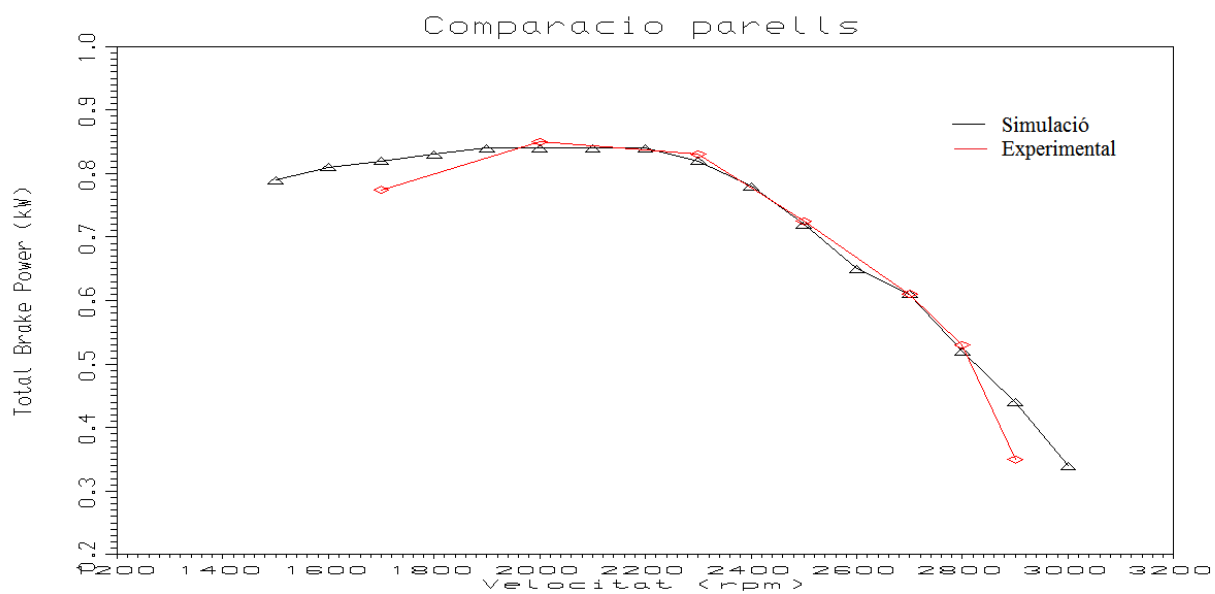
Coeficient descàrrega carburador – mesura la eficiència de flux del carburador (coef. unitari)

Eficiència mecànica per fricció – mesura el rendiment mecànic per pèrdues de fricció (coef unitari)

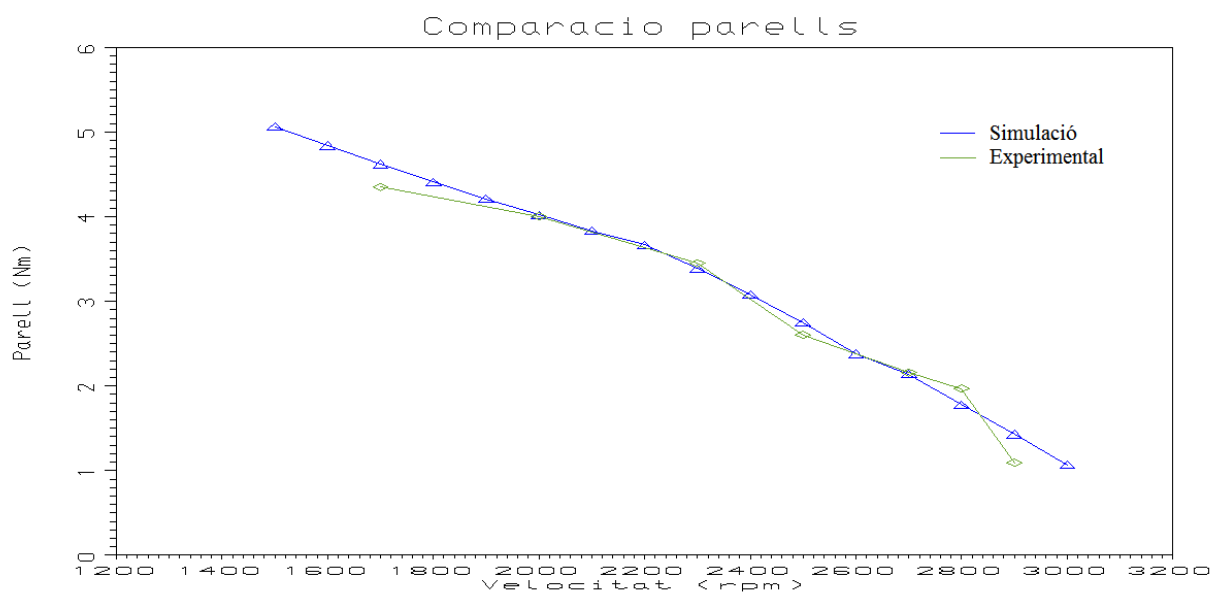
Eficiència de la combustió – mesura el rendiment de la combustió (coef. unitari)

Llargada tub escapament – és la llargada del tub d'escapament (mm)

Una vegada s'han obtingut els valors més adequats els factors sobre els que es treballa s'aconsegueix la simulació final on les prestacions són molt semblants a les reals o experimentals, com s'observa en les figures 5.3 i 5.4



**Gràfic 5.3** Comparació de les potències simulació final



**Gràfic 5.4** Comparació de les potències simulació final

## 6 POSSIBLES PRÀCTIQUES

La simulació que s'ha realitzat està orientada a encloure's en les pràctiques de motor tèrmics de combustió interna del Grau en enginyeria mecànica de la UdG, per millorar l'aprenentatge. Les pràctiques existents no treballen amb cap tipus de simulació per això en els següents punts es presenten diverses possibles apartats que puguin conformar les noves pràctiques amb el banc de proves.

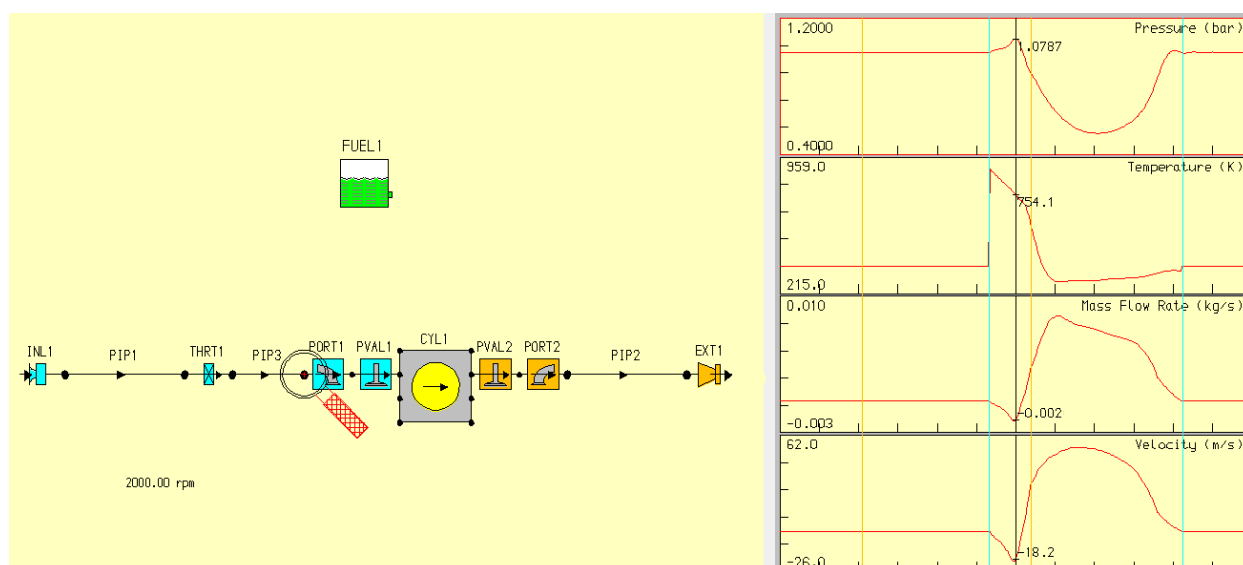
S'intenta utilitzar el màxim possible el motor de les pràctiques ja que ens permet fer canvis, com el de la relació de compressió o l'encesa, amb molta facilitat i alhora estalviar temps en l'adquisició de dades una vegada s'estan realitzant les pràctiques. També s'intenta aprofundir més en les aplicacions de simulació del programa informàtic.

### 6.1 Entorn visualització Lotus

Es presenta l'aplicació del Lotus que permet un entorn de visualització on es mostren diverses característiques del motor, durant tot el cicle, per les diferents velocitat que s'han realitzat els mostrejos. Es poden observar les gràfiques de la pressió, temperatura, flux màssic i velocitat del flux d'aire que passa per els sistema.

Es fixa una velocitat de les que s'han marcat per l'obtenció de les dades de la simulació i es poden visualitzar els punt anteriors i posteriors de cada element del nostre esquema de simulació del motor.

En la figura 6.1 es poden observar les dades per una velocitat de 2000 rpm i el punt estudiat és just en abans del conducte d'admissió del motor. No ens permet estudiar el punt entre el conducte d'admissió i la vàlvula.

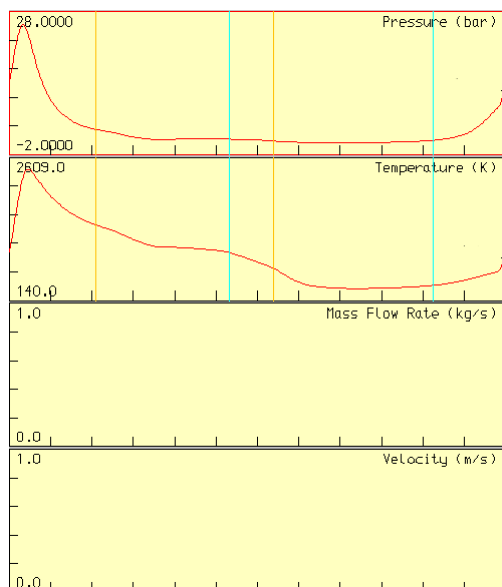


**Figura 6.1** Visualització prestacions en l'entrada de l'admissió a 2000rpm

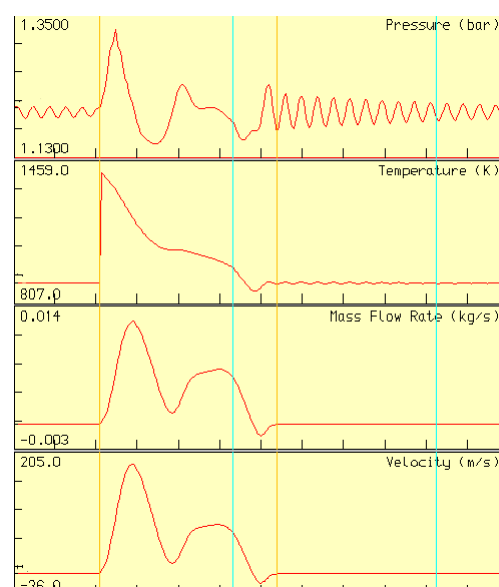
Les dues línies verticals de color taronja indiquen la obertura i tancament de la vàlvula d'escapament, respectivament d'esquerra a dreta. En canvi les línies de color blau representen la obertura i el tancament de la vàlvula d'admissió, també en direcció d'esquerra a dreta. Es poden veure els resultats concrets de cada punt de les gràfiques movent el cursor per sobre d'elles, i si es vol, es pot mostrar el valor mig en cada gràfica.

Aquests valors són molt interessants perquè permeten que l'alumne es faci una idea del que passa en cada punt del motor, en aquest cas en l'admissió, en la realització d'un cicle per part del motor. En les corbes es poden apreciar millor els períodes d'obertura i tancament de la vàlvula d'admissió pel que fa al cilindre. A l'esquerra de la primera línia blava i a la dreta de la segona línia blava és el període en que la vàlvula d'admissió està tancada, entre les dos línies l'admissió està oberta i és on es visualitzen més variacions en les gràfiques.

Es pot apreciar un gran augment de la temperatura a la vàlvula d'admissió en el període de solapament que estan obertes les dues vàlvules. Això és causat pel gas calent que flueix cap enrere des del cilindre en el tub d'admissió durant aquest període, com es pot veure a partir de valors negatius en els diagrames de flux i velocitat de massa que indiquen que l'aire va enrere.



**Gràfic 6.1** Dades interior cilindre a 2000rpm



**Gràfic 6.2** Dades escapament a 2000rpm

En el gràfic 6.1 es mostra la variació de la temperatura i la pressió a dins del cilindre a una velocitat de 2000rpm. S'observa el gran augment de pressió en la compressió i després una gran baixada d'aquesta una vegada hi hagué la combustió i l'expansió dels gasos, la temperatura va relacionada a la pressió amb les mateixes fases.

En el gràfic 6.2 acabem de visualitzar la part que ens falta del procés en el motor, és a dir el punt després del conducte d'escapament i anterior al tub d'escapament. En aquest cas el que queda a la part esquerra de la primera línia groga i a la part dreta de la segona línia groga és el període durant el qual la vàlvula d'escapament està tancada. En aquest cas quan la vàlvula està tancada els valors es mantenen estables menys el de pressió, això és degut a que seguidament bé el tub d'escapament que dona a l'exterior. El motor produeix unes ones de pressió que arriben fins al final del tub i retornen al cilindre, i conformen aquestes pujades i baixades de pressió.

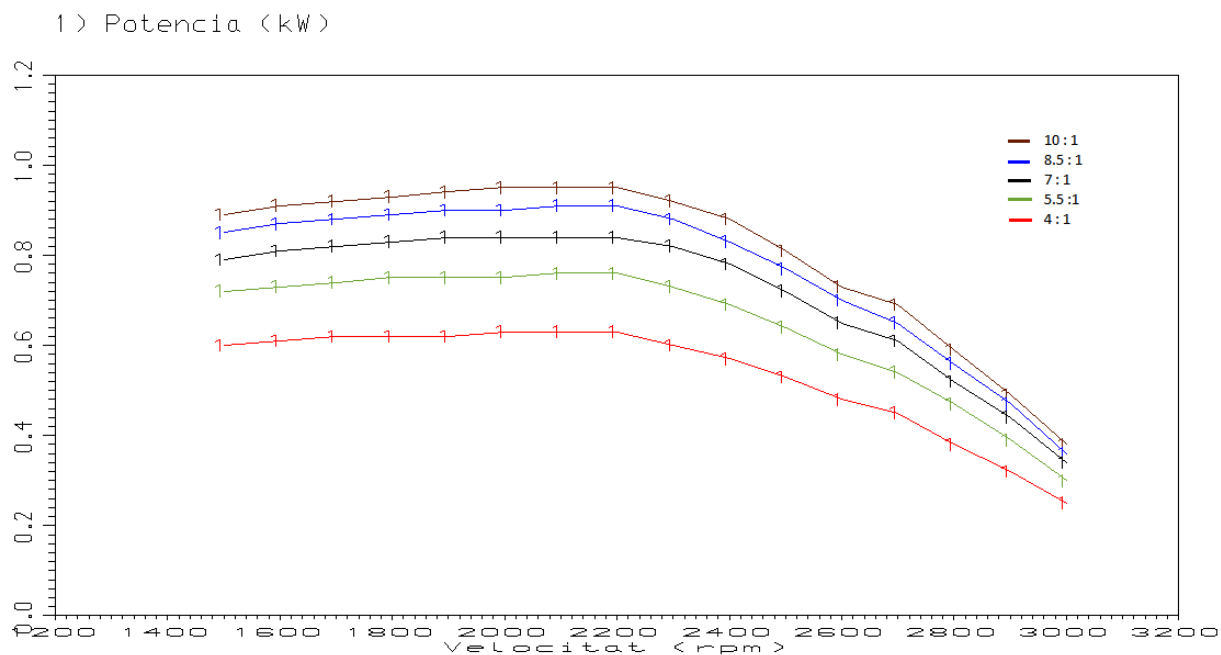
Pel que fa a la temperatura es mostra un gran augment, just en el punt d'obertura de la vàlvula d'escapament, degut a l'expulsió dels gasos d'escapament a gran temperatura. Aquesta temperatura es va reduint fins que la vàlvula queda tancada i s'estabilitza durant el període de tancament. També es pot apreciar un pic de baixada de la temperatura quan les dues vàlvules queden obertes. En aquest cas, com s'havia vist amb la vàlvula d'admissió, és el gas d'escapament que flueix cap al tub d'admissió com e mostra en els diagrames de flux i velocitat.

En aquest cas hem estudiat els punts de l'esquema de la simulació al voltant del cilindre però també es poden estudiar els extrems, ja siguin a l'admissió o l'escapament, i els del voltant del carburador. Tots aquests punts es poden visualitzar per cada una de les velocitats de mostreig amb que s'ha realitzat la simulació i així poder veure com varien els diagrames en cada punt i per cada velocitat.

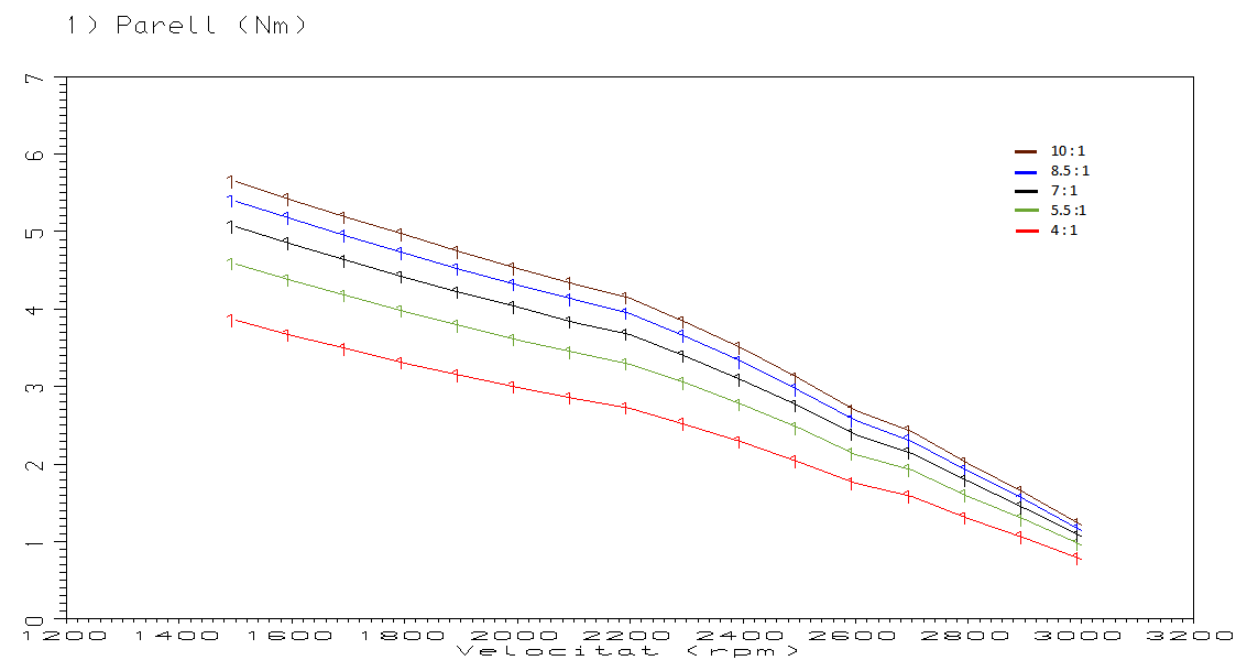
## 6.2 Variació cambres combustió

Aprofitant la facilitat en que es pot variar la relació de compressió del motor de pràctiques es pot realitzar la prova de cada una de les diferents cambres de combustió de que es disposa. Així es pot visualitzar com varia el comportament del motor amb les diferents relacions de compressió de 10:1 , 8.5:1 , 7:1 , 5:1 i 4:1 . Aquest apartat es pot realitzar tan en la part pràctica canviant les relacions de les culates i assajant cada una, com amb el programa i realitzant les diferents simulacions.

En les gràfiques següents es pot veure com el comportament del motor és el mateix en cada relació de compressió però com més alta sigui aquesta més s'incrementen els valors de les prestacions. Això concorda amb la teoria on demostra que la relació de combustió defineix el rendiment tèrmic del motor de combustió interna, és a dir l'aprofitament de l'energia del combustible. Per tant el rendiment augmenta si la compressió augmenta.



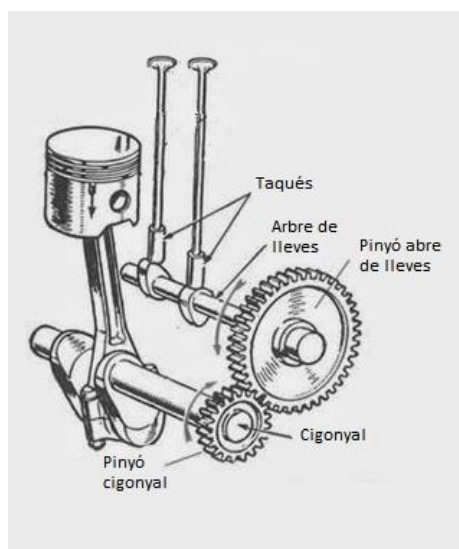
**Gràfica 6.3** Potència en funció de la velocitat en les diverses relacions de compressió



**Gràfica 6.4** Parell en funció de la velocitat en les diverses relacions de compressió

### 6.3 Variació diagrama distribució vàlvules

Una altre possible apartat de la pràctica sobre banc de potència pot ser la de variar el diagrama de distribució de les vàlvules del motor, avançant o retardant l'obertura i el tancament de les vàlvules. El motor que s'utilitza permet moure, amb certa facilitat, tot el conjunt de distribució de les vàlvules en funció dels graus del cigonyal. Aquest fet es produeix perquè l'arbre de lleves està sincronitzat amb el cigonyal a partir d'una relació de transmissió en un engranatge directe com es mostra en la figura 6.2. i 6.3 amb una relació de 1:2, ja que per cada volta que fa l'arbre de lleves n'ha de fer dues el cigonyal.



**Figura 6.3** Sincronització arbre de lleves, extret de la mateixa font que la figura 6.2

**Figura 6.2** Esquema d'accionament de les lleves extret de la pàgina web [www.laspalmastecnologica.blogspot.com.es](http://www.laspalmastecnologica.blogspot.com.es)

Per realitzar la variació del sistema de distribució de les vàlvules del motor s'ha de desincronitzar l'engranatge que uneix el cigonyal i l'arbre de lleves. Per cada dent que variem, de desfasament, mourà el sistema avançant-lo o retrocedint-lo depenent en quina direcció realitzem l'operació. Per saber quant es desfasa per cada dent que es varia s'ha de tenir en compte que cada cicle complet consta de dos carreres del cilindre, és a dir dos voltes al cigonyal o  $720^\circ$  d'aquest, però només una volta de l'arbre de lleves.



Per tant si es vol posar la variació de graus de cada dent per el moviment del cigonyal, s'ha de dividir aquests 720°, i no els 360° d'una sola volta de l'arbre de lleves, entre el número de dents. Per tant utilitzem la equació 4:

$$A = \frac{720}{z} \quad (\text{Eq.4})$$

On:

A = avanç del cigonyal per cada dent del pinyó de l'arbre de lleves (°)

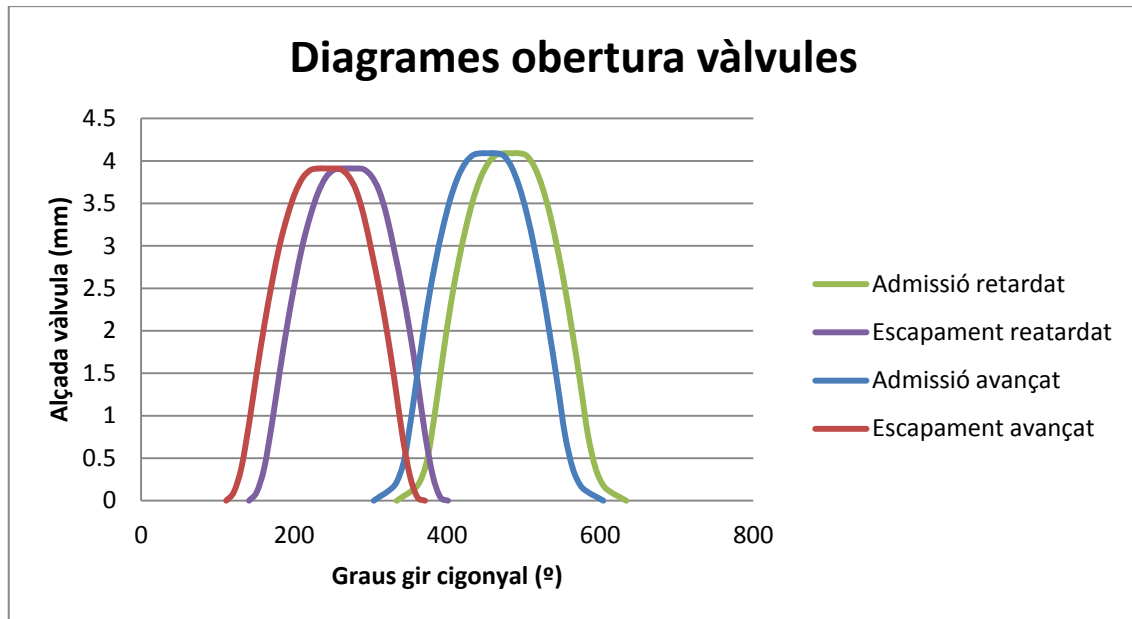
Z = nº de dents de l'arbre de lleves

El pinyó de l'arbre de lleves disposa de 48 dents i per tant s'obté que per cada dent que movent de la sincronització del engranatges el diagrama d'obertura es mou 15° respecte el cicle complet del cigonyal.

Es proposa veure com varien les prestacions desplaçant la unió dos dents en cada direcció, és a dir avançant i retrocedint el diagrama de les vàlvules 30° respecte la distribució actual. En el sistema avançat la vàlvula d'admissió s'obrirà 71° abans del PMS i es tancarà 45° després del PMI, pel que fa a la vàlvula d'escapament s'obrirà 84° abans del PMI i es tancarà 7° abans del PMS.

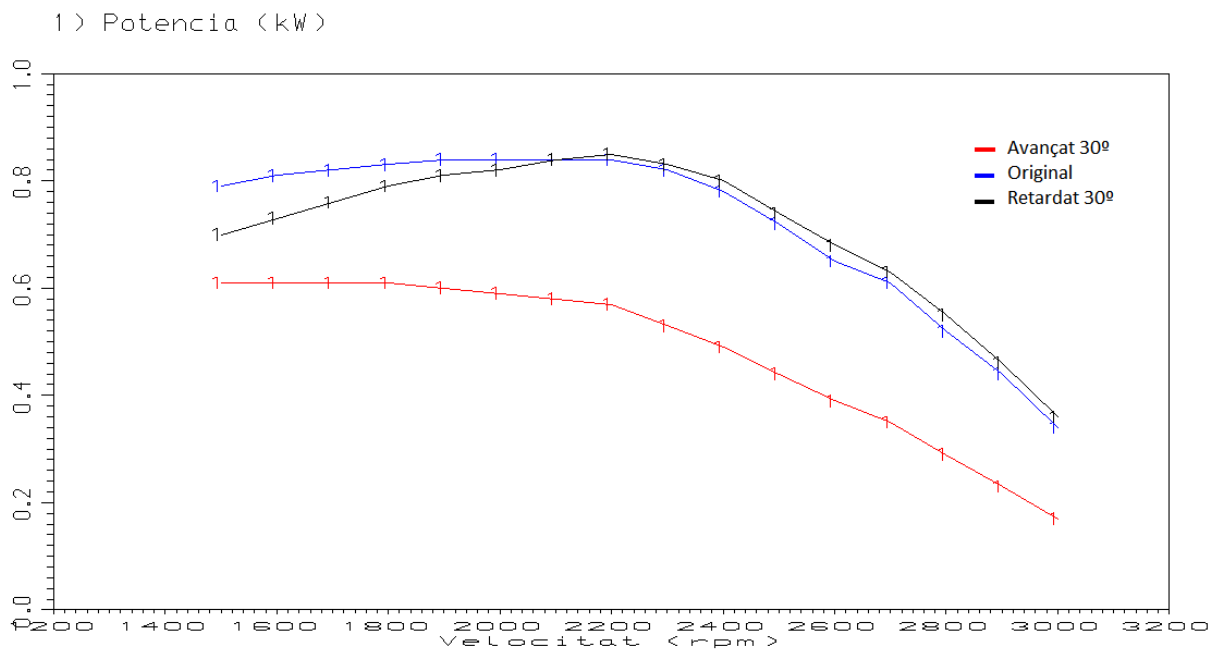
En canvi en el sistema retardat avançat la vàlvula d'admissió s'obrirà 11° abans del PMS i es tancarà 105° després del PMI, pel que fa a la vàlvula d'escapament s'obrirà 24° abans del PMI i es tancarà 53° després del PMS.

Podem observar els dos diagrames d'obertura de les vàlvules en la següent gràfica 6.5. No es representa l'actual posició de les vàlvules perquè sinó el gràfic seria difícil de visualitzar

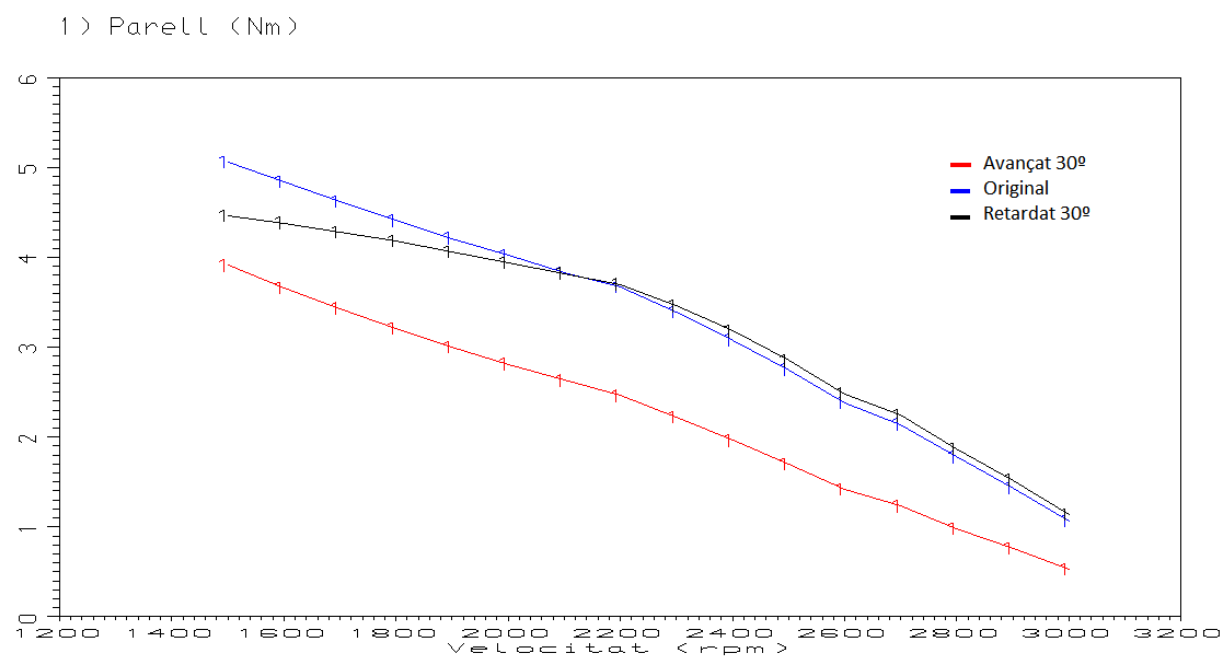


**Gràfica 6.5** Diagrama d'obertura de les vàlvules amb avanç i retràs

Amb els dos sistemes de vàlvules modificats es busquen les prestacions del motor de cada un i es comparen amb el reglatge original com s'observa en les gràfiques 6.6 i 6.7



**Gràfica 6.6** diferents potències segons obertures de les vàlvules



**Gràfica 6.7** Diferents parells segons obertures de les vàlvules

En els resultats obtinguts es pot veure que el reglatge original és el més òptim ja que és el que ens dona prestacions més altes en totes les velocitats. El sistema retardat ens dona unes prestacions semblants i fins i tot una mica millors a partir de 2200rpm però a l'inici són més baixes, en canvi en el sistema avançat els resultats són clarament més baixos.

## 7 RESUM PRESSUPOST

Les despeses derivades en concepte de disseny i desenvolupament del present projecte són de **5354,25 € (CIN MIL TRES-CENTS CINQUANTA -QUATRE euros amb VINT-I-CINC cèncims)**. El pressupost detallat es pot trobar en el document PRESSUPOST.

## 8 CONCLUSIONS

- S'ha realitzat la simulació del motor monocilíndric de 4T de que es disposa en el laboratori de la universitat, amb el programa LotusEngine®. Per realitzar aquesta simulació s'han recopilat totes les dades geomètriques, fluidodinàmiques i de distribució. Obtenint uns resultats, una vegada ajustats, molt semblants a les prestacions reals que dona el motor de pràctiques. Per tant s'ha obtingut una bona simulació fidedigne a la realitat.
- Tot i que la simulació és correcte, sempre es pot millorar obtenint mesures reals de paràmetres que s'han suposat, com podria ser la geometria exacte del tub d'escapament o les dades de combustió real del motor
- En la part pràctica s'ha utilitzat el banc de proves del laboratori de màquines i motors tèrmic, fen servir principalment el fre dinamomètric. Hi ha hagut alguns problemes en l'adquisició de dades ja que s'ha hagut d'anar regulant una mica el carburador per cada velocitat perquè s'estabilitzés i marqués la velocitat objectiu que es volia mesurar.
- En aquest apartat es poden realitzar diverses millores si s'incorpora aquesta simulació en les pràctiques. S'hauria de fer una posta a punt en el carburador per facilitar les mesures. També es podria afegir un mesurador de gasos per obtenir la relació d'aire i combustible dels gasos d'escapament, o un mesurador de combustible per mesurar el consum del motor.
- S'ha proposat diverses opcions o possibles apartats per realitzar les noves pràctiques amb el motor del laboratori en el banc de proves. Aquest apartats s'han centrat en les opcions d'aprenentatge que permet el programa de simulació i en les diferent modificacions que es poden fer en el motor de forma fàcil i ràpida.

## 9 RELACIÓ DE DOCUMENTS

La relació de documents que formen aquest projecte és:

### DOCUMENT N°1 : MEMÒRIA I ANNEXOS

- Annex A. Funcionament motor 4T Otto
- Annex B. Manual motor pràctiques
- Annex C. Manual LotusEngine

### DOCUMENT N°2 : PLÀNOLS

### DOCUMENT N°3 : PRESSUPOST

## 10 BIBLIOGRAFIA

1. TECNER. Frenos dinamomètricos elèctricos. ([http://www.tecner.com/PyS\\_FD\\_Electr\\_DescT.php](http://www.tecner.com/PyS_FD_Electr_DescT.php), 10 agost 2015)
2. SAENZ. Catálogo de productos, flujometros. ([http://www.saenzdynos.com.ar/content/flujometros\\_d.php](http://www.saenzdynos.com.ar/content/flujometros_d.php), 10 agost 2015)
3. DANI MEGANOBOY. Motores de combustion elementos móviles, 2014. (<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-distribucion.htm>, 28 juliol 2015)
4. NELSON GUARDIAMOTORES. Calado y puesta a punto distribucion. Electronica y mecanica. (<http://laspalmastecnologica.blogspot.com.es/2015/03/motores-tema-45-calado-y-puesta-punto.html>, 10 agost 2015)
5. CARLOS NUÑEZ. Bancos para la obtencion de potencia. (<http://mepuedeservir.es/wp2/wp-content/uploads/2012/03/3.-BANCOS-PARA-MEDIDA-DE-POTENCIA-Comprim..pdf>, 20 juliol 2015)
6. JUAN PABLO ALIANAK, JUAN TOFONI. Simulación Computacional de Motores Pluricilindricos de Combustión Interna. Cátedra Ingenieria del automóvil. Escuela de Ingeieria Mecánica Universidad Nacional de Rosario. ([http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia1/mecanica/Automotores/PROYECTO\\_FINAL\\_COMPLETO\\_ALIANAK.pdf](http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia1/mecanica/Automotores/PROYECTO_FINAL_COMPLETO_ALIANAK.pdf), 15 agost 2015)
7. LOTUS CARS LTD. Getting Started Using Lotus Engine Simulation.Tutorials.2001
8. LOTUS CARS LTD. Program Help document.2001
9. SAENZ. Manual de operación flujómetro D-600, Vicoriano Montes 3854, CP 7600, Mar del Plata, Argentina. 2014
10. GUNT HAMBURG. Experiment Instruction CT 152 Four-Stroke Petrol

# ANNEXOS

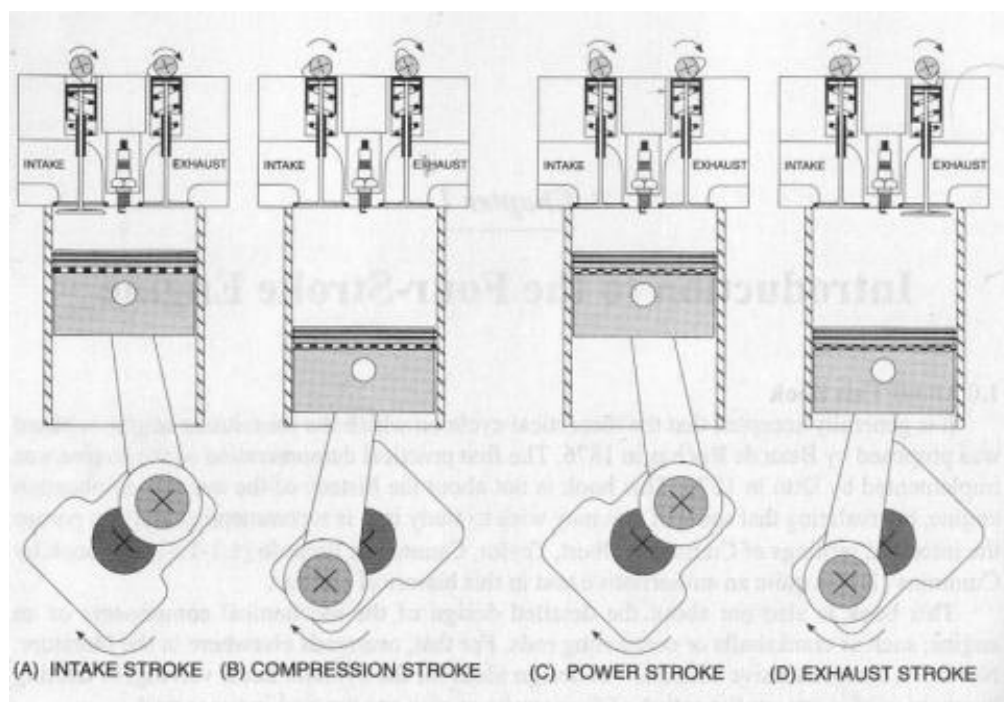


## ANNEX A. FUNCIONAMENT MOTOR 4T OTTO

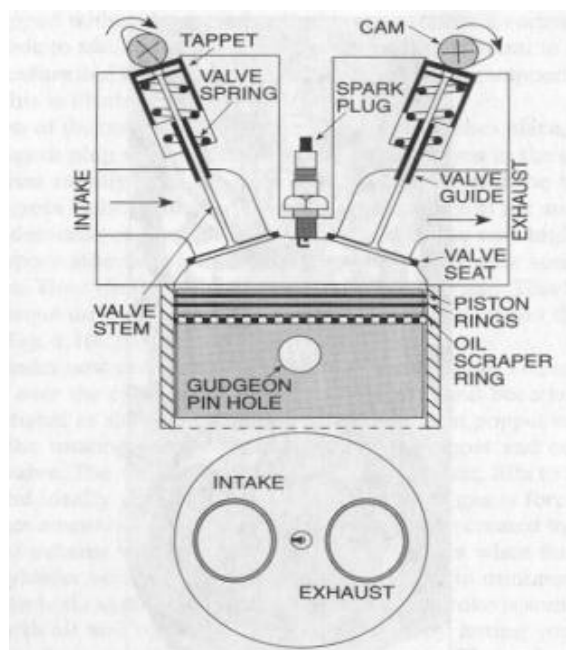
Per la realització d'aquest Annex s'utilitza material de la càtedra sobre Simulació Computacional de Motors Pluricilíndrics de Combustió interna, escrita per Juan Pablo Alianaki Juan Tofoni. Totes les figures que s'utilitzen estan extretes d'aquest document.

### A.1 Introducció al motor 4 temps

El motor 4 temps és mostrat en la figura A1, amb les diferents fases d'omplert i buidat dels cilindres. La figura mostra el motor amb una bugia d'encesa, amb accés al cilindre controlat per vàlvules comandades per lleves, botadors i ressorts de vàlvules. Les definicions de cada element estan mostrades en la figura A2. El cilindre conté el pistó amb 3 ranures efectuades per allotjar 2 aros de compressió i un tercer aro sota, que elimina l'excés d'oli de la paret del cilindre. El moviment del pistó està controlat per un cigonyal amb una biela que uneix aquest amb el pistó, a través d'un pern.

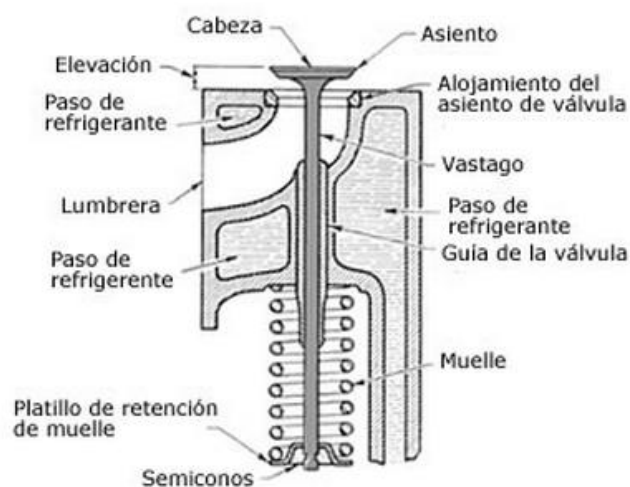


*Figura A1 Carreres d'un cicle en un motor 4t*



**Figura A2** *Detalls del motor*

El motor de que es disposa utilitza un sistema de distribució de vàlvules SV o de vàlvules laterals representat en la figura inferior A3, en els que es pot veure que la vàlvula ocupa una posició lateral al cilindre, és a dir, la vàlvula està allotjada en el bloc. El maneig d'aquesta vàlvula s'efectua amb l'arbre de lleves situat al bloc motor. Aquest sistema de distribució no s'utilitza des de fa temps ja que les vàlvules no estan col·locades en la culata sinó en el bloc motor, el que provoca que la càmera de compressió hagi de ser major i la mida del caps de les vàlvules es vegi limitat pel poc espai de que es disposa



**Figura A3** *Vàlvula allotjada al bloc motor*

És clar de la figura A1, que el màxim moviment del pistó dins el cilindre, és a dir, la carrera del pistó, és simplement, cap a dalt o cap a baix, desplaçant-se al llarg del gir del cigonyal. El màxim moviment del pistó crea un volum desplaçat al  $V_{sv}$ , i es veu que el pistó s'atura a prop de la tapa de cilindres creant un volum mínim en el qual la combustió de l'aire atrapat i el combustible tenen lloc. Aquest volum mínim és definit com a volum nociu  $V_{cv}$ . Quan el pistó arriba a la part més alta, és a dir aconsegueix el mínim volum, es diu que el pistó està en el seu punt mort superior PMS i quan arriba a la zona més baixa o de màxim volum, es troba en el seu punt mort inferior PMI.

### A.1.1 Etapes del cicle Otto

1 - *Admissió*: l'aire es induït al cilindre, a través de la vàlvula, per la carrera d'admissió des de el PMS al PMI, incrementant el volum des del mínim al màxim. Això s'aprecia en la figura A1a. La vàlvula d'admissió és comandada per el moviment de rotació de l'arbre de lleves. Així quant el pistó es mou des de el PMS al PMI en la carrera d'admissió, el cilindre s'emplena, idealment amb una quantitat de massa d'aire equivalent al volum desplaçat a la pressió i temperatura atmosfèrica.

2 – *Compressió*: l'aire ara atrapat dins el cilindre experimenta una compressió quan el pistó es mou des del PMI al PMS. El volum decreix des del màxim al mínim, és a dir des de  $V_{bdc}$  a  $V_{tdc}$ . La pressió i la temperatura de l'aire s'eleva i el combustible atrapat amb l'aire es vaporitza. Això s'il·lustra en la figura A1b. En el final de la carrera de compressió, té lloc la combustió, iniciada per una espurna provinent de la bugia localitzada generalment entre les vàlvules en la tap dels cilindres. La pressió llavors s'eleva ràpidament a desenes de atm. I la temperatura s'eleva a centenars de graus Celsius. Idealment això té lloc en el PMS i instantàneament.

3 – *Expansió*: el pistó ara descendeix en la carrera de potència, mogut per una alta diferència de pressió entre la cara superior del pistó en contacte amb la càmera de combustió i la inferior amb contacte amb la zona baixa del motor a la pressió atmosfèrica. El volum del cilindre va des de el  $V_{tdc}$  a  $V_{bdc}$ . Aquesta força genera un parell en el cigonyal figura A1c

4 – *Escapament*: com el cilindre ara conté els producte de la combustió, és a dir, gas de l'escapament, que ha de ser remoure per el pròxim cicle, una carrera d'escapament ha d'iniciar-se com mostra la figura A1d. La vàlvula d'escapament és comandada al igual que la d'admissió per un arbre de lleves. Aquesta vàlvula idealment s'obra en el PMI, arriba a la seva màxima alçada al voltant de la meitat de la carrera i es tanca en el PMS. El gas d'escapament

està forçat a sortir quan el pistó puja a través de l'àrea anular descoberta per la vàlvula quedant el cilindre "net" per començar el nou cicle.

## A.2 Cicle Otto

Un gràfic que mostra de manera clara el funcionament termodinàmic del motor és un diagrama pressió-volum. Aquest gràfic és sol anomenar cicle indicat del motor. En la figura A4 es veu un cicle indicat ideal d'un motor d'encesa per guspira, on s'aprecien les diferents etapes agafant el cicle com tancat (sense tenir en compte les carreres d'admissió i escapament). En l'anàlisi del cicle es duen a terme algunes simplificacions que en el motor real no succeeixen. Algunes d'elles son:

- L'aire considerat com un gas ideal
- L'aportació de calor és entregada des de l'exterior a través de les parets del cilindre
- L'energia dels gasos d'escapament és cedida al medi a través de les parets del cilindre

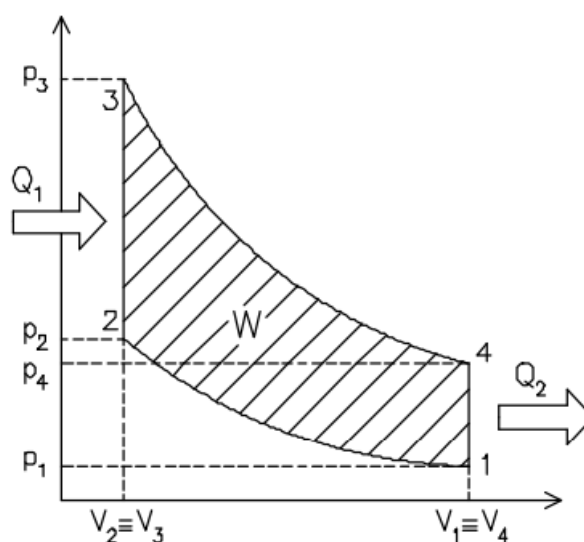


Figura A4 Cicle Otto ideal

En el cicle ideal indicat es distingeixen clarament 4 etapes:

- 1-2 compressió adiabàtica i reversible (isentropica)
- 2-3 combustió a volum constant (isocòrica)
- 3-4 expansió adiabàtica i reversible (isentropica)
- 4-1 escapament a volum constant (isocòrica)

En la figura A5 es mostra el cicle indicat d'un motor en funcionament, prenen la pressió a cada instant dins del cilindre i l'aposeció del cionyal per obtenir el volum desplaçat. Està clar en els gràfics, que els dos cicles són molt diferents, degut en part als següents punt:

- 1-2 : la compressió realment es produeix amb transferència de calor del gas al cilindre.
- 2-3 : degut a que la combustió és un fenomen físic, que no transcorre de manera instantània com mostra el cicle indicat ideal, sinó que té un temps de desenvolupament, aquesta no es produeix a volum constant. El que normalment es fa es anticipar l'inici de la combustió abans de que el volum de la càmera sigui mínim, és a dir abans de que el pistó arribi al PMS, de manera de compensar el temps de retràs des de que salta la guspira fins que la combustió es desenvolupi completament.
- 3-4 : en la carrera d'expansió el gas cedeix part del calor al cilindre i aquest el medi refrigerant, per tant la expansió no és adiabàtica.

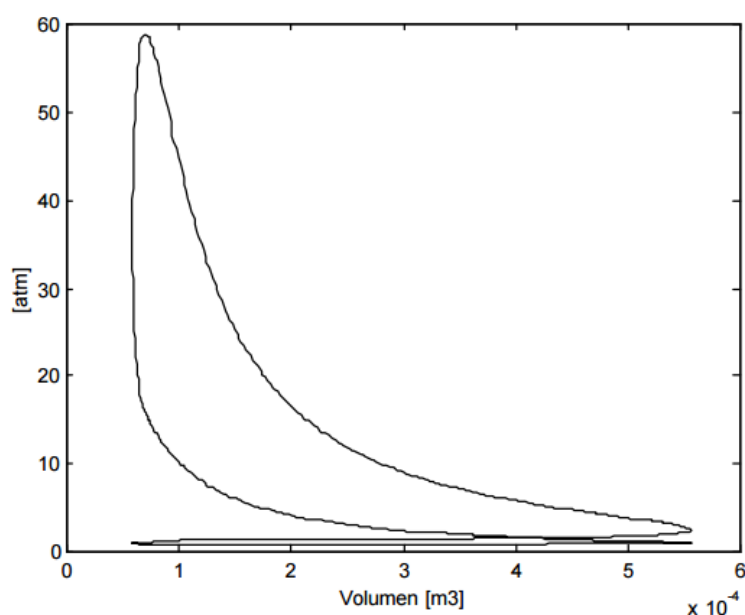
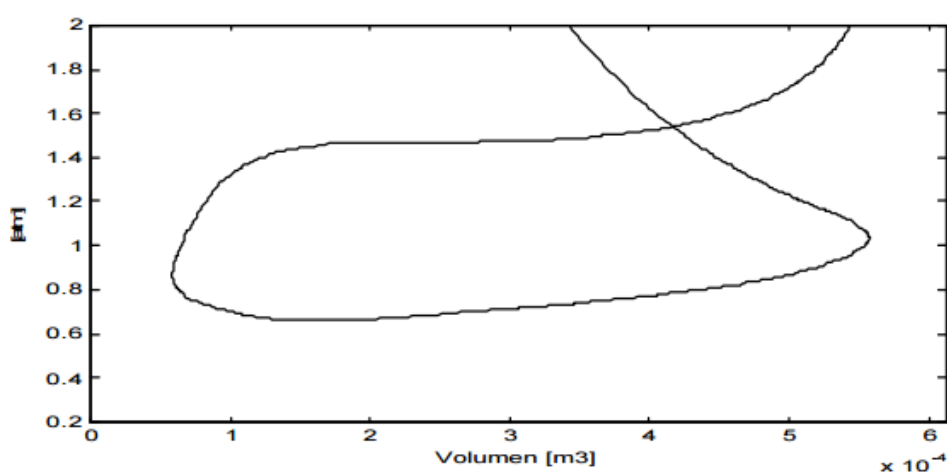


Figura A5 Diagrama P-V d'un motor en funcionament

A més del que s'ha explicat a dalt, en un motor realment el cicle indicat no és tancat com en l'ideal, sinó que hi ha moments on les vàlvules s'obren per permetre l'ingrés o retorn de gas des de l'atmosfera al cilindre o a l'inversa, amb el qual el sistema passa a ser un sistema obert. Aquest canvi de gas produeix en les carreres d'admissió i escapament que es veuen en detall en la figura A6. Aquesta figura és un zoom de la figura A5 en la zona anomenada de bombeig. L'anàlisi d'aquesta porció de cicle indicat és determinant a l'hora d'analitzar el funcionament del motor, sobre tot per analitzar el seu rendiment volumètric. Aquesta gràfica ens pot dir entre d'altres coses si el tamany de les vàlvules és l'indicat, si la tapa de cilindres admet o evacua bé els gasos, si existeix flux revertit en alguna de les carreres...



**Figura A6** Zona de bombeig d'un diagrama P-V

## A.2 Paràmetres de disseny

### A.2.1 Paràmetres operatius

Dins dels factors més important considerats a l'hora de dissenyar un motor es troben:

- Performance en el rang d'operació
- Consum de combustible en el rang d'operació i el cost d'aquest combustible

- Contaminació sonora i emissions en el rang d'operació
- Cost inicial del motor i la seva instal·lació
- Durabilitat del motor, manteniment requerit.

## A.2.2 Propietats geomètriques dels motors

*Relació de compressió:*

$$r_c = \frac{\text{Volum màxim cilindre}}{\text{Volum mínim cilindre}} = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (\text{Eq. A1})$$

On :

$V_d$  = volum desplaçat ( $\text{m}^3$ )

$V_c$  = volum residual ( $\text{m}^3$ )

*Relació entre el diàmetre del cilindre i la carrera:*

$$R_{bs} = \frac{B}{S} \quad (\text{Eq. A2})$$

On:

B – diàmetre del cilindre (m)

S – carrera del cilindre (m)

*Relació entre el llarg de la biela i el radi del cigonyal:*

$$R = \frac{l}{a} \quad (\text{Eq. A3})$$

On:

l – longitud de la biela (m)

a – radi del cigonyal (m)

La carrera i el radi del cigonyal estan relacionats per:

$$L = 2a \quad (\text{Eq. A4})$$

Per saber el volum del cilindre en alguna posició del cigonyal s'utilitza la equació A5.

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s) \quad (\text{Eq. A5})$$

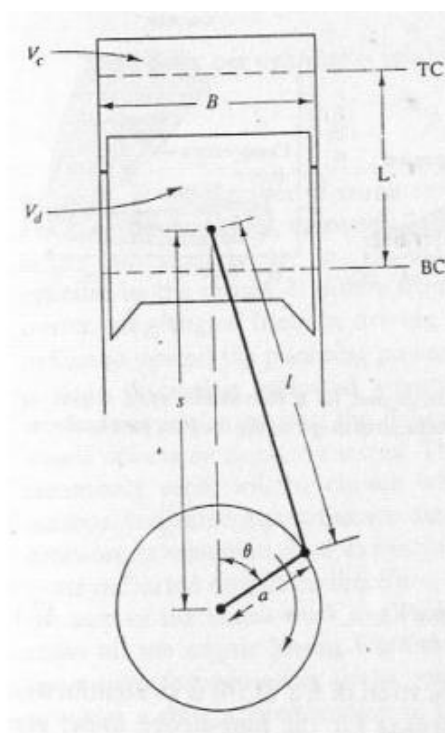
On  $s$  és la distància entre l'eix del cigonyal i l'eix del pern del pistó, i està donat per l'equació A6

$$s = a \cdot \cos\theta + \sqrt{l^2 - a^2 \cdot \sin^2\theta} \quad (\text{Eq. A6})$$

On:

$\theta$ - angle del cigonyal amb la vertical de la carrera ( $^\circ$ )

En la figura A7 es pot observar la geometria del motor i els valors utilitzats en les equacions.



**Figura A7** Geometria del cilindre, pistó, biela i cigonyal



### A.2.3 Parell i potència

El parell d'un motor és mesurat generalment en un dinamòmetre. El parell ve definit per:

$$T = F \cdot b \quad (\text{Eq. A7})$$

On:

T – parell motor (Nm)

F – força aplicada a la cel·la de càrrega (N)

B – Braç de palanca (m)

La potència entregada al motor i absorbida per el dinamòmetre és producte del parell per la velocitat angular.

$$P = n \cdot T \quad (\text{Eq. A8})$$

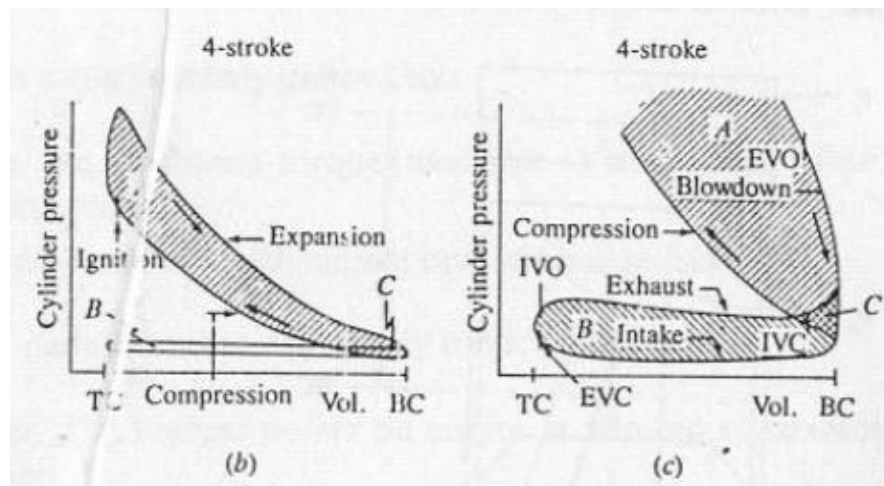
On:

P – potència entregada pel motor (W)

n – velocitat de rotació del cigonyal (rad/s)

### A.2.4 Treball indicat per cicle

Les dades de pressió del gas dins del cilindre poden ser utilitzats per calcular el treball transferit del gas al pistó. La pressió en el cilindre i el corresponent volum desplaçat poden ser plasmats en un diagrama P-V com ostra la figura A8.



**Figura A8** Exemples diagrames P-V

El treball indicat per cycle s'obté integrant la corba per obtenir l'àrea tancada sobre el diagrama:

$$W_{c,i} = \int P dV \quad (\text{Eq. A9})$$

On:

$W_{c,i}$  - treball indicat per cycle (J)

P – pressió del cilindre (w)

V – volum del cilindre ( $m^3$ )

Si tenim en compte els processos d'admissió i escapament sorgeixen altres definicions del treball que són:

*Treball indicat brut per cycle*  $W_{c,ig}$ : és el treball entregat al pistó en la carrera de compressió i expansió.

*Treball indicat net per cycle*  $W_{c,in}$ : és el treball entregat al pistó en les 4 carreres (admissió, compressió, expansió i escapament).

En la figura A8 (c) s'observen aquests treballs a través de la suma de les àrees marcades amb lletres.  $W_{c,ig}$  és A+C i  $W_{c,in}$  és A+C - (B+C), que és igual que A-B on cada una d'aquestes àrees son considerades positives. L'àrea B+C és el treball transferit entre el pistó i els gasos del cilindre durant els processos d'admissió i escapament, anomenat treball de bombeig.

La potència per cilindre està relacionada al treball indicat per cicle per l'equació:

$$P_i = \frac{W_{c, in}}{n_r} \quad (\text{Eq. A10})$$

On:

$P_i$  – potència indicada (W)

$n_r$  – número revolucions del cigonyal per carrera de potència, 2 per motor 4 temps

### A.2.5 Eficiència mecànica

Part del treball brut per cicle és utilitzat per expulsar els gasos d'escapament i admetre la càrrega fresca. Una porció addicional de treball és utilitzat per vèncer la fricció dels elements mòbils com aros, pistons, vàlvules... totes aquestes despeses de potència són agrupats i anomenats potència per fricció. Així:

$$P_{ig} = P_b + P_f \quad (\text{Eq. A11})$$

On:

$P_{ig}$  – potència de pèrdues totals (W)

$P_b$  – potència de pèrdues per bombeig (W)

$P_f$  – potència de pèrdues per fricció (W)

La relació entre les pèrdues per bombeig i les pèrdues totals és la eficiència mecànica.

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_{ig}} \quad (\text{Eq. A12})$$

On:

$\eta_m$  = rendiment mecànic

## A.2.6 Consum específic de combustible i eficiència

En l'assaig de motors, el consum de combustible és mesurat com un volum per unitat de temps. Un paràmetre més utilitzat és el consum específic de combustible (sfc), que és el cabal de combustible per unitat de potència entregada.

$$sfc = \frac{\dot{m}_c}{P} \quad (\text{Eq. A13})$$

On:

sfc – consum específic de combustible (g/KWh)

$\dot{m}_c$  – cabal màssic de combustible (g/h)

P – potència entregada (kW)

La relació de treball produït per un cicle amb la quantitat d'energia del combustible subministrat pel cicle que pot ser alliberada en el procés de combustió és utilitzat per relacionar la potencia desitjada amb la d'entrada (combustible). Aquest valor s'anomena eficiència en la conversió de combustible i es defineix com:

$$\eta_f = \frac{1}{sfc \cdot Q_{HV}} \quad (\text{Eq. A14})$$

On:

$\eta_f$  = eficiència en la conversió del combustible

$Q_{HV}$  – poder calòrfic del combustible (J/g)

## A.2.7 Relació aire/combustible

La relació aire/combustible, o mescla estequiomètrica, ve donada per la següent equació.

$$A/C = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \quad (\text{Eq. A15})$$

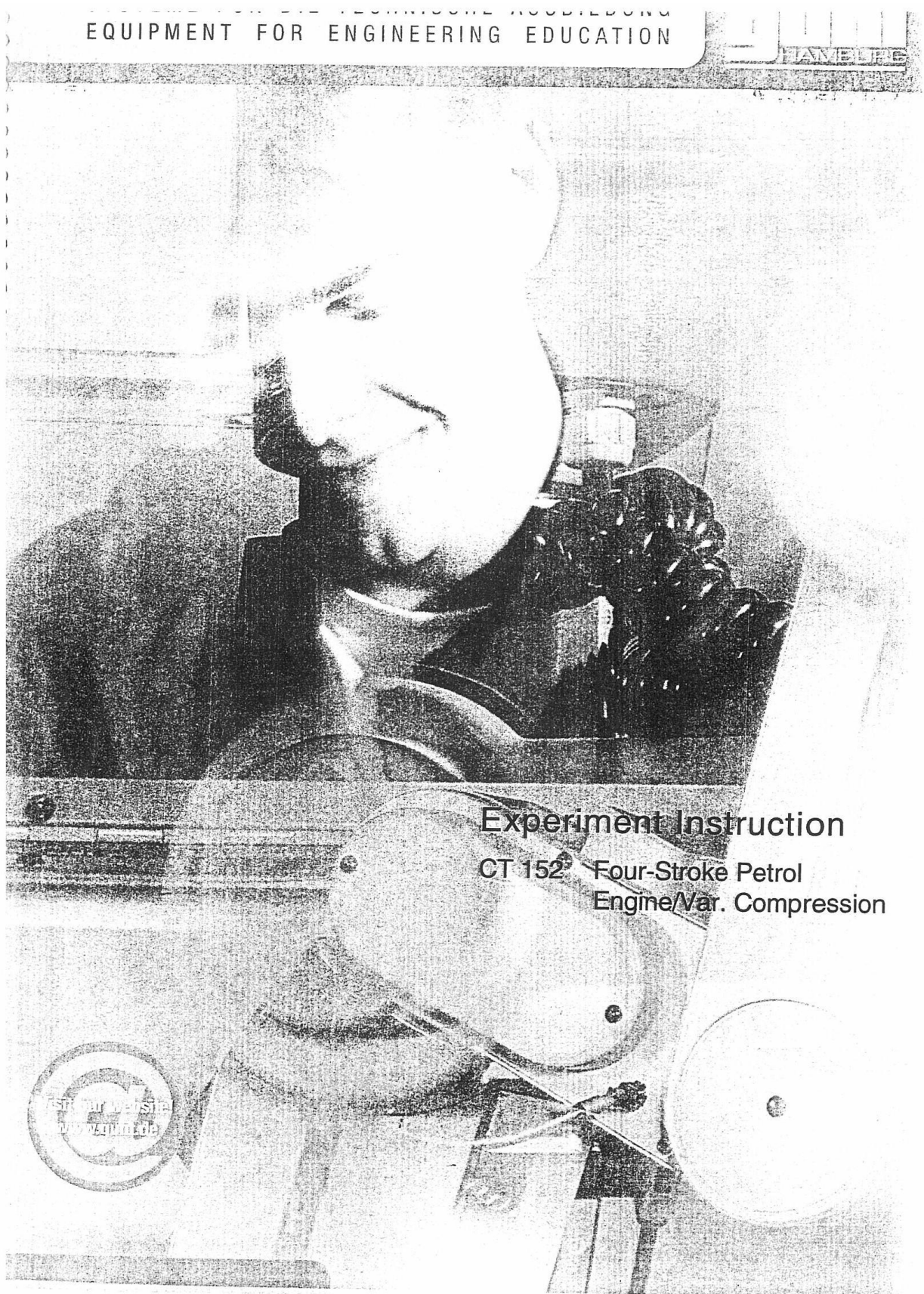
On:

$A/C$  – proporció mescla d'aire i combustible

$\dot{m}_a$  - cabal màssic aire (g/h)

## **ANNEX B. MANUAL MOTOR PRÀCTIQUES**

Aquest annex conté el manual del motor utilitzat en les pràctiques. Aquest manual està redactat en anglès i amb un format diferent al utilitzat en aquest projecte. Com que disposa d'ell en format físic no s'ha pogut adequar el format al del projecte i per tant s'ha introduït com si fossin imatges.



EQUIPMENT FOR ENGINEERING EDUCATION

PLANET LIFE

## Experiment Instruction

CT 152 Four-Stroke Petrol  
Engine/Var. Compression



## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 1 Introduction

The experimental module CT 152 4-stroke petrol engine with variable compression is part of an equipment series that is designed for investigations and experiments on engines and motors.

The use of electronic sensors throughout the equipment series makes the PC-aided data acquisition possible.

The experimental module CT 152 contains a spark ignition engine with an output of approx. 1.5 kW. The experiments should provide records of the full and partial load curves. In order to investigate the effects of the compression ratio, ignition timing and mixture on the operational process within the engine, the engine was equipped with components that allow these parameters to be altered. The experimental module is equipped with a temperature sensor to measure the exhaust gas temperature, which like the ignition cable and fuel supply line is connected to the **CT 159 Combustion Engines Basic Module**. The dynamometer required for the experiments is located on the **HM 365 Universal Drive and Brake Unit**. Additional experimental engines on offer include a 4-stroke petrol engine (CT 150), a 4-stroke Diesel engine (CT 151) and a 2-stroke petrol engine (CT 153).

The experimental module is well suited both for practical instruction at vocational schools as well as for laboratory experiments at colleges and universities. The engine should only be used for educational and experimental purposes.



## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 2 Unit description

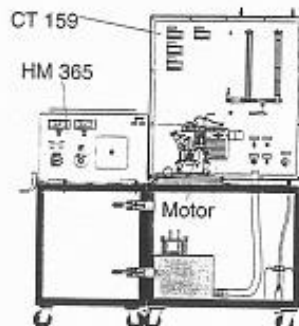


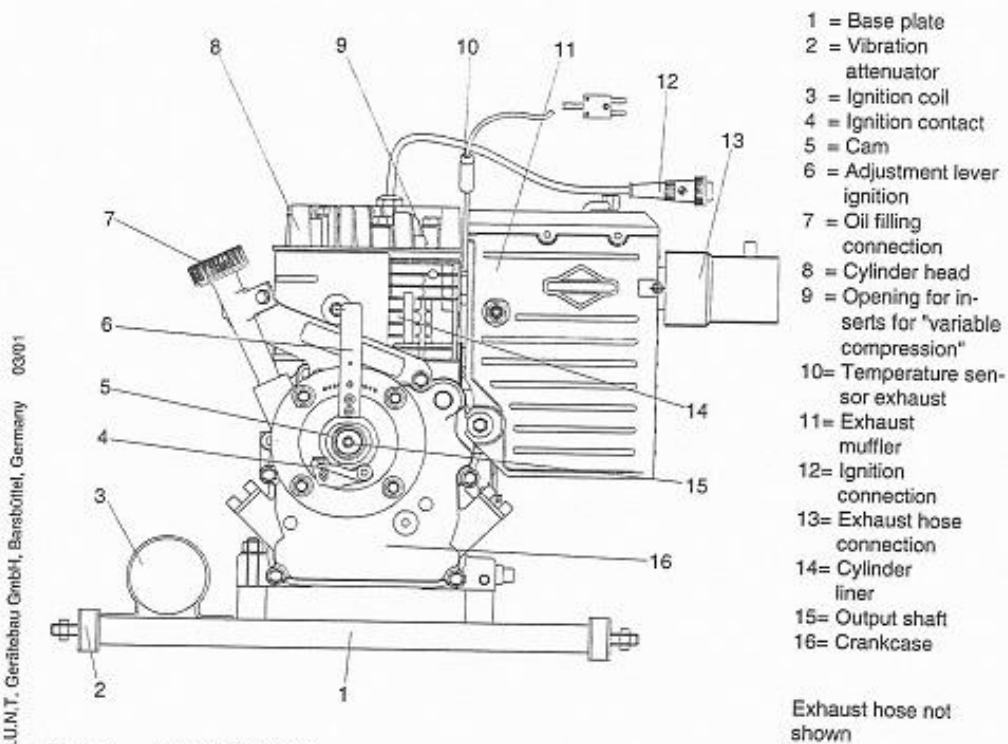
Fig. 2.1 Fully functioning experimental set-up

A fully functioning experiment setup includes, in addition to the CT 159 Combustion Engines Basic Module, at least one engine (e.g. CT 152) and the HM 365 Universal Drive and Brake Unit. If the experiment is set up according to Fig 2.1, experiments can be made to record engine load curves. The combustion engine must then be connected to the DC motor in HM 365 that functions as a dynamometer.

The CT 152 engine is an air-cooled one-cylinder 4-stroke spark ignition engine with external carburation. In order to carry out investigations with variable compression, the engine was provided with a cylinder head that can be equipped with different combustion chamber inserts. The adjustment of the mixture was made possible by redesigning the carburettor. To adjust the ignition timing the original engine starter was replaced with a device so that the ignition timing can be shifted both in the direction of premature ignition and retarded ignition.

The engine can be installed on the Combustion Engines Basic Module in just a few steps. The power transmission between the engine and dynamometer takes place via a V-belt.

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



All rights reserved G.U.N.T., Gerätebau GmbH, Barsbüttel, Germany 03/01

Fig. 2.2 Layout of CT 152

### 2.1 Equipment set-up

Fig. 2.2 and 2.3: the engine is mounted on a base plate (1) which is installed in the seat of the CT 159 Combustion Engines Basic Module. Vibration attenuators (2) dampen the vibrations that occur during the operation of the engine. The change in the engine's ignition makes it necessary to place the ignition coil (3) on the base plate. The ignition contact (4) is now located in the area of the output shaft (15) of the engine and is activated by a cam (5) on the shaft. A lever (6) is used to move the ignition contact on the engine so that it results in a shifting of the ignition timing. The dip stick located

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine

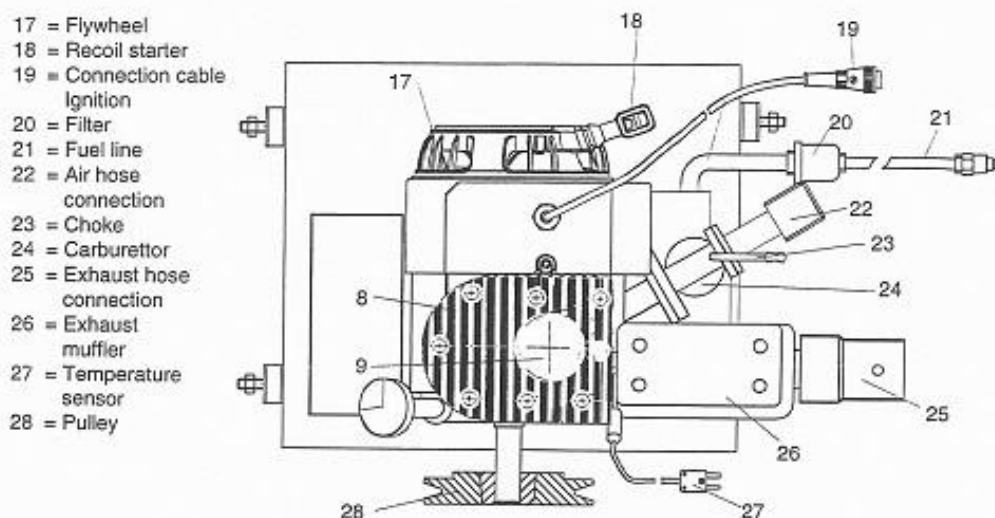


Fig. 2.3 Top view of CT 152

in the oil filling connection (7) is used to check the oil level in the engine. The opening (9) for the inserts is found in the cylinder head (8) of the engine, which is used to create the various compression ratios. The spark plug is inserted into the insert currently in use.

The engine is started with a recoil starter (18). The choke (23) should be activated. Paddles are attached to the flywheel (17) to cool the engine. A pulley (28) is mounted on the output shaft of the engine, which is used to couple the engine to the dynamometer in HM 365.

The spark plug is supplied with the required ignition voltage via a cable (19). The fuel line (21) is provided with a fuel filter (20). The line ends at the carburettor (22), to which the air hose (24) is also connected. A connection (25) for the exhaust hose is located on the exhaust muffler (26). This area

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



also contains the temperature sensor (27) for measuring the temperature of the exhaust.

### 2.1.1 Variable compression

The variable compression can be created with five different combustion chamber inserts, which are screwed into the modified cylinder head for each specific experiment.

Fig. 2.4 shows how the various inserts are to be installed in the cylinder head (1). The following compression ratios can be created:

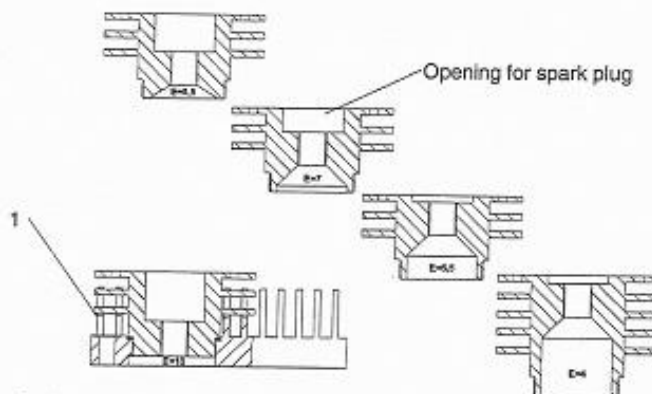


Fig. 2.4 Combustion chamber inserts with various compression ratios

- 10 : 1
- 8.5 : 1
- 7 : 1 (original compression)
- 5.5 : 1
- 4 : 1

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 2.1.2 Variable Ignition timing

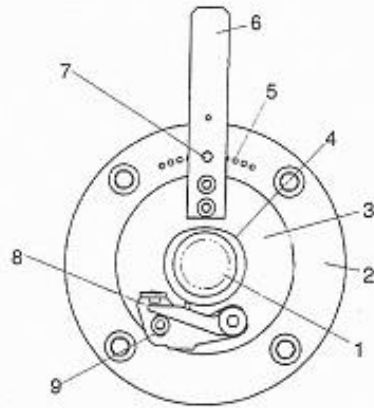


Fig. 2.5 Ignition timing adjustment

In order to adjust the ignition timing it was necessary to modify the original ignition device. The engine was provided with a base plate (2) in the area of the output shaft (1), which is used to support a swiveling board (3) with the ignition contact (8). The ignition contact is arranged on this board so that it can be activated by a cam (4) located on the engine shaft (Fig. 2.5). The contact distance can be adjusted by loosening a screw (9). The lever (6) which is used to shift the ignition contact can be fixed with a pin (7) in 11 different locking points (5), which are located on the base plate at intervals of 5° (Fig.2.6). The vertical position of the lever corresponds to 15° before TDC. Moving the lever to the **right** adjusts the ignition timing more in the direction of premature ignition, while moving it to the **left** adjusts it in the direction of retarded ignition. This makes it possible to adjust the ignition timing from 10° after TDC to 40° before TDC.

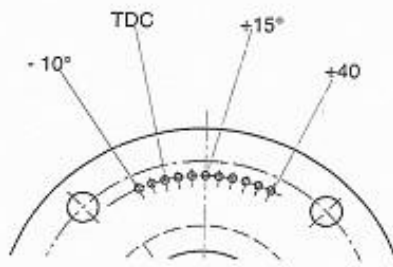


Fig. 2.6 Graduation Ignition timing adjustment

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 2.1.3 Variable mixture

The mixture can be influenced on the modified engine by adjusting the main carburettor nozzle. The new, adjustable main carburettor nozzle (1) is located (as shown in Fig. 2.7) at the bottom of the float chamber (2) of the carburettor (4). Adjusting the knob (3) **clockwise** will create a leaner mixture, while adjusting it **counterclockwise** makes the mixture richer.

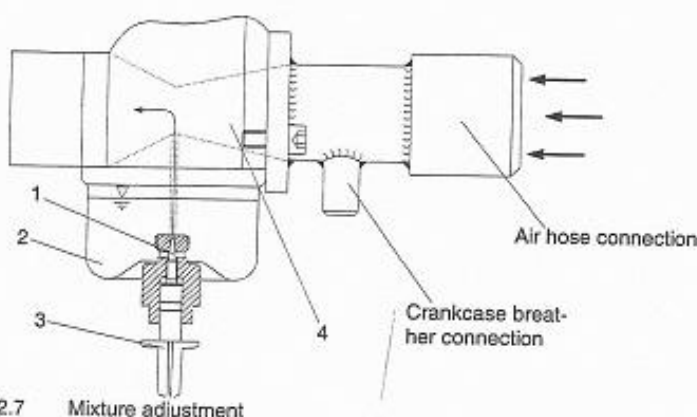


Fig. 2.7 Mixture adjustment

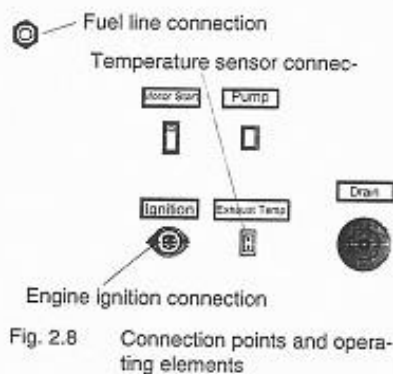
For adjustment, please turn the knob clockwise, until a slight resistance can be felt. The main carburettor nozzle is completely **closed** now. Then the knob has to be turned counterclockwise for 2.5 turns. Now, the carburettor nozzle is in the **neutral** position.

## 2.2 Start-up

### 2.2.1 Installing and connecting the engine

- First the base plate, on which the engine is installed, is inserted into the special seat of the CT 159 Combustion Engines Basic Module

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



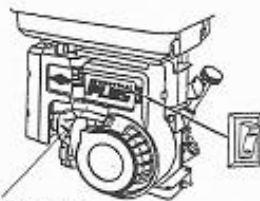
Then the screws on the left side of the base plate must be tightened by hand, followed by the screws on the right side

- The three plugs located on the engine must be plugged into the connecting sockets on the CT 159 Combustion Engines Basic Module. Fig. 2.8 shows which connection belongs to which socket
- The V-belt is placed on the pulley of the engine. The belt must then be tensioned (as described in the instruction to HM 365)

03/01

All rights reserved G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barstühfel, Germany

### 2.2.2 Starting the engine



Recoil starter  
Fig. 2.9 Position of On/Off-switch

#### Preparation

- Before the engine is started the fuel line and the measuring tube in CT 159 must be filled
- The engine ignition must be switched on by activating the switch "Engine Start" on the CT 159 Combustion Engines Basic Module
- Air hose and exhaust hose must be attached, and the end of the exhaust hose must be outside the enclosed building
- Care must be taken to ensure that the belt guard is in place
- The oil level of the engine must be checked
- The rotational direction display on the HM 365 Universal Drive and Brake Unit must show "left". The DC motor that functions as the braking device must be switched on via the controller release. The speed controller may not yet be activated at this point (= potentiometer speed to 0, see instructions to HM 365)
- The On/Off-switch for the engine must be set to "On" according to Fig. 2.9

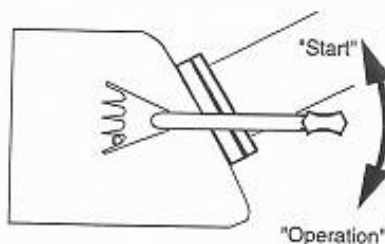


Fig. 2.10 Top view carburettor adjustment choke

2 Unit description

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine

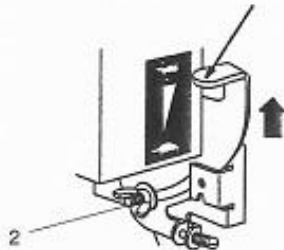


Fig. 2.11 Speed control

- The choke of the engine must be activated for the start process according to Fig. 2.10
- The speed controller must be set to "Fast" according to Fig. 2.11. The lever (1) must be secured against unintentional adjustment with the wing nut (2)

### Starting

- Slowly pull out the starter cable until a slight resistance is felt
- Allow cable to rewind so that the entire length of the cable can be used for the start process
- Grasp handle with both hands and pull with steady and increasing speed (do not jerk suddenly) until the engine starts
- If the engine does not start after several starting attempts, push in choke slightly and try again

## 2.3 Operation

### 2.3.1 Engine operation

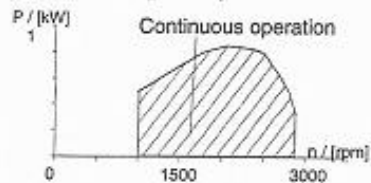


Fig. 2.12 Performance curve in continuous operation



ATTENTION

After the engine has been put into operation, it should run for a short time before starting the experiments. Check the condition of the engine on the basis of noise propagation and exhaust at this point.

In these experiments, full load and partial load curves should be recorded on the engine.

Figure 2.12 shows the range in which the engine can be run continuously.

**IMPORTANT!** It is recommended to wear ear protection while the engine is in operation!



## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 2.3.2 Stopping the engine

The engine is shut down as follows:

- Release the engine at the dynamometer in HM 365, i.e. set potentiometer-torque and potentiometer-speed to 0
- Shut off fuel supply (described in instructions to CT159)
- Turn off ignition at "Engine Start" switch on CT 159 Basic Module (engine turns off)
- Set On/Off-switch on engine to "Off"

## 2.4 Maintenance and adjustment

### 2.4.1 General information

The engine is delivered to the customer in a preset condition and is ready for operation. A test run has also been completed. The engine is equipped for delivery with the combustion chamber insert that corresponds to the original compression ratio. The engine should be operated with super-octane petrol due to the changing compression ratio. The spark plug should be checked and cleaned after every 100 operating hours. The fuel lines should be checked regularly for leaks.

### 2.4.2 Changing the oil and checking the oil level

The engine is filled with 15 W 40 multigrade oil for the test run. Because air-cooled engines run hotter than automobile engines, for example, operation with this oil will result in a high oil consumption rate. The oil level and the engine must therefore be checked frequently. It is recommended to change the oil after about five (5) hours of operation and replace it with single-grade oil SAE 30 (see Fig. 2.13). The oil should then be changed after about every 100 operating hours. To change the oil, open

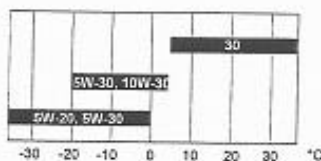


Fig. 2.13 Recommended oils

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine

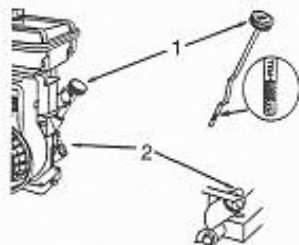


Fig. 2.14 Oil filling connections and oil filling screw

the oil filling connection with the screw opening (1). The oil can then be drained via the open oil drain valve (2) (tip engine). When checking the oil the level should be between the "Full" and "ADD" markings on the dip stick (Fig. 2.14).

For additional maintenance steps, refer to the manufacturer's operating instructions (included).

All rights reserved G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barsbüttel, Germany 03/01

### 2.4.3 Changing the combustion chamber inserts



Fig. 2.15 Face wrench

A face wrench (included) is used to replace the combustion chamber inserts (Fig. 2.15). They are installed in the opening by turning in a clockwise direction and removed in a counterclockwise direction. A thin coat of copper paste should be applied to the thread of the new combustion chamber. The inserts are sealed with a Teflon gasket.

**IMPORTANT!** Always ensure the correct fit of the gasket when installing a new insert!

**IMPORTANT!** Avoid changing the inserts when engine is warm! Allow engine to cool for approx. 20 minutes.

**IMPORTANT!** Tighten newly installed combustion chamber inserts only by hand.



## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 2.4.4 Adjusting and checking the ignition timing

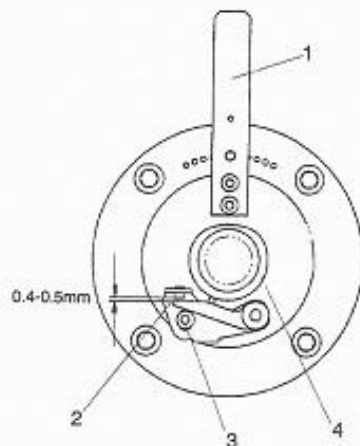


Fig. 2.16 Adjusting the contact distance

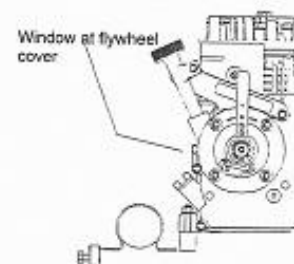


Fig. 2.17 Position window TDC marking

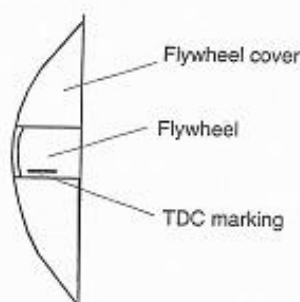


Fig. 2.18 Window TDC marking

Because the operation of a spark ignition engine will cause wear to the ignition contact, the ignition timing must be checked at regular intervals and may need to be readjusted. The readjustment is performed while the engine is idle, but the ignition voltage remains on (activated "Engine Start" switch on the CT 159 Combustion Engines Basic Module). To avoid unintentional ignition, the ignition socket at the spark plug must be removed. When carrying out a readjustment the adjustment lever for the ignition contact (1) must be set to TDC (see Fig. 2.6). The contact distance (2) at the ignition contact must be adjusted to 0.4 - 0.5 mm using a feeler gauge (Fig. 2.16). The engine must be powered by hand until the contact distance is at a maximum. A screw (3) must be loosened in order to change the contact distance. The ignition timing can be adjusted using a control light. The control light is connected to the ignition contact and a ground point on the engine (parallel to the ignition contact). The light begins to illuminate as soon as the contact opens and the ignition spark is generated. The opening is controlled with the cam (4), which is located on the output shaft of the engine and is secured with a stud screw. The engine is then powered by hand until the TDC marking becomes visible through a viewing window in the flywheel cover (Fig. 2.17 and 2.18). The control light must illuminate when the TDC marking is flush with the bottom edge of the window. If this is not the case, the opening time must be adjusted by turning the cam. The engine must then be returned to TDC using the marking on the flywheel. The cam must be loosened and turned carefully until the control light illuminates. The cam is secured with the stud screw (turn clockwise). The ignition cable plug must be reattached to the spark plug.

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



After adjusting, the ignition timing should be checked with a stroboscope. The positive connection of the stroboscope is attached to the positive pole of the ignition coil and the negative connection to ground. The stroboscope transmitter is placed around the ignition cable for the spark plug. The engine is started and the stroboscope is pointed towards the opening in the flywheel cover. The stroboscope is controlled via the transmitter so that the light flashes at the same time as the ignition pulses of the cylinder. During testing the rotating TDC marking will appear to stand still in the opening.

All rights reserved G.U.N.T. Gefährtenbau GmbH, Barstölzel, Germany 03/01

---

2 Unit description

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 3 Safety instructions

#### 3.1 Risk for personal safety



DANGER



DANGER



DANGER



- **DANGER! Do not operate motor without attached exhaust hose. The end of the exhaust hose must be fed to the outside at all times!** Exhaust fumes contain carbon monoxide, an odourless and fatal poisonous gas.
- **DANGER! Do not touch hot exhaust muffler or exhaust hose when motor is in operation!** Risk of burns. Allow motor to cool before carrying out repair or maintenance work.
- **DANGER! Never touch moving or rotating parts!** Risk of serious injury.

#### 3.2 Risks for unit and function



ATTENTION



ATTENTION



ATTENTION

- **CAUTION!** Do not start the motor if petrol has escaped or if there is a strong petrol odour. Ventilate room and remove any fuel spills. Check motor and fuel lines for leaks.
- **CAUTION!** Do not manipulate controller springs, rods or other parts to increase the speed.
- **CAUTION!** The flywheel cover is also used during operation to guide the air required for cooling the motor! Do not remove the cover, as this will cause the motor to overheat!

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 4 Fundamental principles

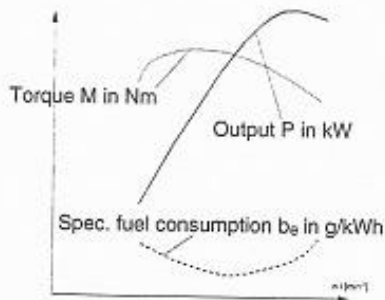


Fig. 4.1 Full load curves of a 4-stroke spark ignition engine

The characteristic of an engine is the result of the measured values determined on a test rig at various speeds for output  $P$ , torque  $M_d$  and specific fuel consumption  $b_e$ . Entering these measured values on a diagram in relation to the speeds results in the characteristic curves of the engine created by the curve of the measured points. A distinction is made between full load and partial load curves.

**Full load curves:** The engine, standard in all its parts, is braked on a test rig at operating temperature and with fully opened throttle using a braking device. "Full load" is defined as the stress that an engine can overcome without a reduction in speed. In this case the largest possible quantity of fuel is made available. The values determined over the entire speed range under different loads are the basis for the curve progression of torque, output and specific fuel consumption.

**Partial load curves:** Because an engine in daily use is rarely under full load, measurements under partial load are just as important. Several measurements are carried out at constant speed and under various loads of the engine. The availability of a sufficient amount of data makes it possible to establish performance characteristics for the engine, for example, using the partial load curves.

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 5 Experiments

The steps described in Chapter 2.2 must be followed when carrying out experiments. The use of the PC-data acquisition is described in the instructions for the CT 159 Combustion Engines Basic Module.

#### 5.1 Execution

A performance curve was recorded on the engine at full load and the consumption was measured. The influence of the compression ratio and ignition timing were also investigated. The measurements for the performance curve and the consumption curve were carried out with a compression ratio of 7:1 and an ignition timing of 10° before TDC. The experiments are examples.

##### 5.1.1 Measuring the performance curve

To record the performance curve that corresponds to the full load curves, the speed controller must be set to the maximum fuel quantity (as shown in Fig. 2.11) while the engine is running. The throttle cable to the carburettor is then fastened by tightening the idle screw to the full load stop. The dynamometer on the HM 365 Universal Drive and Brake nit is then used to stress the engine by turning on the potentiometer fully for the specified speed (potentiometer for the specified torque must be set to Maximum). By gradually reducing the speed at the potentiometer, the torque values will be displayed on the HM 365. This can be used to form the performance curve. The recorded measured values are shown in Table 5.1. The output can be calculated using the formula

n in rpm	M <sub>d</sub> in Nm
2900	1,09
2800	1,97
2700	2,16
2500	2,60
2300	3,45
2000	4,00
1700	4,35

Tab. 5.1 Measured values for performance curve

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (5.1)$$

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



n in rpm	P in W
2900	331
2800	577
2700	610
2500	680
2300	830
2000	837
1700	774

and shown in a diagram as a curve for the various speeds. The output is shown in Table 5.2 in relation to speed. Fig. 5.1 shows the related curve.

Tab. 5.2 Performance data CT 152

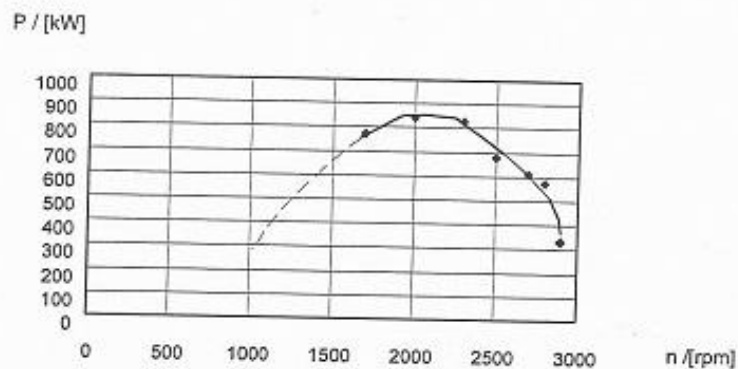


Fig. 5.1 Performance curve CT 152

All rights reserved G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barsbüttel, Germany 03/01

### 5.1.2 Measurement of fuel consumption

The consumption measurement was carried out at a speed of 2500 revolutions per minute. To record the consumption curve the speed of the engine was set at the dynamometer of the HM 365 Universal Drive and Brake Unit, while the load on the engine remained at 0 (potentiometer torque at 0). Then the load of the engine was increased at the potentiometer for the specified torque, slowly and gradually in equal steps, while the speed was kept constant (i.e. was controlled **at the engine**). Measured values for the fuel consumption were recorded - the consumption is measured at the right-hand measuring tube for the CT 159 Basic



### CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



$M_D$ in Nm	$t$ in s
0.56	43
0.99	37
1.50	36
2.04	29
2.49	28
2.99	23
3.22	27

Tab. 5.3 Measured values where  $n = 2500$  rpm with  $V = 4,4 \text{ cm}^3/\text{l}$

Module using a stopwatch. The time it takes for the liquid level to fall from one measurement marking to the next is recorded for each of the values set on the Universal Unit HM 365 for torque (a decrease on the scale of one cm corresponds to  $4.4 \text{ cm}^3$  of consumed fuel). The measured values are shown in Table 5.3. The measured volumetric flow rate  $\dot{V}$  is shown in a diagram as the specific fuel consumption  $b_e$  in relation to the output  $P$ . This is converted according to the formula

$$b_e = \frac{\dot{m}_B}{P} \tag{5.2}$$

where

$$\dot{m}_B = \dot{V} \cdot \rho_{\text{fuel}} \tag{5.3}$$

$P$ in W	$\dot{m}_B$ in kg/h	$b_e$ in g/kWh
146	0,283	1938
261	0,329	1261
393	0,338	862
536	0,420	784
654	0,435	666
782	0,530	678
842	0,451	536

Tab. 5.4 Calculated values for measuring consumption

The density  $\rho$  of the fuel is set at  $0.77 \text{ g/cm}^3$ . This results in a  $\Delta m_{\text{fuel}}$  of  $3.388 \text{ g}$  for each centimeter of liquid that falls on the scale of the measuring tube. The results calculated from the measured values are shown in Table 5.4. The corresponding diagram is shown in Fig. 5.2.

All rights reserved G.U.N.T., Gerätebau GmbH, Baisbüttel, Germany 0301

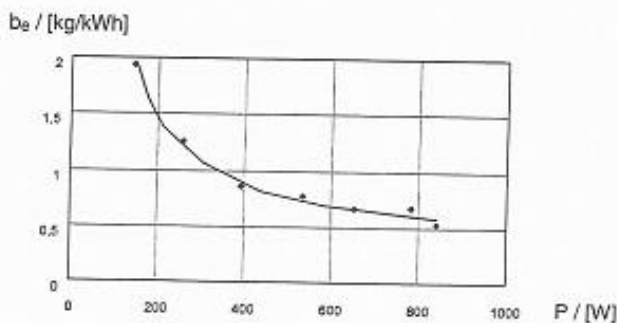


Fig. 5.2 Specific fuel consumption  $b_e$  at  $n = 2500$  rpm

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 5.1.3 Influence of the compression ratio

Compressio n:ε	M <sub>d</sub> in Nm	n in rpm	t in s
4:1	2,00	2415	25
5,5:1	2,02	2480	29
7:1	2,08	2500	32

Tab. 5.5 Measured values – Influence of compression ratio at n and M<sub>d</sub> = const. with  $\dot{V} = 4,4\text{cm}^3/\text{t}$

The consumption was measured (as described in Chap.5.1.2) on the engine as constant speed (n = 2500 rpm) and constant load (M<sub>d</sub> = 2 Nm). Various combustion chambers are inserted into the cylinder head in order to investigate the influence of the compression ratio on the specific fuel consumption b<sub>e</sub>. The recorded values are shown in Table 5.5. The ignition timing was 20° before TDC during these measurements. Because it was difficult to create exactly the same conditions during the measurements, the recorded values are subject to minor fluctuations. The results calculated from the measured values are shown in Table 5.6. The diagram is shown in Fig. 5.3.

Compressio n:ε	Output P in W	m <sub>g</sub> in kg /h	b <sub>e</sub> in g/kWh
4:1	505,8	0,497	983
5,5:1	524,6	0,420	801
7:1	544,5	0,381	700
10:1	539,3	0,358	664

Tab. 5.6 Calculated values - Influence of compression

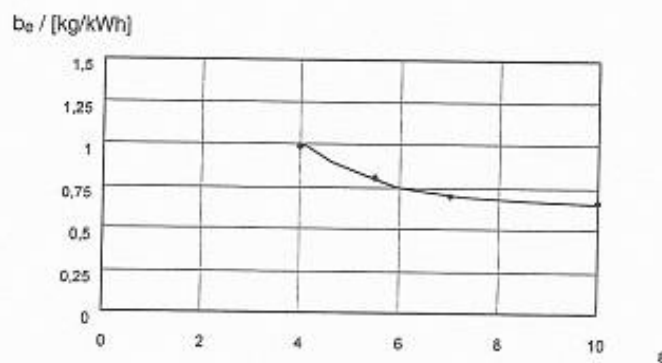


Fig. 5.3 Specific fuel consumption b<sub>e</sub> over compression ratio ε (at n = 2500 rpm and M<sub>d</sub> = 2 Nm)

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 5.1.4 Influence of ignition timing

Ignition timing $\alpha$	n in rpm	$M_d$ in Nm	t in s
-10	2414	2,00	25
0T	2520	2,05	28
10	2480	2,06	31
20	2500	2,08	32
30	2500	2,08	34

Tab. 5.7 Measured values - Influence of ignition timing at n and  $M_d$   
= const. with  $\dot{V} = 4,4\text{cm}^3/\text{t}$

The influence of the ignition timing on the specific fuel consumption was also investigated at a speed of  $n = 2500$  rpm and a constant load of  $M_d = 2$  Nm. The compression ratio during the measurements was 7:1. Here too, minor fluctuations in the measured values led to different (calculated) output values. The recorded measured values are shown in Table 5.7 and the calculated values are shown in Table 5.8. The corresponding diagram is shown in Fig. 5.4.

Ignition timing $\alpha$	Output P in W	$\dot{m}_B$ in kg/h	$b_e$ in g/kWh
-10	505,6	0,491	971
0T	541,0	0,435	804
10	535,0	0,393	734
20	544,5	0,381	700
30	544,5	0,358	657

Tab. 5.8 Calculated values - Influence of ignition timing

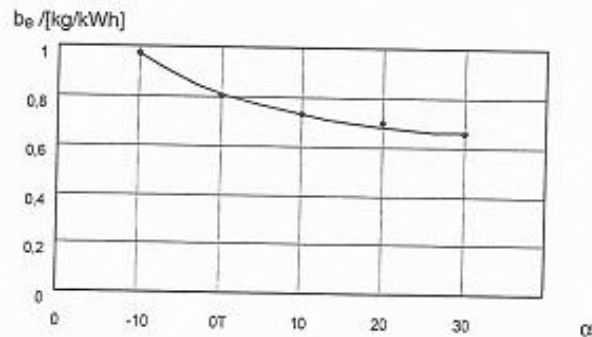


Fig. 5.4 Specific fuel consumption  $b_e$  over ignition timing  $\alpha$

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 5.2 Additional experiments

The modifications made to the engine make a number of additional experiments possible. For example, the following investigations can be carried out:

- Influence of ignition timing on the exhaust temperature
- Influence of the mixture on the exhaust temperature
- Influence of the mixture on the output etc.

If the combustion engine is powered by the HM 365 Universal Unit without ignition or fuel supply, it is possible to determine the friction power  $P_F$  of the engine. The corresponding negative torque values are displayed on the Universal unit HM 365.

The measurement of air consumption makes it possible to calculate the air ratio  $\lambda$  according to the formula

$$\lambda = \frac{1}{L_{\min}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\dot{m}_B} \quad (5.4)$$

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 6 Annex

#### 6.1 Technical data

**Air-cooled one-cylinder spark ignition engine  
with external carburation**

**Weight**

approx. 17 kg

**Dimensions**

lxwxh 515 x 345 x 370 mm

**Bore**

65.1 mm

**Stroke**

44.4 mm

**Output**

approx. 1.5 kW

**Oil volume**

0.6 litre

**Ignition voltage**

12 V

**Ignition timing**

adjustable from 40° before TDC to 10° after TDC

**Compression**

10:1, 8,5:1, 7:1, 5,5:1, 4:1

**Temperature sensor for exhaust temperature**

Measuring range 0...1000°C

**Pulley**

Ø 125 mm

**V-Belt**

Type SPA 1250

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### 6.2 Specific formulas

#### 6.2.1 Symbols

$n$	Speed	$s^{-1}$
$M_d$	Torque	Nm
$P$	Output	kW
$T$	Temperature	K
$t$	Time	s
$m$	Mass	kg
$\dot{m}$	Mass flow rate	kg/h
$V$	Volum. flow rate	$m^3/h$
$\rho$	Density	$kg/m^3$
$\lambda$	Air ratio	1
$L_{min}$	Min. air requirement	1
$\epsilon$	Compression ratio	1
$\alpha$	Ignition timing	1

#### 6.2.2 Formulas

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (5.1)$$

$$b_e = \frac{\dot{m}_B}{P} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_B = V \cdot \rho_{fuel} \quad (5.3)$$

$$\lambda = \frac{1}{L_{min}} \cdot \frac{\dot{m}_{Luft}}{\dot{m}_B} \quad (5.4)$$

#### 6.2.3 Additional information

##### Performance curve

The performance data should be based on standard conditions (geodetic elevation M.S.L., 1013 hPa) in accordance with ISA (International Standardizing Association).

## CT 152 Variable Compression Ratio Four Stroke Petrol Engine



### Formulas

$$P_{red} = \sqrt{\frac{288}{T_{ambient} + 273} \cdot \frac{1.013}{P_{ambient}}} \cdot P$$

provide the reduced performance  $P_{reduced}$  when using the ambient temperature in °C for  $T_{ambient}$  and the current ambient pressure in bar for  $P_{ambient}$ .

**IMPORTANT!** The amount of the reduced performance can be larger than the amount of the defined performance values.

All rights reserved G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barsbüttel, Germany 03/01

### Measuring fuel consumption

For reasons of time, the time for 1 cm of liquid to fall ( $\Delta V$ ) in the measuring tube was measured to determine the fuel consumption. The resulting volume is 4.4 cm<sup>3</sup>. Where

$$\Delta V \cdot \rho_{fuel} = \Delta m$$

and

$$\frac{\Delta m}{t} \cdot 3,6 = \dot{m}_B$$

provides the mass flow rate of the fuel in kg/h.

The resulting mass difference for the fuels used here for 1 cm of liquid falling in the measuring tube for the CT 159 is shown in Table 6.1.

Fuel	$\Delta m$ in g
Petrol	3,388
Diesel	3,652
2-stroke mixture	3,476

Tab. 6.1 Mass difference for 4,4 cm<sup>3</sup> fuel

### Measuring air consumption

When measuring the air consumption the values for the air consumption are shown in litres/min on the display of the CT 159 Basic Module. This unit must be converted to kg/h for calculations with the formula 5.4 (Chap. 5.2).

## **ANNEX C. MANUAL LOTUSENGINE**

Per conèixer en més profunditat el funcionament bàsic del programa utilitzat per realitzar la simulació en aquest annex es presenten dos tutorials que expliquen pas per pas com realitzar l'esquema del motor amb el programa. També ens presenta l'aplicació de visualització de l'entorn de simulació.

Com succeeix amb el manual del motor, aquests tutorials també estan en anglès i en un format diferent que el del projecte. Això és degut a que s'extreuen directament de la biblioteca que porta el programa inclòs. En aquest annex només es presenten els tutorials 1 i 2 de tots els que hi ha , ja que són els que aporten la informació necessària per realitzar una simulació com la que s'ha fet.



# 1

## Tutorial 1. 'Basic Single Cylinder Engine Model

### Overview

This tutorial shows the user how to create a single-cylinder engine model, run the model, and display the answers. The tutorial also introduces the user to some basic operations within Lotus Engine Simulation, such as checking a model for connectivity errors and describes various elements of the Lotus Engine Simulation interface.

This chapter contains the following sections:

- Starting Lotus Engine Simulation, 10
- Adding a Cylinder, 11
- Changing the In-Cylinder Heat Transfer Coefficients, 12
- Performing Basic Functions in the Builder Environment, 13
- Adding Valves, 13
- Adding Ports, 15
- Adding Inlet and Exit Boundaries, 16
- Defining the Fuel and Fuel System, 17
- Defining Steady-state Test Condition Data, 18
- Setting the Names of the Results Files, 19
- Saving a Model, 19
- Running a Model, 20
- Monitoring the Progress of a Job, 21
- Displaying the .MRS Results – Text Viewer, 22
- Displaying the .MRS Results – Graphical Viewer, 23

## Starting LOTUS ENGINE SIMULATION

From the start menu, point to **Programs**, point to **Lotus Engineering Software**, and then select **Simulation Tools**. The start-up 'splash screen' is then displayed for a few seconds before the start-up wizard appears, as shown below in Fig. 2.1.

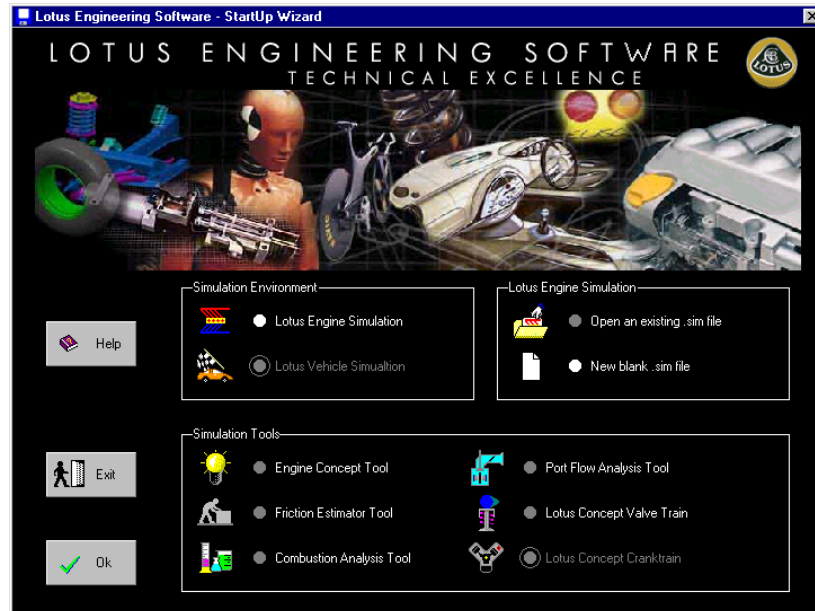


Figure 2.1. Start-up wizard

From the start-up wizard select **Lotus Engine Simulation** from the **Simulation Environment** panel and select **Open blank .sim file**. Then select **OK**.

Before proceeding further in this tutorial please ensure that the **Show Connectivity Errors** option has been selected from the **View** menu at the top of the interface window as shown in Figure 2.2.

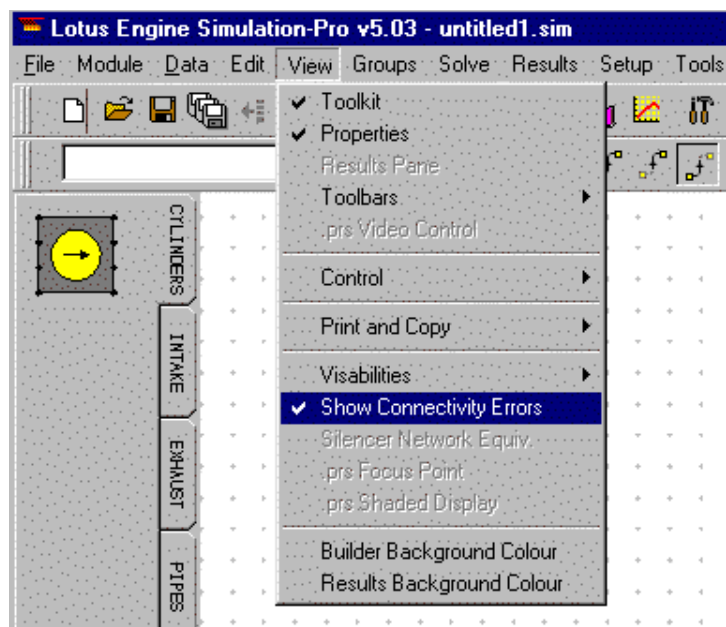


Figure 2.2. Turning on the display connectivity errors option.

This will cause elements which do not have their connectivity's sufficiently well defined to appear in red.

## Adding a Cylinder

Select the **Cylinders** tool kit tab from the left-hand side of the window (the partial screen shot shown below shows the Cylinder Tool Kit). Using the left mouse button drag and drop a cylinder on to the central region of the window known as the **Builder Area**. The cylinder background will turn red once it is placed in the builder area as shown in Fig. 2.3.

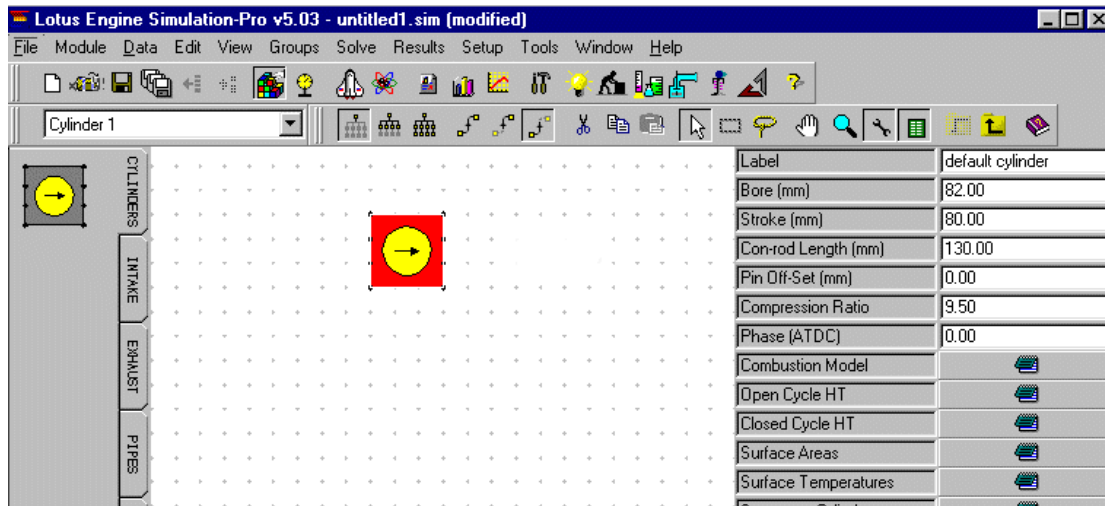


Figure 2.3. The builder area

In the cylinder **Property Sheet** on the right-hand side of the screen change the cylinder **Bore** to **87 mm** and the stroke to **84 mm**.

Also change the **Compression Ratio** to 11.0.

Now click on the **Surface Areas** option on this property sheet. In the window which is generated select the **User Defined Values for Surface Areas** option. This will change the appearance of the window to that shown below. This screen enables the user to define the increase in the surface area over the bore cross-sectional area of the cylinder head and piston. It also enables the user to defined the 'bump clearance' of the engine (i.e. the exposed cylinder liner length above the crown when the piston is at top-dead-centre). The last number defines the number of segments in to which the cylinder liner can be sub-divided in order to discretize liner heat transfer data. Set the **Head/Bore (ratio)** to 1.1, the **Piston/Bore (ratio)** to 1.05 and the **Exp. Liner** (length above piston crown at tdc) to 1 mm. All these parameters are used in the heat transfer calculations.

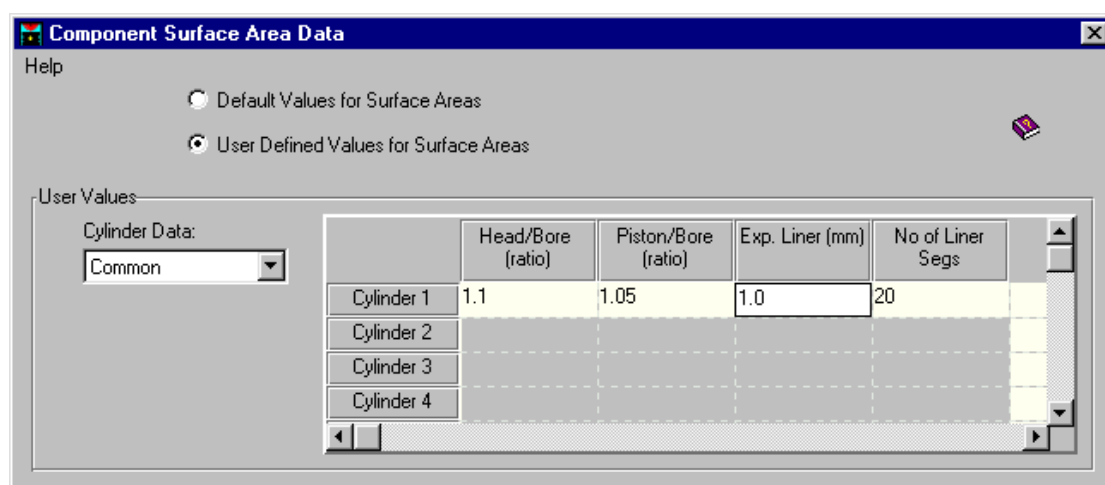


Figure 2.4. Editing component surface areas.

Select **Common** from the **Cylinder Data** box on the left-hand side of the window – this allocates the properties just defined to any other cylinders which exist at the time of editing the data, or are

subsequently created. Close the window by clicking on the cross in the top right-hand corner of the window.

### Changing the In-Cylinder Heat Transfer Model

LOTUS ENGINE SIMULATION provides a choice of three in-cylinder heat transfer models:

1. the Annand model;
2. the Woschni model;
3. the Eichelberg model.

These models characterise the convective and radiative heat transfer coefficients in the cylinder – the Annand model is selected as the default model. Different coefficients are used in the open and closed periods of the cylinder due to the different gas compositions and temperatures, and the different fluid motion regimes which prevail during these periods. Click on the **Closed Period** option in the cylinder property list. This will produce the window shown in Fig. 2.5. Click in the **User** bullet box and change the Annand **A** coefficient to 0.20, ensure the **B** coefficient is set to 0.8 and **C** to 4.29e-9.

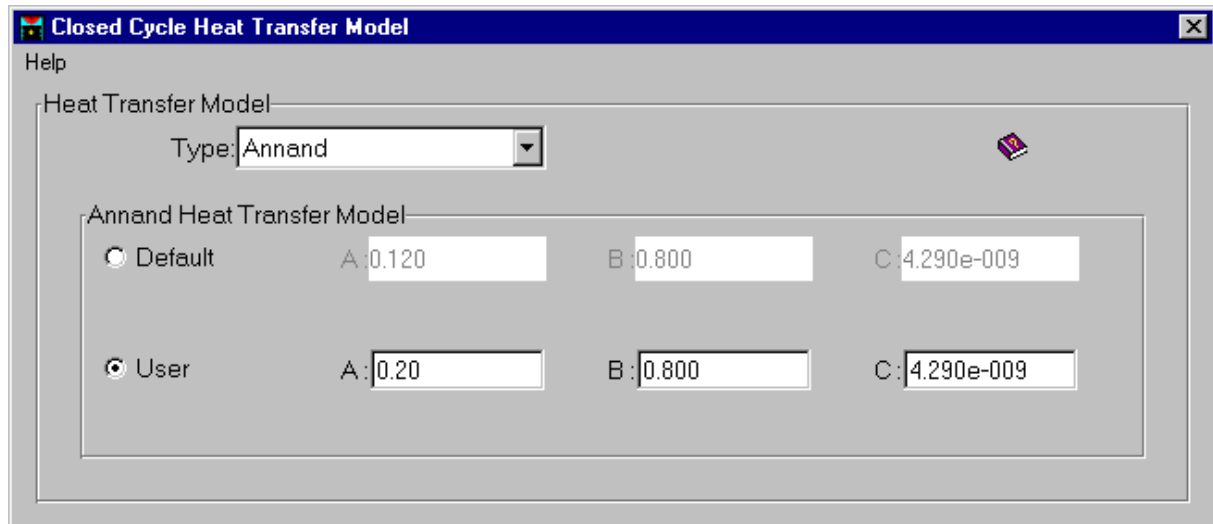


Figure. 2.5. Defining the closed cycle heat transfer model.

Use the **Help File** to discover the definitions of A, B and C coefficients in the Annand model. Click on the Help File icon shown below and click on the Theory link which is highlighted in green. Scroll down this window until you reach the section which defines the Annand equation.



Close the Help File window when you have read the section describing the Annand equation.

Close the Closed Cycle Heat Transfer Model window.

## Performing Basic Functions in the Builder Environment

Now that an element is present in the builder environment it is appropriate to explore some of the basic viewing functions which can be performed. The viewable area can be automatically scaled, so that all of the elements present in the builder environment are visible, by pressing the **Control-A** keys. Alternatively, pressing the right-mouse button in the builder environment when no element is in focus produces a menu from which the **Auto-scale** option can be selected. Performing this **auto-scaling** task should show the cylinder which was added and the green Fuel Element. The Fuel Element enables the user to define the fuel type and fuel system specification as described below.

Clicking on the magnify glass icon on the top tool bar enables the element to be zoomed in or out by moving the magnifying glass up or down respectively.



Particular areas of the model can be zoomed in on so that the selected region fills the viewable area by clicking on the right mouse button with no element in focus and selecting the **Zoom** option. This produces a 'cross-hair' which can be placed with the left-mouse button on the required point and dragged to encapsulate the region which is to be zoomed. The hand icon enables the model to be moved around within the viewable area.

## Adding Valves

Click on the **Intake Components** tab on the Tool Kit menu. Select the element at the top of this list – this is a poppet valve. Attach the valve to one of the connectors on the cylinder element as shown in Fig. 2.6.

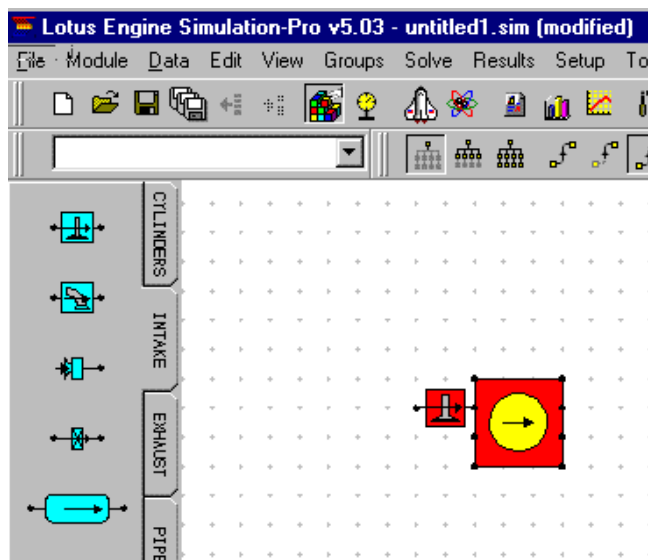


Figure. 2.6. Adding an intake valve.

The timing of this valve is to be changed. We shall make use of the **Help File** in order to discover the convention for setting the valve timings.

Using the information contained in the Help File set the intake valve opening (**Valve Open (deg)**) and closing (**Valve Close (deg)**) points to 15 degrees before top-dead-centre and sixty degrees after bottom-dead-centre, respectively. Having set these values, click on the **Valve Timing Display** button to give a visual check on the data – the window should appear as below. The timings can also be entered from the Valve Timing Display window.

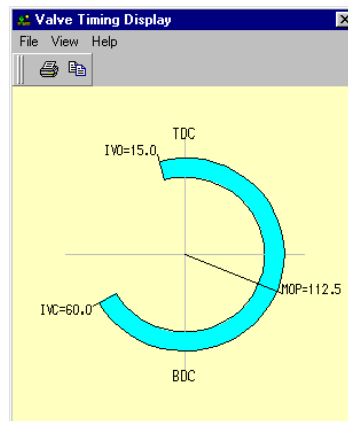


Figure 2.7. Intake valve timing.

Click on the **Exhaust Components** tab on the Tool Kit menu. Select the poppet valve element at the top of this list. Attach the valve to one of the connectors on the opposite side of the cylinder element to the intake poppet valve. You will notice that the background colour of the **Cylinder** element has changed to grey, indicating that the cylinder is now a fully connected element within the model.

Modify the exhaust valve timing to 40 degrees before bottom-dead-centre and 20 degrees after top-dead-centre for the opening and closing points, respectively. Clicking on the **Valve Timing Display** button now produces a diagram such as that shown in Fig. 2.8.

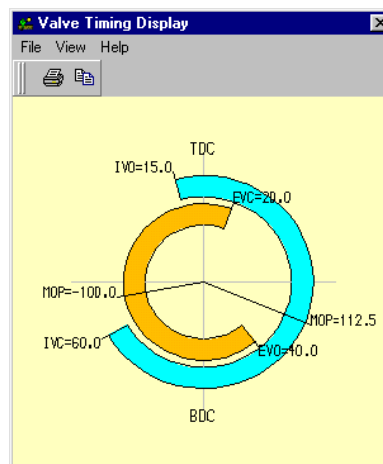


Figure 2.8. Intake and exhaust valve timing.

Note that it is conventional to define the Maximum Opening Point (MOP) as positive and negative for conventional inlet and exhaust valve timing, respectively, for a four-stroke engine. This is the point of maximum valve lift.

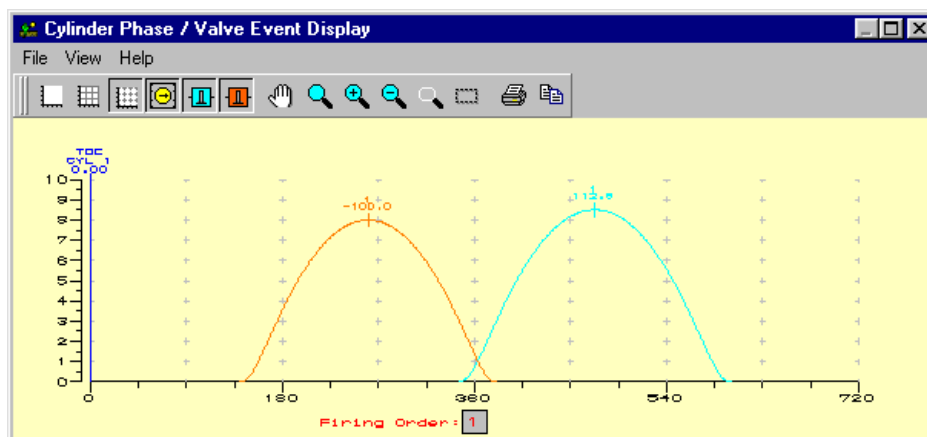


Figure 2.9. Intake and exhaust valve lift profiles.

A further visual check that the valve timing data is as intended is to click on the **Valve Event Display** button which should give the window shown below:

In this window the exhaust valve lift profile is shown in orange and that for the inlet valve is shown in blue.

## Adding Ports

Now select the exhaust **Port icon** from the Exhaust Tool Kit menu and connect it to the exhaust valve. Repeat the process for an inlet port. The use of separate valve and port combinations enables the user to try different cam and port combinations. The model should now appear as indicated below:

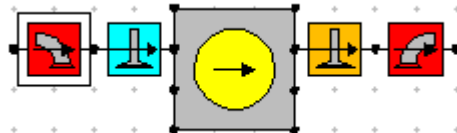


Figure 2.10. Connecting ports to poppet valves.

The click on the intake port icon and change the **Valve Throat Diameter** to 28. This number represents the diameter of each individual valve (port) throat in the region of the valve seat. Note that the number of valves specified (on the intake side of the cylinder) is 2. This means that it is not necessary to model the individual port duct leading to each valve. With basic four-valve engines this does not introduce any significant modelling inaccuracy if the individual ducts after the bifurcation are of equal length. The simulation will treat the port as a single duct with an equivalent diameter equal to the total of the two individual ducts. Note that the length of the port cannot be modelled using the port data – the port flow data simply constitutes a map of data which defines the size of the valve orifice at a given lift.

	L/D Ratio	Flow Coeff.
1	0	0
2	0.05	0.14
3	0.1	0.27
4	0.15	0.395
5	0.2	0.51
6	0.25	0.605
7	0.3	0.67
8	0.35	0.71
9	0.4	0.72
10	1	0.72
11		
12		

Figure 2.11. Port flow data – default good port.

Select the **Port Data** button from the property sheets. This reveals a table of port flow coefficients vs. valve lift / port throat diameter data ( $C_f$  vs. L/D – see Fig. 2.11) which can be viewed by clicking on the graph icon in the top right of the window.

The View / Autoscale command should be invoked if the graph cannot be seen or is not correctly scaled. Figure 2.12 shows how the data should appear. The data for this table is obtained via steady flow tests on the engine to be simulated or from an engine with similar port geometric details.

The port icons can only be attached to poppet valves.

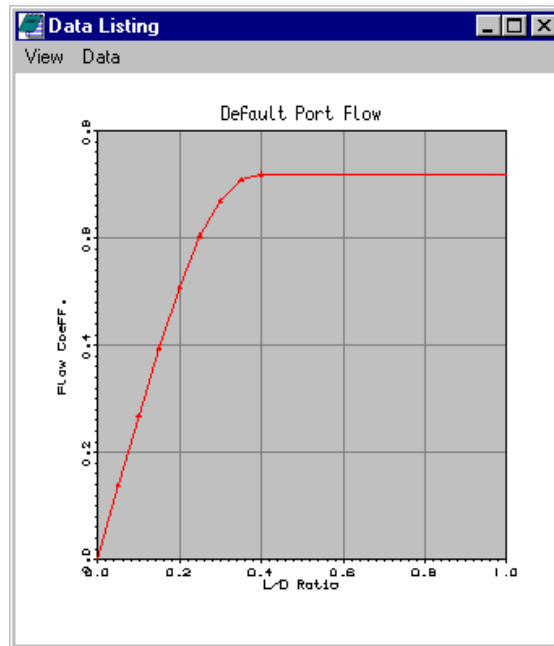


Figure 2.12. Variation of flow coefficient with valve lift / diameter ratio.

After closing the plot window shown in Figure 2.12 it is worth taking note of the menus which define the upstream and downstream elements which can be connected to the element in focus. Clicking on the inlet valve reveals the elements shown in the bottom right-hand corner of the interface screen, shown in Figure 2.13. This indicates that the upstream elements which can be connected to an inlet poppet valve are an inlet port and a virtual pipe (see later), whilst the downstream elements which can be connected to an inlet poppet valve are a cylinder and a virtual pipe.

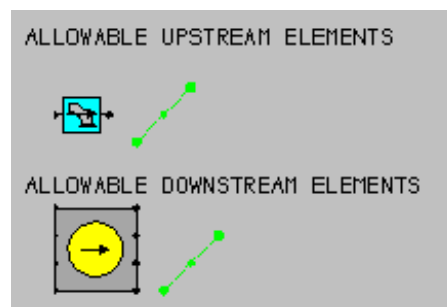


Figure 2.13. Connectivity permissions.

### Adding Inlet and Exit Boundaries

This extremely simple model can be completed by adding inlet and exit boundary conditions to the intake and exhaust ports. To do this select the intake tools tab and drag-and-drop an Inlet Element on to the builder area – attach this element to the intake port. Click on to the exhaust tool tab and attach an Exit Element to the exhaust port. The model should now appear as shown in Figure 2.14.



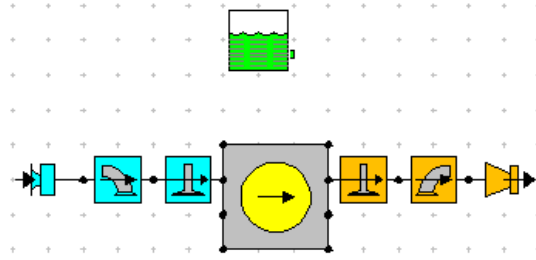


Figure 2.14. Complete model.

The model is now physically complete and it only remains to define the fuel and fuel system data operating conditions at which the engine simulation model is to run. The inlet and exit boundary conditions are defined when the Test Condition Data is set up (see below).

### Defining the Fuel and Fuel System

The fuel type and properties are defined by clicking on the Fuel Element shown in Figure 2.14. The property sheet associated with the fuel element is shown in Figure 2.15.

Label	
Fuel System	Port Injection
Fuel Type	Gasoline
Calorific Value (kJ/kg)	43000.0
Density (kg/litre)	0.7500
H/C Ratio Fuel (molar)	1.800
O/C Ratio Fuel (molar)	0.000
Molecular Mass (kg/k.mol)	114.230
Maldistribution Factor	1.000

Figure 2.15. Property sheet for fuel element.

Various default fuel types and fuel systems are available. The Help File lists the options and describes the property data. In this example we will use the default Gasoline as the **Fuel Type** and select Port Injection as the **Fuel System**. The port-injection option implies that the air and fuel enter the cylinder pre-mixed in the ratio specified in the Test Conditions Data described below.

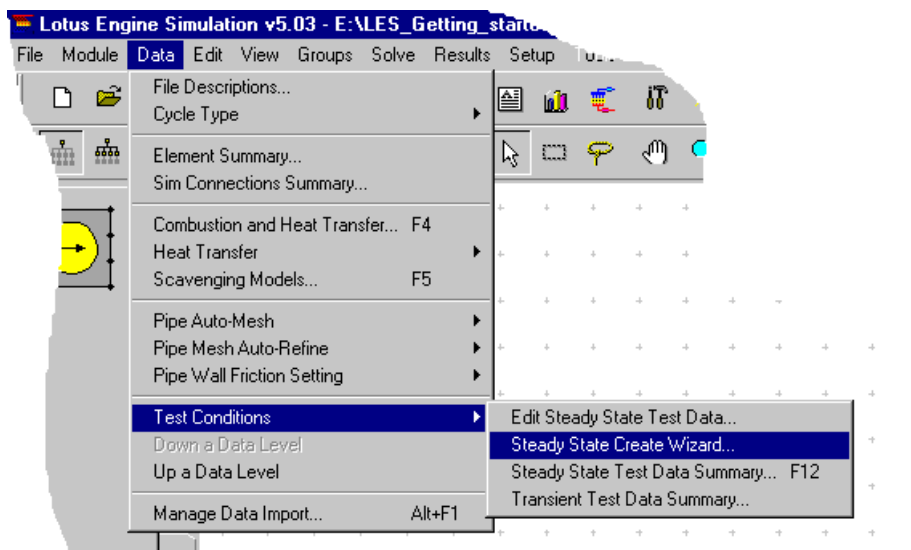


Figure 2.16. Accessing the Test Conditions Data Wizard.

## Defining Steady State Test Condition Data

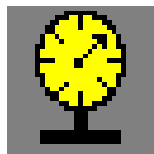
The engine operating points that the simulation model is required to mimic can be set up most efficiently using the **Test Conditions Wizard**. This wizard is accessed via the **Data / Test Conditions / Create Wizard** option from the drop-down menu at the top of the screen.

Clicking on the Create Wizard option generates the input data Wizard shown in Figure 2.17.

Figure 2.17. Create Wizard for Test Condition Data

Set the desired engine speed range by changing the **No. of Tests** to 7 and the **Max. Speed (rpm)** to 7000. Also set the **Exit Pressure** (exit boundary pressure) to 1 (bar abs.) and the **Equivalence Ratio** to 1.1. Click **Apply**.

The test conditions which have been generated can be viewed or edited from the window produced by clicking on the Test Data – Summary icon shown below.



Test Point	Speed (rpm)	Solve	Label
1	1000	On	Load Case 1 - ( Created by Test Wizard )
2	2000	On	Load Case 2 - ( Created by Test Wizard )
3	3000	On	Load Case 3 - ( Created by Test Wizard )
4	4000	On	Load Case 4 - ( Created by Test Wizard )
5	5000	On	Load Case 5 - ( Created by Test Wizard )
6	6000	On	Load Case 6 - ( Created by Test Wizard )
7	7000	On	Load Case 7 - ( Created by Test Wizard )

Figure 2.18. Test Data Summary window.

The top tabs can be used to move through the different data sections that have been created. The wizard has generated and defined some data which is not controlled by the selections made in the wizard. This additional data includes 'heat release' parameters which, for the gasoline engine we have generated, consists of defining the point of 50% mass fraction burned and the 10%-90% mass fraction burned period. A default relationship for calculating the engine friction has been selected. This is necessary in order for LOTUS ENGINE SIMULATION to predict 'brake' output parameters (torque, power, specific fuel consumption, BMEP). Note that the default models (in this case the Barnes-Moss model) estimate only the mechanical friction of the engine – the simulation code predicts the pumping work.

Close this window after checking that the test conditions have been generated as intended.

### Setting the Names of the Results Files

In order to save the simulation results to unique file names click on the **File Descriptions** section of the **Data** menu list shown in Figure 2.16. This generates the window shown in Figure 2.19. Enter the text shown.

**File Text Descriptors**

Main Title  
Simple single cylinder engine

Sub Title  
model with no pipes

Test No. (must be a SINGLE word)  
tutorial\_1

OK Cancel

Figure 2.19. File Descriptions window.

The **Main Title** and **Sub-Title** names appear at the top of the results text file. The **Test No.** string which is entered is used to name the results files produced by the code. Click **OK** to close this window.

### Saving a Model

This is probably an appropriate juncture at which to save the model. Click on the Save Data to File icon and save the file to the directory of your choice as **tutorial\_1.sim** (note that the .sim extension will be added automatically on saving).

## Running a Model

The model can be run by clicking on the LOTUS ENGINE SIMULATION solver control icon shown below



This produces the window shown in Figure 2.20. Enter a text string in the **Label** box. This will allocate the text string entered to the job name displayed in the Job Status window (accessed from the tab shown in the **Lotus Engine Simulation Solver** window). Select **Currently Held Data** – this will run the model which has just been built in the interface. Select **Use testno** – this fills the two text boxes below the widget with the text string entered in the Test No. text box shown in Figure 2.19.

Click on the launch icon at the bottom of the window to submit the job.

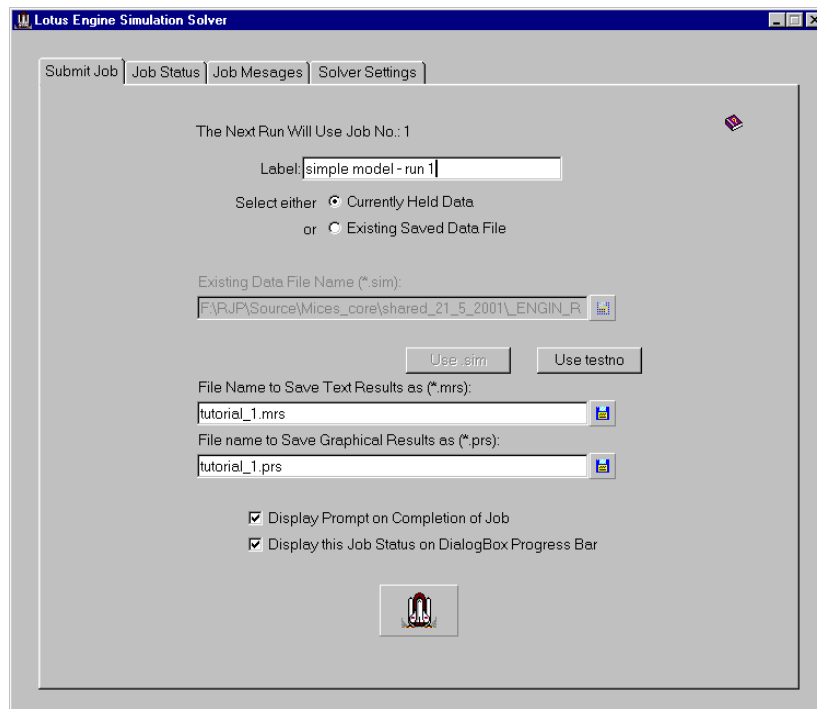


Figure 2.20. The Lotus Engine Simulation Solver window

Submitting the job will open the *solver runtime window* shown in Figure 2.21. Minimise this window by clicking on the minimise tab. **Do not close the window as this will stop the job from running.**

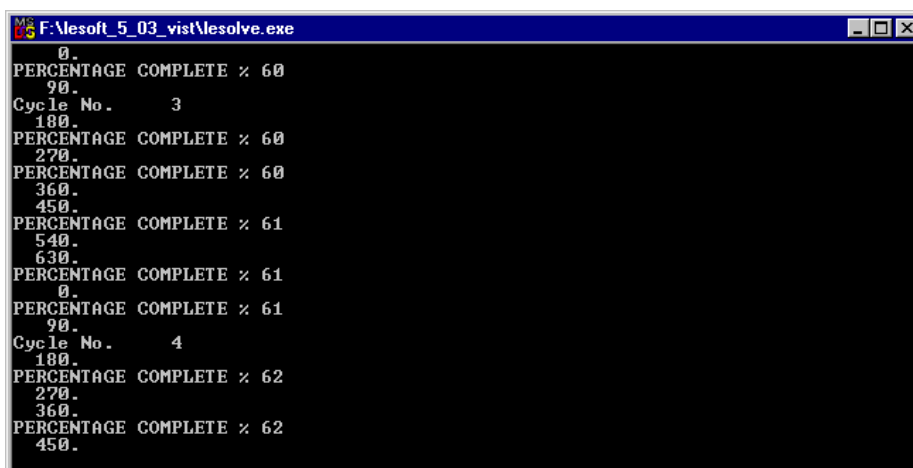


Figure 2.21. Solver runtime window produced on submission of job.

## Monitoring the Progress of a Job

Click on the **Job Status** tab on the LOTUS ENGINE SIMULATION *solver runtime* window. This will produce a window as shown in Figure 2.22.

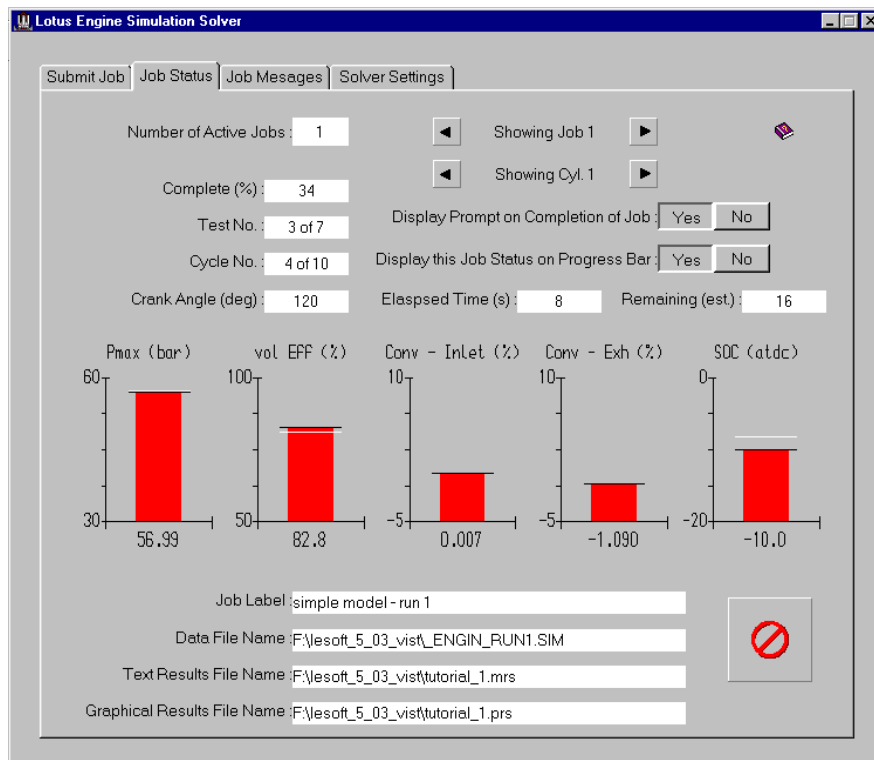


Figure 2.22. Job Status window.

The Job Status window provides a means of monitoring the progress of a simulation job. The top text box indicates the **Number of Active Jobs** being run by LOTUS ENGINE SIMULATION. The arrow tabs to the right of this box enable the user to display information regarding the different jobs being run (in this case only one job has been submitted).

Various measures of the progress of the job are displayed, including the **Test No.**, **Cycle No.**, and the **Crank Angle** position within the cycle. The **Elapsed Time** and an estimate of the **Remaining** time are also displayed.

The five red bars which appear after the first cycle simulated are cycle-averaged parameters from which the user can obtain an impression of the viability of the run. Eg. The maximum cylinder pressure (**Pmax**) and volumetric efficiency (**Vol Eff**) values are updated every engine cycle and indicate whether the run is progressing in a satisfactory manner.

At the end of the run the window shown in Figure 2.23 will appear on the screen and the Job Status window will display the 'Job Complete or Not Current' message. This prompts the user to load the simulation results into the various post-processing options within LOTUS ENGINE SIMULATION. Tick the boxes to **Load Text Results (.mrs)** and **Load Graphics Results (.mrs)**. This places the .MRS results file, which contains all the relevant cycle-averaged data into the dedicated text reader and graphical facilities. The .PRS results will be discussed in a later tutorial – leave this box un-ticked. Click **Load**. Now close the **Lotus Engineering Simulation Solver** window shown in Figure 2.22.

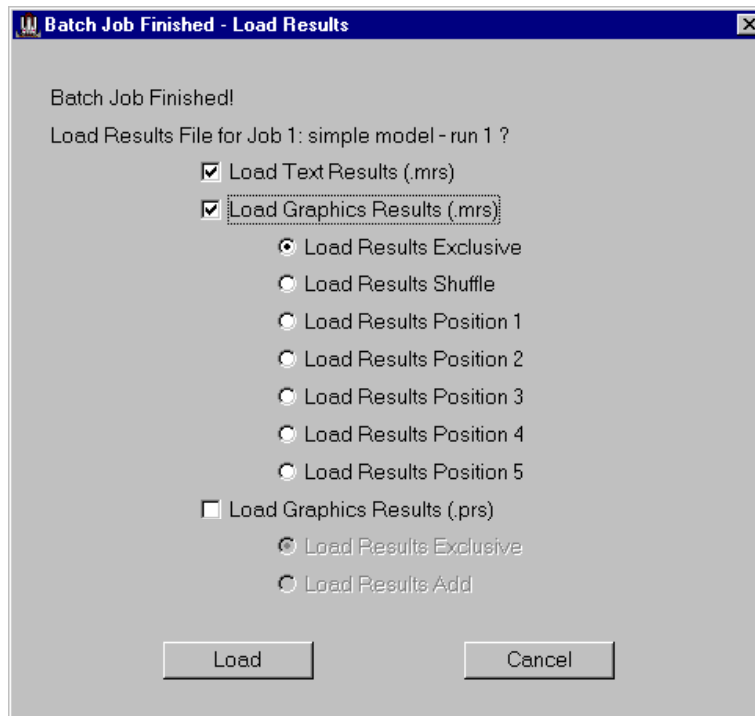


Figure 2.23. Batch Job Finished window.

### Displaying the .MRS Results – Text Viewer

The .MRS file contains all the cycle-averaged results from the engine simulation, such as brake torque, brake power, volumetric efficiency, BMEP, BSFC, and heat rejection data. This file can be displayed in a dedicated text file viewer by clicking on the icon shown below on the top tool bar.



The data at the top of the .MRS file summarises the input data – this information can be used by the user in order to identify the results and to ensure that the input data has been submitted as intended. At the end of the input data summary section the results for each Test Point, or operating condition, are given. For each test point the operating conditions and boundary conditions are printed first. Detailed information regarding mass flow rates through the valves of each cylinder (only a single-cylinder is present in this case) is then provided, including the volumetric efficiency of each cylinder<sup>1</sup>. The trapped conditions within each cylinder are then given, followed by a 'Performance Section' where the IMEP, FMEP, BMEP, and power values are given for each cylinder. Fuel consumption and efficiency values for each cylinder are then provided, before a Performance Summary table is written to the file. In addition, bulk heat transfer data for each cylinder is provided. The Miscellaneous Data and Results section contains component resolved heat transfer data for the cylinders and the heat transfer distribution down pipes (there are no pipes in the model considered in this tutorial). Combustion data is also written to the file in this section. This is followed by a listing of the mass flow convergence results (see a later tutorial) and a summary table of the total engine performance parameters. The remaining portion of the file consists of a copy of the input data file, which may, if desired, be re-loaded. A sample of the .MRS text file is shown in Figure 2.24.

<sup>1</sup> Volumetric efficiency is defined as the ratio of the mass of air and fuel trapped in the cylinder when the intake valve closes to the mass of air and fuel which could be trapped in the cylinder at a reference temperature and pressure. The reference condition is usually taken as the ambient conditions for naturally aspirated engines. Intake plenum conditions are sometimes used for pressure charged engines.

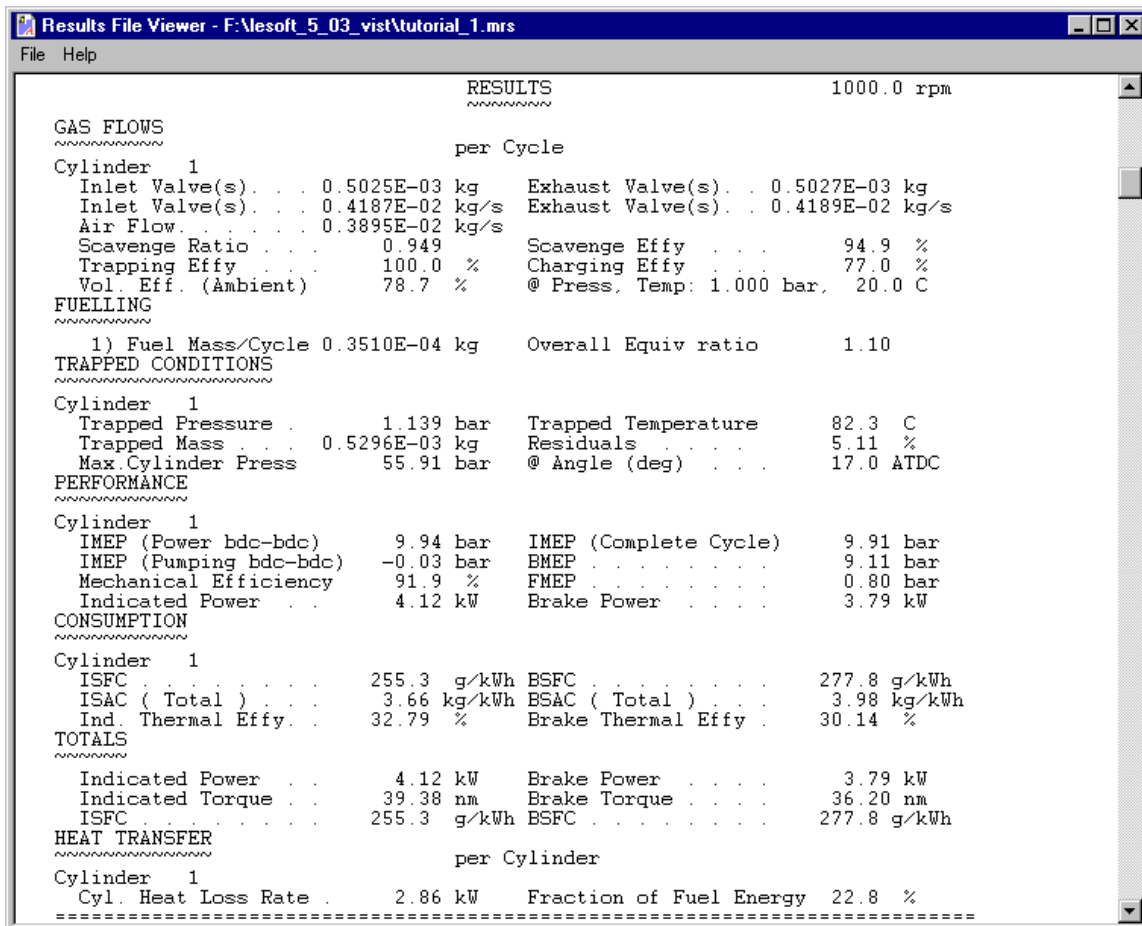


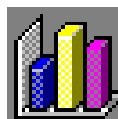
Figure 2.24. Screen shot of the .MRS file.

Take some time to familiarise yourself with the information contained in this file.

Note that the .MRS file is in ASCII format and can be read into any text editor such as WordPad.

## Displaying the .MRS Results – Graphical Viewer

A dedicated graphical viewer is provided in LOTUS ENGINE SIMULATION in order display the .MRS results. The .MRS file can be viewed by clicking on the icon shown below.



This produces the window shown in Figure 2.25. Select the **Autoscale** option from the **View** menu within this window.

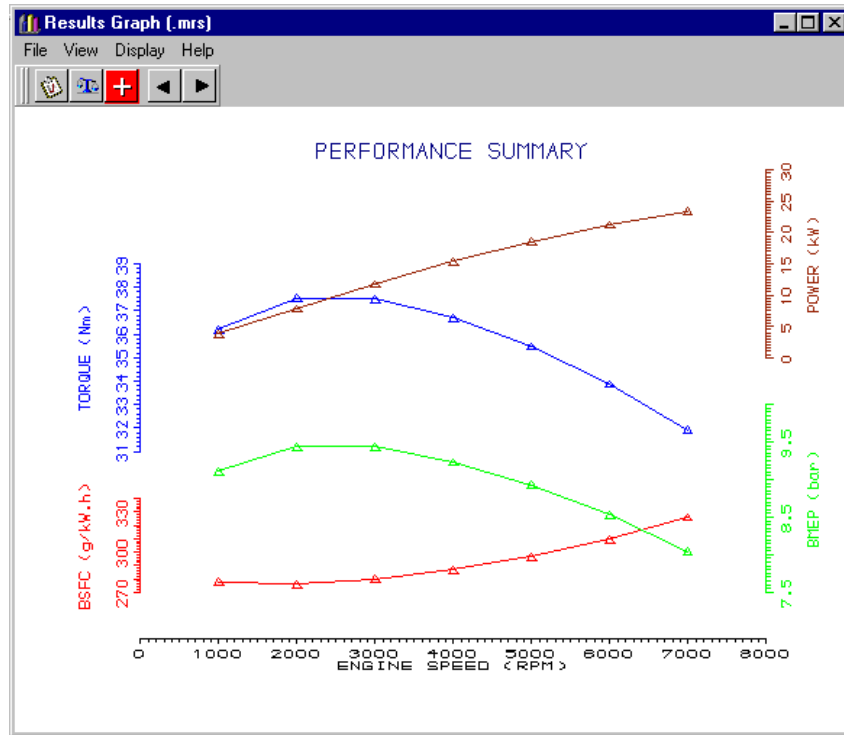


Figure 2.25. .MRS Results Graphical viewer.

The first plot which can be viewed (see Figure 2.25) shows the BSFC (brake specific fuel consumption), BMEP (brake mean effective pressure), Torque, and Power produced by the engine. It can be seen that there is a gently increasing power output from the engine as the speed rises. The torque curve peaks at about 2000 rev/min. This performance characteristic is typical of an engine with no pipes.

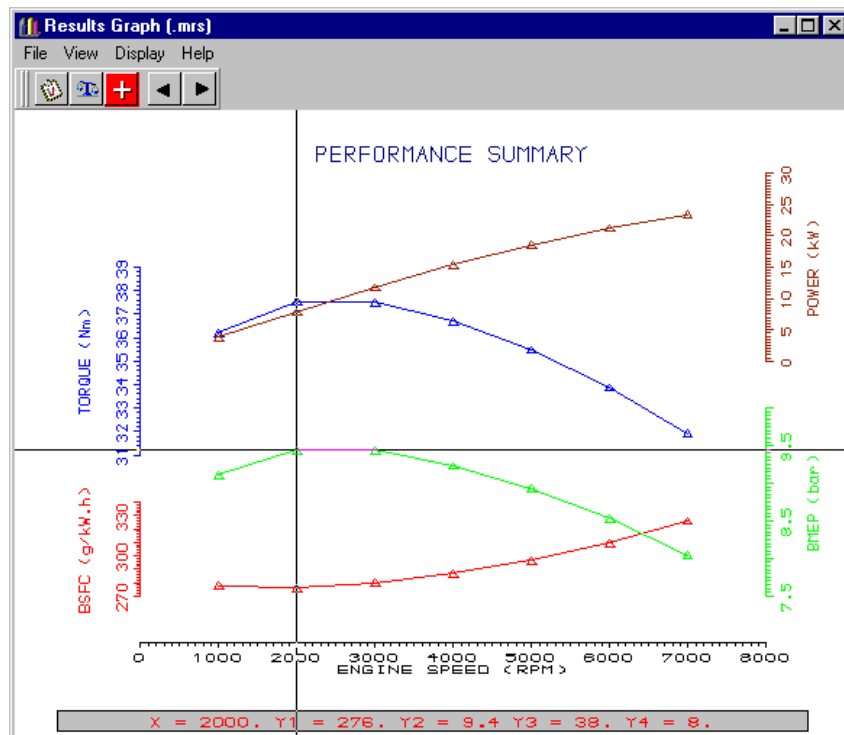


Figure 2.26. Listing a point on the .MRS graph.



Now click on the List Point option from the View menu on the .MRS plotting window. This produces a 'cross-hair' which can be placed over any point on the window to interrogate a precise value from the graphs as shown in Figure 22.26. Clicking the left-mouse button causes the values to appear. Clicking the right-mouse button releases the cross-hair. The values appear at the bottom of the window. In the case shown in Figure 22.26 the X-axis is the engine speed (the point selected is 2000 rev/min) and the Y-axis numbers relate to the four graphs shown in order of ascending height on the page: Y1 = BSFC; Y2 = BMEP; Y3 = Torque; Y4 = Power.

Confirm that the BMEP value at 2000 rev/min is 9.4 bar.

Remember to click the right-mouse button to release the cross-hair before moving to the next 'page' in the .MRS graphical viewer screen. The arrow buttons in the top left-hand corner of the screen can be used to move through the different data screens which can be displayed.

Click on the **right-arrow** to display the second screen. Click on **Autoscale** from the **View** menu. This screen shows the variation of inlet boundary pressure, volumetric efficiency, inlet boundary temperature, and plenum pressure with engine speed. In this model there is no plenum. Clicking on the right-arrow reveals the next screen which shows the same data for the exhaust system. The next screen shows the variation of combustion related parameters with engine speed, including the angles of 10%, 50%, and 90% mass fraction burned, and the maximum cylinder pressure.

This concludes the first tutorial.

# 2

## Tutorial 2. 'Basic Single-Cylinder Engine Model With Intake Pipes'

### Overview

This tutorial shows the user how to add pipes to the basic single-cylinder model developed in Tutorial 1. The .MRS results are compared with those from Tutorial 1 in order to highlight the dramatic effect which the intake pipe has on the engine performance.

Displaying the .PRS results is described and the user is taken through the procedure for generating animations using these results.

The chapter contains the following sections:

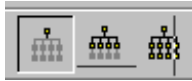
- Re-Naming a Model, 28
- Adding Pipes, 28
- Changing Plotting Options, 30
- Examining the .MRS Results, 31
- Comparing the .MRS Results with the Tutorial 1, 32
- Displaying the .PRS results, 34
- Animating .PRS Results, 36
- Exercise, 39

## Re-Naming a Model

With the model **tutorial\_1.sim** loaded into LOTUS ENGINE SIMULATION click on the **Save As** option from the **File** menu and create a new model called **tutorial\_2**.

## Adding Pipes

We wish to insert pipes between the port icon and the inlet boundary icon. In order to be able to detach a single element from other elements the **Move Element Singularly** Icon on the left-hand side of the group of icons shown below should be depressed.



Click on the **Zoom** icon and zoom out a little. Click on the inlet element and move it to the left of the builder environment as shown in Figure 3.1.

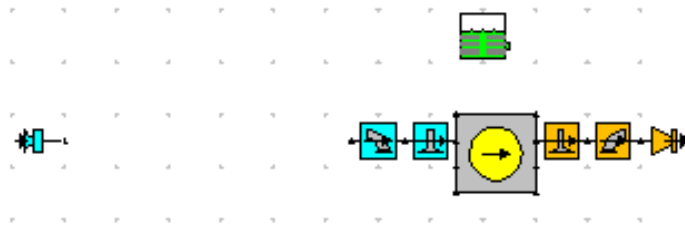


Figure 3.1. Detaching the inlet element.

Now click on the Pipes tab on the Tool-Kit. Click on a (black) pipe from the top of the menu and drop, by clicking the left-mouse button, the left-hand end about  $\frac{1}{4}$  of the way between the port icon and the inlet element. Then attach the right-hand end of the pipe to the port icon by clicking again the left-mouse button. Pressing Control-A will bring the model into a fuller view now. The model should appear as shown in Figure 3.2. Note that the green pipes on the pipe tool kit tab are virtual pipes which only imply commonality of connection points which they link together.

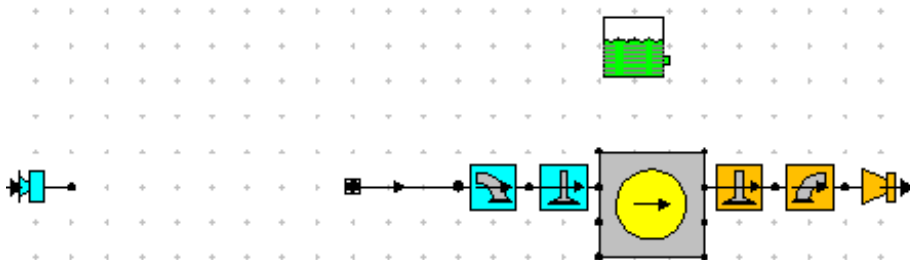


Figure 3.2. Model with pipe attached to port icon.

The intention is to modify the properties of this pipe so that it represents the physical extent of the port. Click on the pipe and change the **Total Length** in the pipe property sheet to 100 mm. Note that the **No. of Meshes** has been set to 7 by the automatic meshing option which is turned on by default. Now change the **Start Diameter** and **End Diameter** to 39 mm. Change the **Wall Thickness** to 4 mm and the **Cooling Type** to water cooled. You will notice that the **Temperature** and **Ext. HTC** values have been changed to 99.85 deg. C and  $5000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . The water cooled pipe option assumes that the pipe is entirely surrounded by cooling water and these values define the temperature and convective heat transfer coefficient for the coolant. These values can also be defined by the user if they differ from the defaults.

Note that the **Wall Material** is set to aluminium – this fixes the Thermal Conductivity of the pipe wall which is used in the heat transfer calculation in the pipes.

A further feature to note on the pipe property sheet is that the **Wall Factor Type** is set as Default Surface Roughness – this implies that a default surface roughness value has been assigned to the pipe wall which is then used by the code to infer a pipe wall friction factor from a curve fit to the Moody diagram (which portrays pipe wall friction factor against Reynolds number as a function of pipe wall surface roughness). Click on the cactus icon to display a schematic of the pipe which has been created (see Figure 3.3).

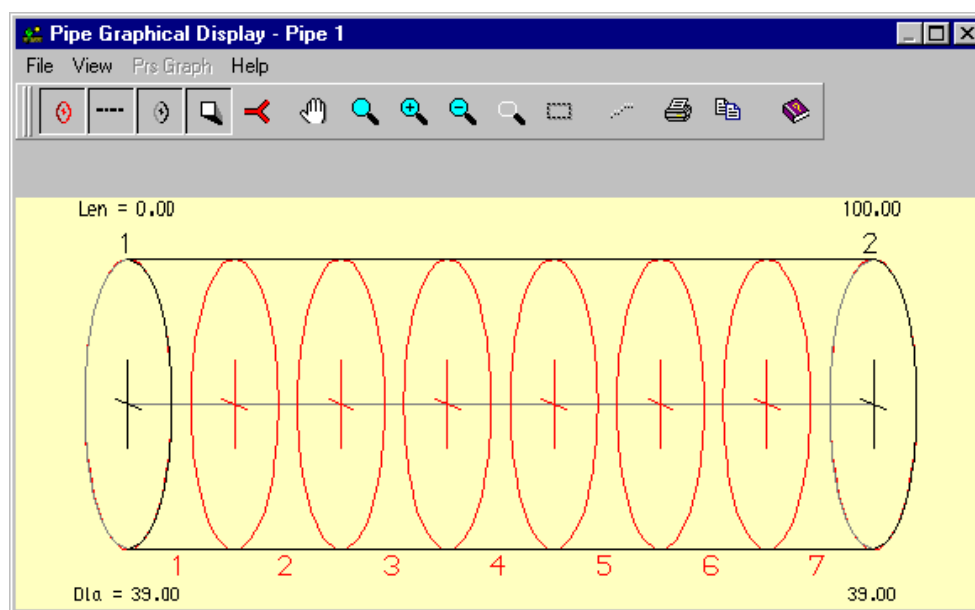


Figure 3.3. Schematic diagram of pipe.

The red circles represent pipe mesh-points. The black circles indicate points at which the pipe diameter values have been defined.

Close this window.

We now wish to add a pipe to represent the intake runner of the engine which extends from the cylinder head outwards. This pipe will be surrounded by ambient air.

Repeat the procedure described above for inserting a pipe on to the builder interface.

Click on the pipe and change the **Total Length** in the pipe property sheet to 350 mm. Now change the **Start Diameter** and **End Diameter** to 39 mm. We will accept the default wall thickness of the pipe and the cooling type.

The model should now appear as shown in Figure 3.4.

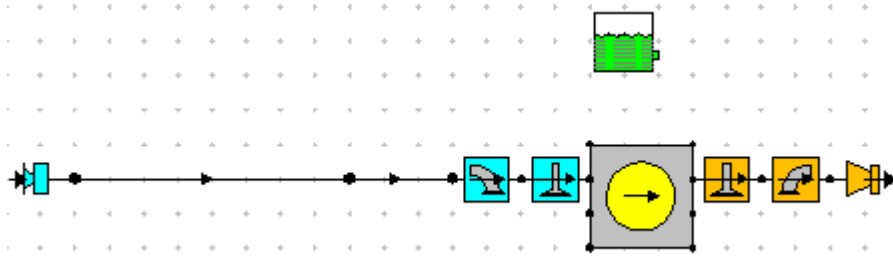


Figure 3.4. Single-cylinder model with port and inlet runner pipe.

### Changing Plotting Options.

Before running the model we will select an output data option which will allow us to look at the instantaneous variation of gas properties in the inlet system.

Select the **Data / Test Conditions / Edit Steady State Test Data Summary** option from the drop down menu at the top of the screen. Click on the **Plotting** tab in the screen shown in Figure 3.5

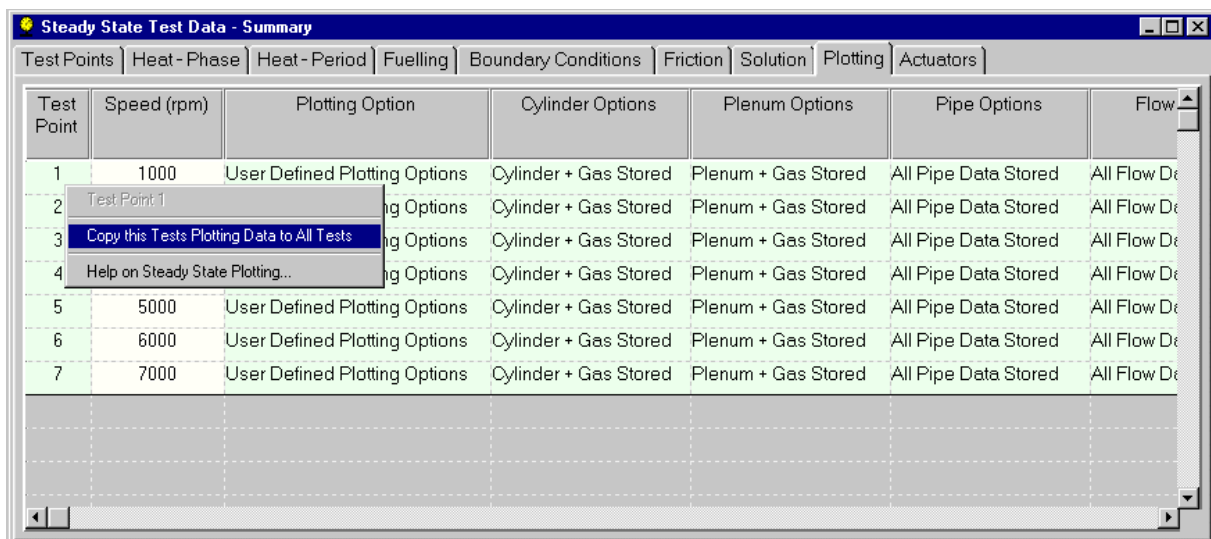


Figure 3.5. Plotting options window in Test Conditions Data window.

Select **User Defined Plotting Options** from the *Plotting Option* selection box and choose **All pipe data stored** from the *Pipe Options* selection box. Then click on the **Copy this Tests Plotting Data to All Tests** button at the top right-hand side of the plotting window. This will affect the amount of data which is written to the **.PRS** plotting files which contain all the data which may vary on an intra-cycle basis.

Close the Test Conditions Data window

Select the **File Descriptions** Option from the **Data** menu and change the text in the **Test No.** box to tutorial\_2. Click **OK**.

### Now Save the model.

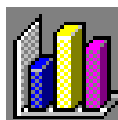
Run the model by following the same procedure described in Chapter 2. Click on the **Use Test No.** option in the Lotus Engine Simulation Solver window in order to define the file names for the **.MRS** and **.PRS** files and submit the job.

Minimise the solver runtime window produced and click on the **Job Status** tab on the Lotus Engine Simulation Solver window in order to monitor the progress of the simulation.

At the end of the run the window shown in Figure 2.23 (Chapter 2) will appear on the screen and the Job Status window will display the 'Job Complete or Not Current' message. This prompts the user to load the simulation results into the various post-processing options within LOTUS ENGINE SIMULATION. Tick the boxes to **Load Text Results (.mrs)**, **Load Graphics Results (.mrs)**, and **Load Graphics Results (.prs)**. This places the **.MRS** results file, which contains all the relevant cycle-averaged data, and the **.PRS** file, which contains all the intra-cycle data, into the dedicated text reader and graphical facilities. Click **Load**. Now close the **Lotus Engineering Simulation Solver** window shown in Figure 2.22.

## Examining the Results

Click on the .MRS file viewer icon (shown below) and **Autoscale** the plots (**View / Autoscale**):



This will produce the results shown in Figure 3.6.

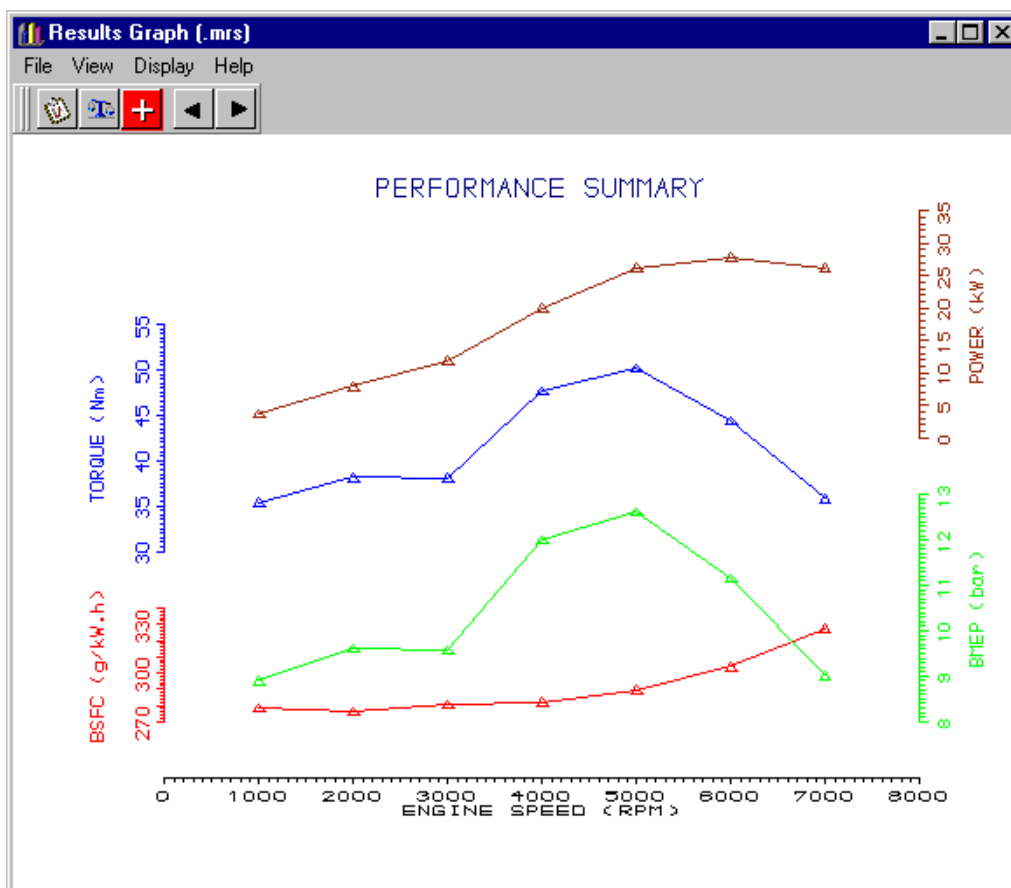


Figure 3.6. Results for model with inlet pipe.

Note that there is now a pronounced peak in the torque curve at 5000 rev/min. This is the effect of the intake system tuning phenomenon which increases the pressure across the intake valve at engine speeds which excite the gas in the inlet system at its resonant frequency.

### Comparing the Results with Tutorial 1

It is instructive to compare the results predicted by the code for this model with those produced in the previous tutorial. In order to do this click on the **File / Load Results (shuffle)** option from the top menu and select **tutorial\_1** from the browser. Then click on **Open**. This will place both sets of results on the same set of graphs as shown in Figure 3.7.

The large improvement in the performance of the engine at high engine speeds is immediately apparent. The peak BMEP value for the model with no pipes is 9.4 bar at 2000 / 3000 rev/min whereas the peak value for the model with the inlet runner pipe is 12.6 bar at 5000 rev/min – a 34 percent improvement!

The actual data values for the two sets of results can be accessed from the performance summary from the text file viewer or by listing lines from the .MRS file viewer. Before using this latter approach it is prudent to change the number of decimal points listed in the power data. This is done by clicking on the **Axis Scales** option from the **View** menu as shown in Figure 3.8. Type a 1 in the **Y-Axis 4** box. This will give the power values to one decimal place. Click **Refresh** and close the window.

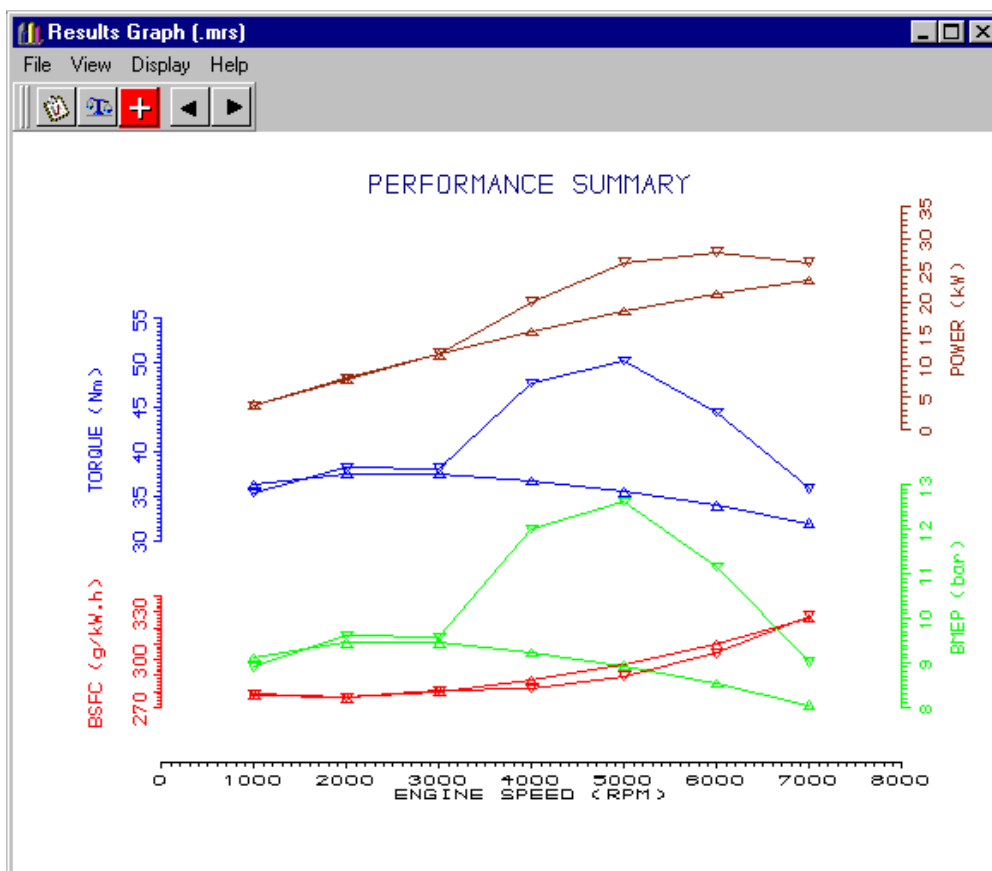


Figure 3.7. Comparison of .MRS results.

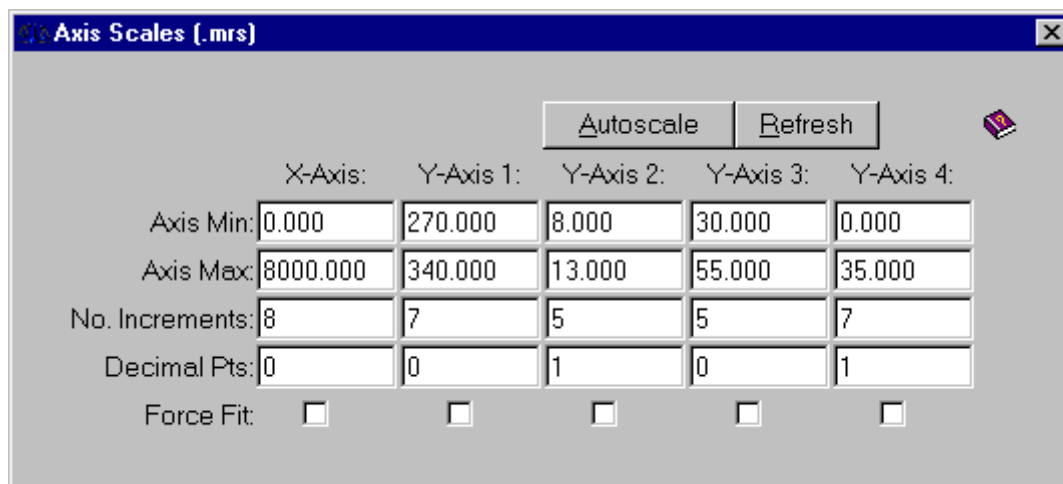


Figure 3.8. Changing the number of decimal places on a line.

Now click the **View / List Line(s)** option to reveal the screen shown in Figure 3.9.

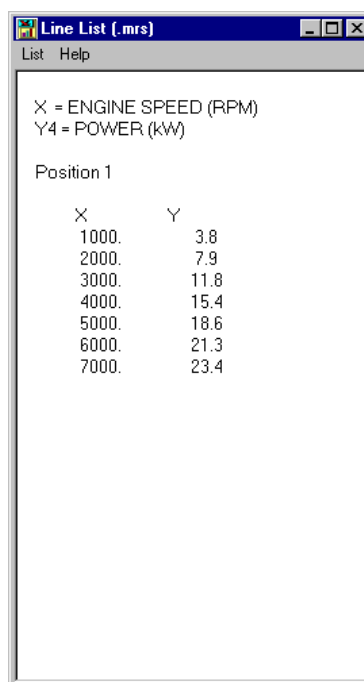


Figure 3.9. List line values.

Selecting the **List / Graph / Graph 4** option displays the power results from the model constructed in Tutorial 1.

Selecting the **List / Position / Position 2** option displays the power results from the model constructed in this tutorial.

Calculate the percentage increase in peak power.

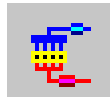
Close the List line and .MRS viewer windows.



### Displaying the .PRS Results

We can examine some of the phenomena which contribute to the substantial improvement in engine performance when the intake pipe is added by displaying the .PRS results.

Switch the interface to the .PRS viewer by clicking on the icon shown below.



Type **Control A** to autoscale the model in the viewing environment.

Click on the **red dot (mesh point) closest to the intake valve** and move the cursor over the graphs on the right-hand side of the screen. Click the **right-mouse button** and select the **Autoscale All Graphs** option. Also from the **right-mouse button** menu select **Show Valve Event Lines**. The default graphs show the variation in pressure, temperature, mass flow rate, and velocity at the point selected (see Figure 3.10). The engine speed at which the results were obtained is displayed in the bottom left-hand corner of the model display window (in the case 1000 rev/min). The two orange vertical lines indicate the exhaust valve opening and closing points respectively (from left to right), and the blue vertical lines represent the intake valve opening and closing points respectively.

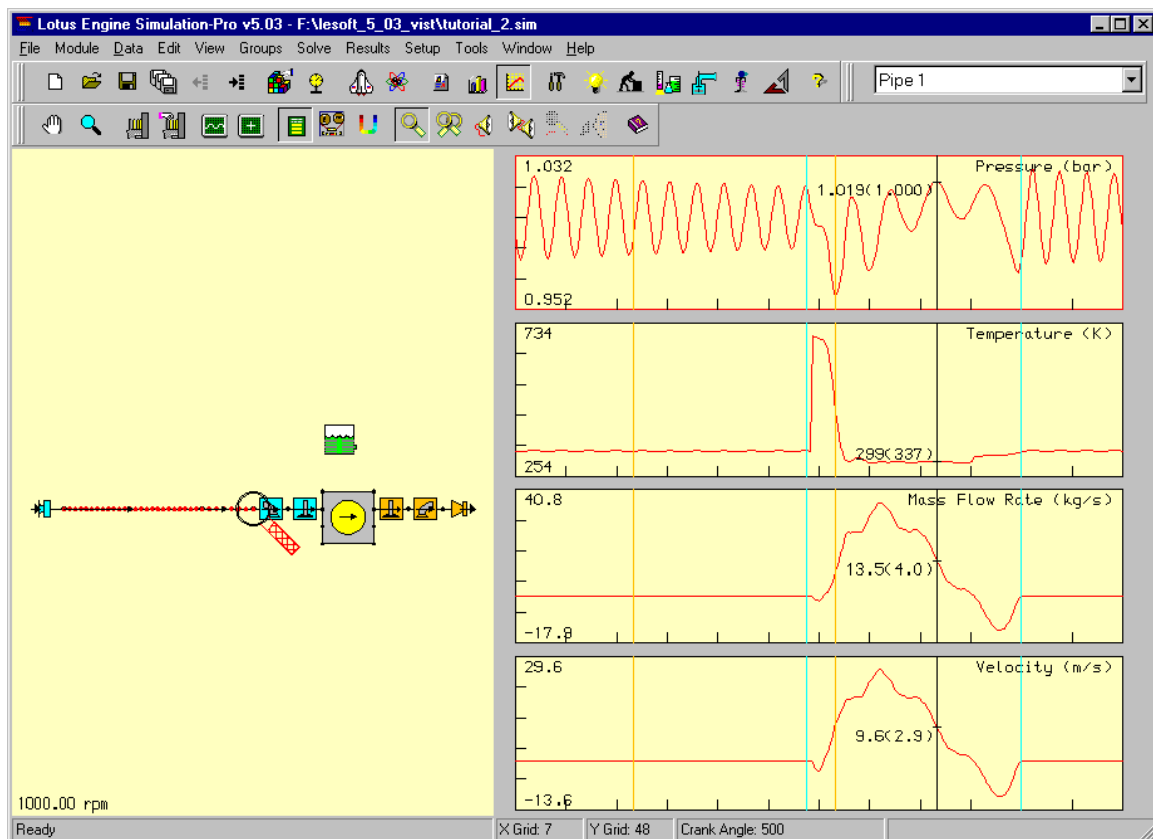


Figure 3.10. Gas property variations at the intake valve – 1000 rev/min.

Clicking on these graphs at various points moves the black vertical line, next to which is given the value of the results at the point (crank angle point) selected (indicated in the text box below the graphs). The mean values of each line can be displayed next to the current value by selecting **Display Graph Mean Values** from the right-mouse button menu.

The curves shown can be appreciated better with respect to the open and closed periods of the cylinder with respect to the intake valve. To the left of the left-hand blue line (IVO) and the right of the right-hand blue line (IVC) is the period during which the intake valve is closed. The pressure variation is characterised by an almost sinusoidal wave of decaying amplitude. In between these two lines the intake valve is open.

Note the large increase in the temperature at the intake valve in the valve overlap period (between IVO and EVC) – this is caused by hot gas flowing back from the cylinder into the intake pipe during this period, as can be seen from negative values in the mass flow rate and velocity diagrams.

We now wish to load in the results for 5000 rev/min (the peak torque speed). Click on the **PRS Results File Status** icon shown below.



This produces the window shown in Figure 3.11. The **Single Speed** option has been selected by default. Use the **right-arrow button** to move through the speeds until speed **5 of 7** is reached. Now click on **Apply** and **close** the PRS Results File Status window.

From the right-mouse button menu select Autoscale All Graphs. This will change the display to be similar to that shown in Figure 3.12.

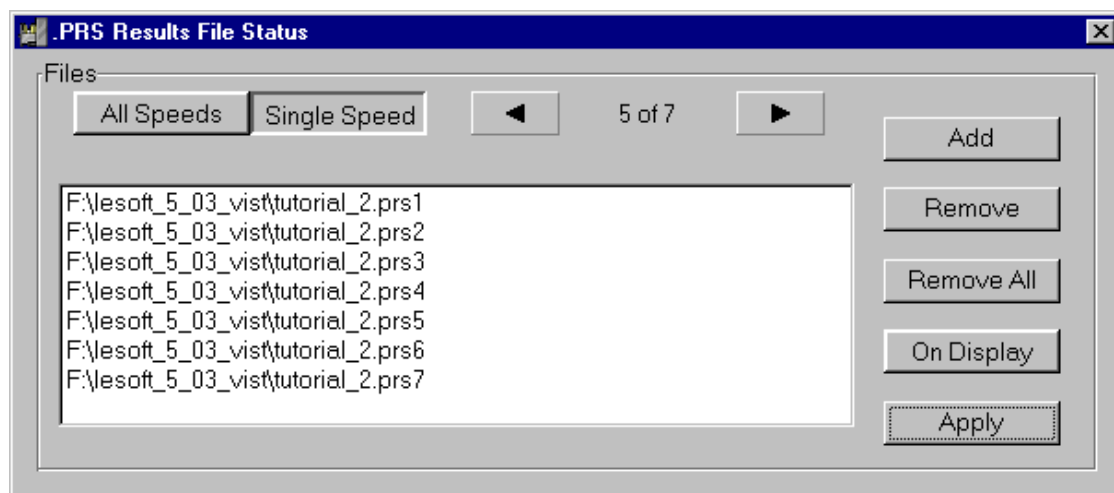


Figure 3.11. PRS results file status window.

Note that there are now fewer oscillations in the pressure trace because the time for the propagation of the pressure waves to occur is diminished. It is easier to gain an appreciation of the basic intake tuning mechanism by studying the gas property variations at this engine speed and this is explained below.

The periodic charging and discharging of the cylinders, together with the pressure increase generated during the combustion process, gives rise to highly unsteady flow in the manifolds of reciprocating engines. In a four-stroke engine, at the beginning of the induction process, the downward motion of the piston creates a reduction in cylinder pressure which gives rise to the propagation of a rarefaction wave into the intake runner pipe. This is manifested in the low pressure region between the IVO line and the black line in Figure 3.12. The reflection of this wave at the end of the inlet runner pipe creates a pressure wave which, if it arrives back at the inlet valve in the period between bottom-dead centre and the point of inlet valve closure (as in Figure 3.12), can augment the trapped mass of air in the cylinder. By managing this mechanism the major features of the engine torque characteristic can be manipulated.

Note that the waves in the closed period are now distorted decaying sinusoids – the wave profiles have changed because they are non-linear. This means that the high pressure points on a wave front travel faster than the low pressure points. Hence the wave fronts steepen-up. Also note that there is now no reverse flow from the cylinder into the intake pipe at the start of the induction event.

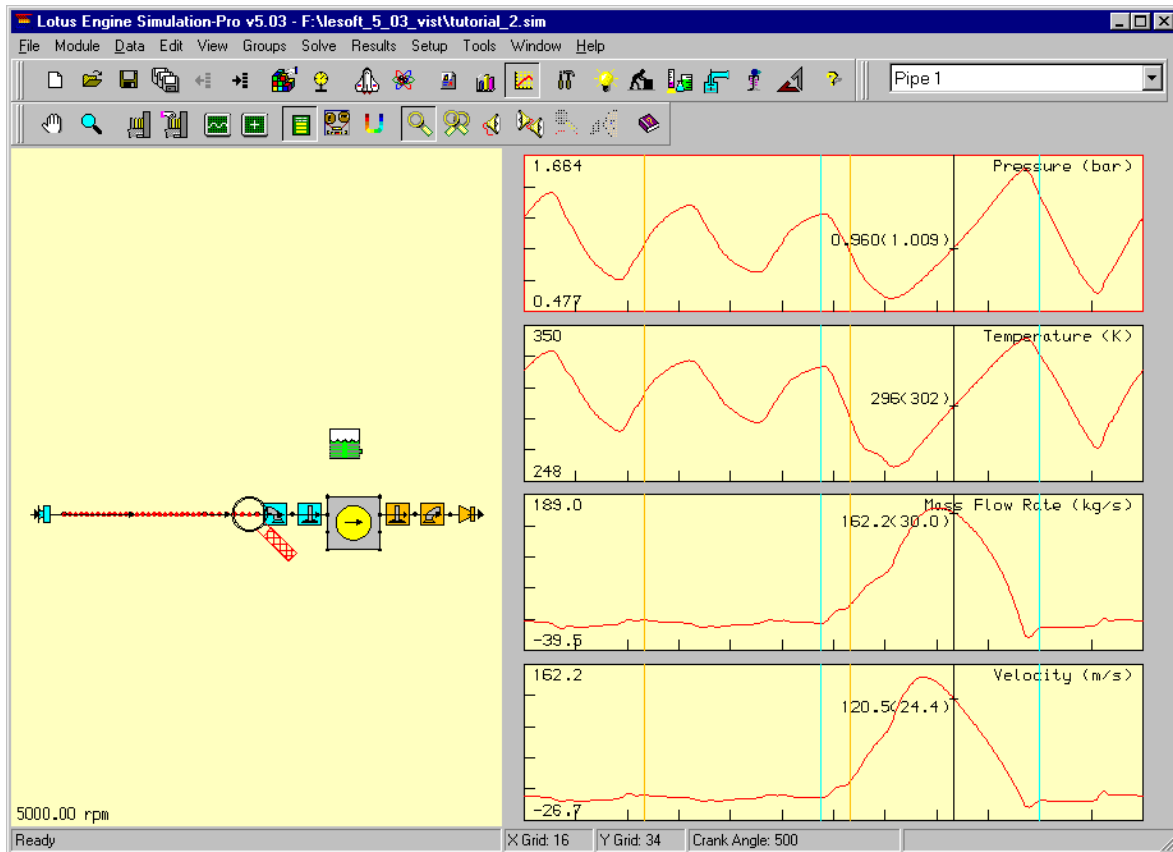


Figure 3.12. Gas property variations at the intake valve – 5000 rev/min.

### Animating .PRS Results

Two types of animation can be produced from the .PRS results. These are both described below.

To get a better appreciation of the wave propagation process within the intake pipe select **Display Pipe Graphic from the right-mouse button menu**. Click on the red sideways Y-icon at the top of the screen to display both pipes in the intake system. Click on the **Autoscale** option from the **View** menu. Click on the 'hand' icon at the top of the screen and position the pipe toward the bottom of the window.

This will generate the window shown in Figure 3.13.

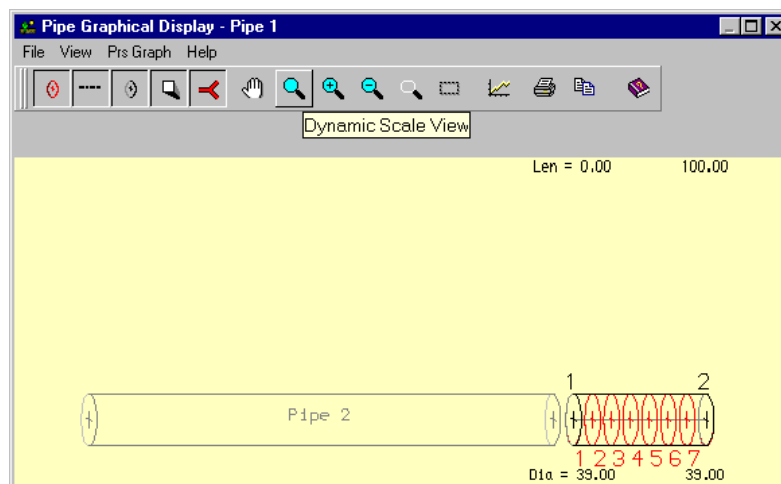


Figure 3.13. The Pipe Graphical Display window.

Now click on the graph icon and select the **Graph Y Length** option from the **Prs Graph** menu. Enter 120 in the value box and click **OK**. These actions will result in the window appearing as shown in Figure 3.14.

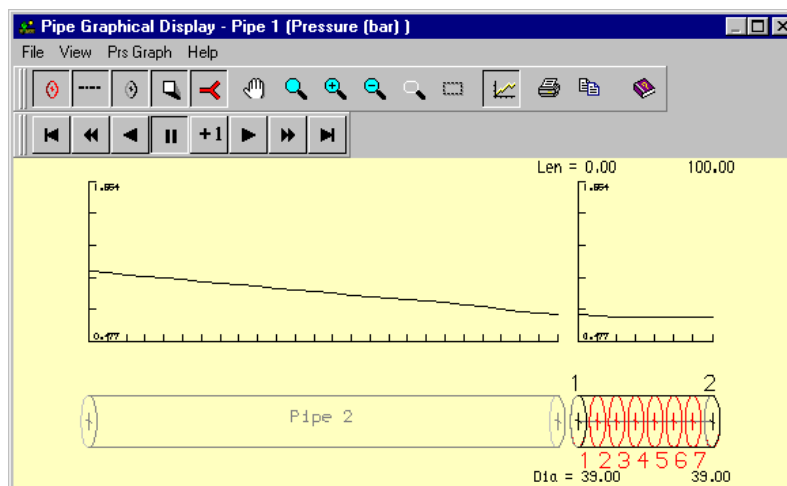


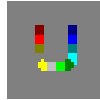
Figure 3.14. The Pipe Graphical Display window.

The animation control buttons can now be used to animate the variation of pressure along the pipe length.

Click on the rightward-pointing triangle to start the animation. Note that the position within the engine cycle is indicated by the moving black line on the .PRS graphs behind the window (the actual crank angle value is displayed in the value box at the bottom of the .PRS graphs – if you cannot see this reposition the .PRS Graphical Display window. The '+1' button enables the animation to be stepped through one time increment (2 degrees crank angle) at a time. Explore the use of the other functions on the animation control panel.

Stop the animation by clicking on the button with the two thick vertical black lines and close the pipe graphical display window.

Now click on the **Shaded Display Visibility** icon shown below.



This transforms the view of the engine model.

Now select the .PRS Video Controller Visibility icon shown below.



This produces a moveable animation control window as shown in Figure 3.15.

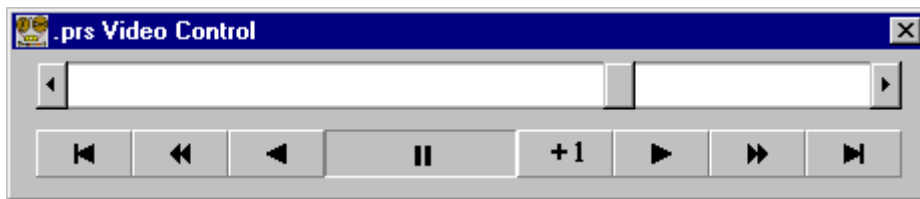


Figure 3.15. .PRS Video Control panel.

Clicking the rightward-pointing triangle animates the .PRS model as shown in Figure 3.16.

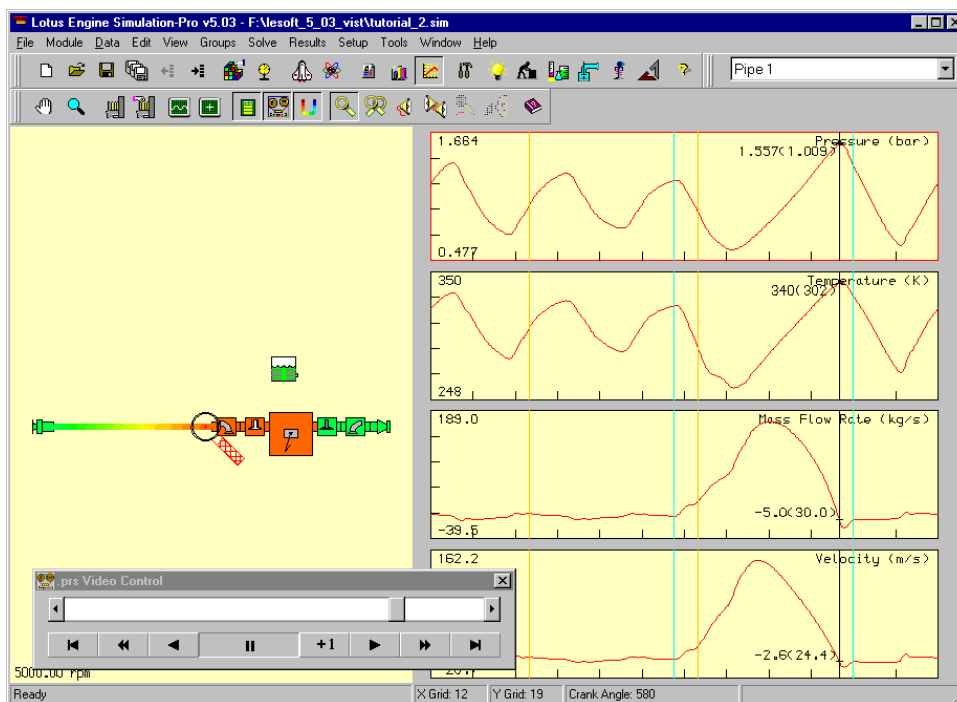


Figure 3.16. Still from animated .PRS display.

In this animation the piston and valves are phased correctly. When the valves are open they turn white.

Stop the animation.

Turn the .PRS graphs off by clicking on the Results Pane Visibility icon to the left of the .PRS Video Controller Visibility icon.

Zoom and manoeuvre the image using the magnifying glass and hand icons on the tool panel. This allows the user to study particular phenomena in detail.

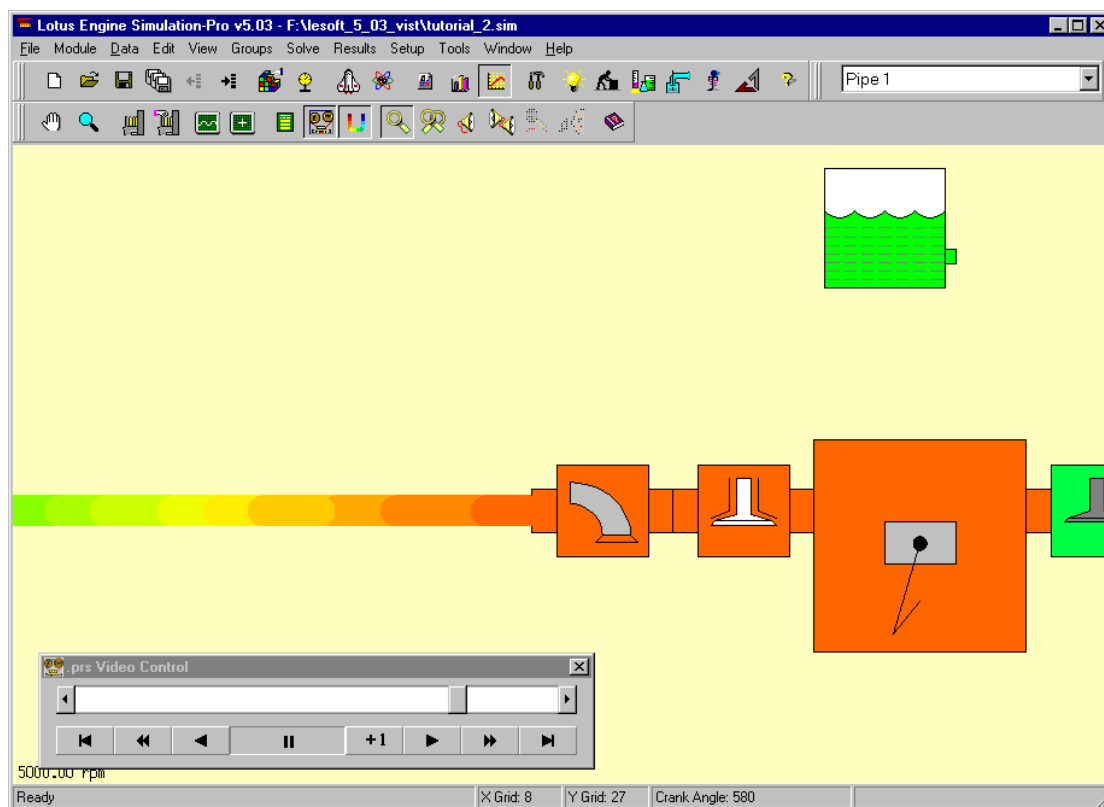


Figure 3.17. Zoomed area of the .PRS animation.

Replace the .PRS graphs and type **Control-A** to autoscale the model.

Now return to the builder environment by clicking on the icon shown below.



Girona, de setembre de 2015

Mario Pérez