

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**  
Sede di Forlì

Corso di Laurea in  
**INGEGNERIA MECCANICA**  
Classe L-9

**ELABORATO FINALE DI LAUREA**

in  
Disegno Tecnico assistito dal calcolatore

**STUDIO E OTTIMIZZAZIONE PER UN  
SISTEMA DI SOVRALIMENTAZIONE DI UN  
MOTORE WANKEL PER ALTE QUOTE**

**CANDIDATO**  
Stefano Albertazzi

**RELATORE**  
Prof. Ing. Luca Piancastelli

Anno Accademico 2013/2014  
Sessione III







# Indice

<b>Premessa</b>		pag.	1
<b>Capitolo 1. Introduzione a GT-Power</b>		pag.	3
<b>Capitolo 2. Il motore Wankel</b>		pag.	7
2.1	Cenni storici	pag.	7
2.2	Schema costruttivo di base	pag.	9
2.3	Fasi del ciclo	pag.	11
2.4	Principi geometrici	pag.	13
2.5	Vantaggi e svantaggi	pag.	15
<b>Capitolo 3. La sovralimentazione</b>		pag.	19
<b>Capitolo 4. Ordine dei componenti</b>		pag.	31
4.1	Aspirazione	pag.	32
4.2	Blocco motore	pag.	33
4.3	Scarico	pag.	34

<b>Capitolo 5. L'aspirazione</b>	pag.	35
5.1 Ambiente esterno	pag.	36
5.2 Turbocompressore	pag.	38
5.3 Intercooler	pag.	49
5.4 Airbox	pag.	53
5.5 Condotti d'aspirazione	pag.	54
<b>Capitolo 6. Blocco motore</b>	pag.	61
6.1 I cilindri	pag.	61
6.2 Gli iniettori	pag.	66
6.3 Valvole di aspirazione e scarico	pag.	70
6.4 Albero motore	pag.	73
<b>Capitolo 7. Lo scarico</b>	pag.	77
<b>Capitolo 8. La simulazione</b>	pag.	83
8.1 L'interfaccia grafica di GT-POST	pag.	88
8.2 Analisi della simulazione	pag.	89
<b>Capitolo 9. Conclusioni</b>	pag.	99
<b>Bibliografia</b>	pag.	103
<b>Ringraziamenti</b>	pag.	107

## Premessa

Il seguente lavoro tratta lo studio e l'ottimizzazione per un sistema di sovralimentazione da installare su un motore Wankel.

Nello specifico è stato considerato il motore R902, impiegato sull'UAV Hermes 450 prodotto dalla Elbit Systems. Si tratta di un monomotore di 345 cc, raffreddato a liquido a iniezione elettronica che eroga fino a 62 HP a 7550 RPM. Oltre a queste caratteristiche vanno aggiunti l'eccellente rapporto potenza/peso, consumo di carburante ridotto rispetto ad altri motori Wankel simili, basso costo, ridotti interventi di manutenzione (250 ore TBO) e l'assenza di vibrazioni radiali.

Si intuisce subito che un motore con queste caratteristiche è molto adatto per essere utilizzato su UAV di lunga durata.

Il software di simulazione utilizzato (GT-POWER) permette di eseguire simulazioni solamente su motori a movimento alternativo due e quattro tempi. Per questo motivo si è cercato di simulare il comportamento del motore Wankel con un tre cilindri a quattro tempi, partendo dalla curva di potenza erogata dal motore R902, in modo da realizzare un modello che si comporti similmente a quello reale, al fine di ottenere dati veritieri.

I limiti del motore aspirato preso in esame si manifestano in quota, dove l'aria è più rarefatta e caratterizzata da una pressione minore, con conseguente calo di potenza che ne limita l'altitudine in volo.

Infatti, superati i 1500 m circa di altezza non c'è motore che non manifesti problemi di alimentazione.

Quello che si deve fare è cercare di ottenere in quota le stesse condizioni atmosferiche che si hanno a terra. Si parla allora di sovralimentazione di ripristino piuttosto che sovralimentazione per aumento di potenza.

La soluzione più congeniale è l'utilizzo di un turbocompressore che immette forzatamente nel motore una quantità maggiore di miscela combustibile-comburente rispetto a quella che sarebbe possibile con la normale aspirazione, compensando così la rarefazione dell'aria.

Con GT-POWER sono state eseguite prove di simulazione sul modello del motore aspirato a differenti condizioni ambientali, al fine di ricavare dati utili per la scelta di un turbocompressore attualmente disponibile sul mercato.

Fra le tante aziende leader in questo campo è stata consultata la Garrett, la quale ci ha messo a disposizione un catalogo con i prodotti attualmente in vendita.

Una volta individuato il turbocompressore adatto, sono state inserite le mappe di turbina e compressore nel software di simulazione e lo si è assemblato sul modello del motore aspirato realizzato precedentemente, ottenendo la *quota di ristabilimento (critical altitude)*, ovvero la quota alla quale la pressione di alimentazione con compressore risulta uguale alla pressione di alimentazione sul livello del mare senza compressore.

Questo valore risulta molto importante in quanto stabilisce la quota massima che il velivolo, azionato dal motore sovralimentato esaminato, può raggiungere senza subire cali di potenza dovuti alla diminuzione della densità dell'aria con la quota.

La quota di ristabilimento è stata calcolata nelle condizioni ISA (International Standard Atmosphere).

È stato anche possibile individuare la potenza erogata dal motore sovralimentato alla quota di 10000 metri.

# Capitolo 1

## Introduzione a GT-Power

Per gli studi di impostazione, per la progettazione e, in generale, per l'analisi del

funzionamento dei motori a combustione interna, riveste grande importanza una particolare tipologia di software definiti monodimensionali, che in maniera versatile ed efficace permettono la modellazione dell'intero sistema motore, al fine di simularne il funzionamento, con una elevata velocità di esecuzione dei calcoli di simulazione, consentendo di ridurre il numero delle prove sperimentali.

Queste infatti, pur offrendo una maggior aderenza alla realtà, risultano troppo costose e impegnative da eseguire, in quanto usano attrezzature dispendiose.

In supporto alle prove sperimentali si utilizzano simulazioni monodimensionali (1D) che ricreano in maniera veritiera il ciclo motore.

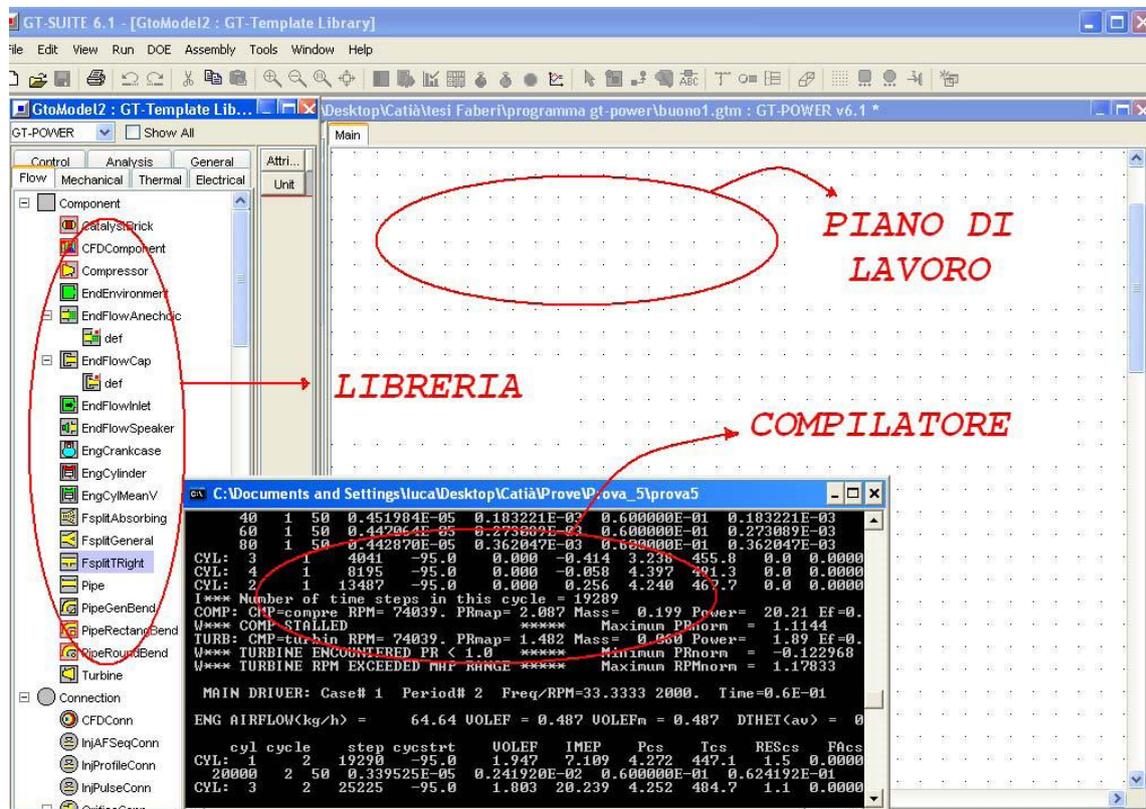
La simulazione 1D crea codici che sono utilizzati per:

- Ottimizzare la geometria dei sistemi di aspirazione e scarico di motori due e quattro tempi;
- Ottimizzare la legge di alzata delle valvole e la fasatura;
- Predire le prestazioni di un veicolo in transitorio;
- Analizzare l'influenza di dispositivi a geometria variabile sulle prestazioni di motori da competizione.

Tali studi sono stati condotti tramite l'utilizzo di un codice specifico per la simulazione dell'intero ciclo motore: GT-POWER (Gamma Technologies).

L'interfaccia di questo programma è molto semplice e presenta:

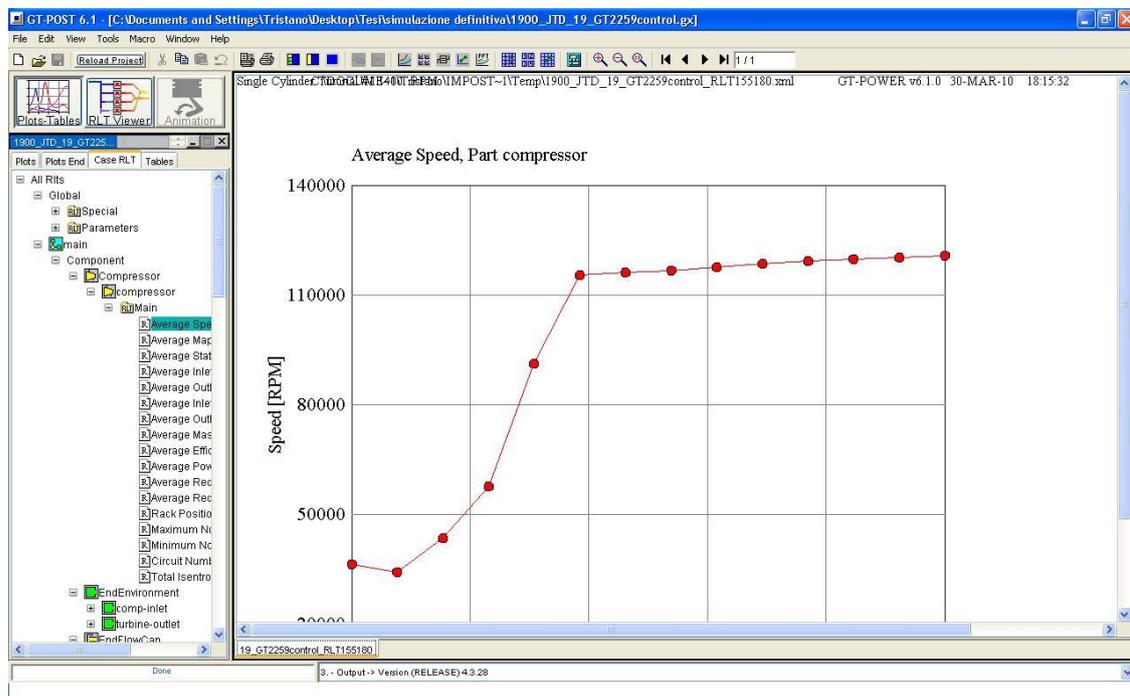
- Una libreria che contiene elementi grezzi che andranno a completare il modello e nei quali verranno inseriti tutti i dati del propulsore;
- Un piano di lavoro nel quale verrà assemblato il modello collegando i vari elementi;
- Un compilatore che mostrerà la simulazione in corso d'opera.



## Capitolo 1 - Introduzione a GT-Power

In definitiva, occorrerà dapprima creare sul piano di lavoro il modello del motore attraverso gli elementi presenti nella libreria. Quando tale operazione sarà ultimata e priva di errori, il software mediante il compilatore porterà a termine la simulazione.

Per visualizzare i risultati si utilizza uno strumento di GT-POWER, denominato GT-POST, che rappresenta per via grafica tutti i risultati in diverse forme: grafici, tabelle numeriche e animazioni dell'esperimento effettuato.





## Capitolo 2

### Il motore Wankel

Nei tradizionali motori a combustione interna il moto dei pistoni è di tipo rettilineo alternato. Per ottenere un moto di rotazione bisogna ricorrere ad un albero a gomiti. Ovviamente, se i pistoni potessero ruotare, anziché muoversi in linea retta e invertire continuamente il loro senso di spostamento, come avviene in un motore tradizionale, ne deriverebbe una notevole semplificazione meccanica. Il moto dei pistoni, infatti, potrebbe essere trasmesso direttamente al cambio di velocità senza dover essere trasformato in rotativo mediante un complesso e delicato imbiellaggio. Inoltre, il motore alternativo è caratterizzato da un basso rendimento complessivo a causa di vibrazioni, attriti e inerzia.

Un motore rotativo, invece, dovrebbe essere in grado di offrire una notevole riduzione sia nelle dimensioni, sia nel numero delle parti in movimento e dovrebbe costituire un'unità motrice leggera e affidabile, capace di funzionare senza dar luogo a vibrazioni di rilievo.

#### 2.1 Cenni storici

Il motore Wankel si basa sull'idea concepita dall'inventore tedesco Felix Wankel nel corso degli anni '30, ma iniziò ad essere impiegato sulle autovetture attorno al 1957, a seguito della collaborazione con la casa tedesca N.S.U.

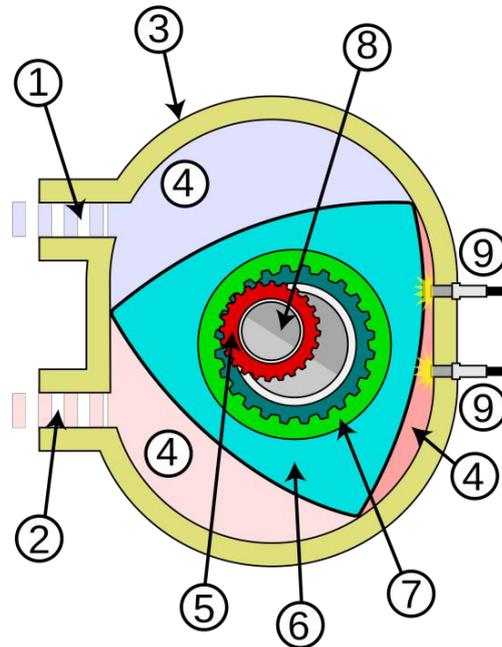


Fu proprio la N.S.U. Spider del 1963 la prima vettura spinta dal motore Wankel in grado di sviluppare una potenza di 50 HP e di raggiungere velocità superiori ai 150 km/h a fronte di una cilindrata ridotta (498 cm<sup>3</sup>) e con consumi contenuti. Successivamente vennero realizzati vari prototipi di vettura con questi motori da parte di Mercedes-Benz e General Motors, oltre a diversi motocicli prodotti da N.S.U., Suzuki e Norton.

Il problema principale di questi propulsori era la tenuta delle guarnizioni del rotore in condizioni di alte temperature e pressioni e scarsa lubrificazione. Oggi il motore Wankel è stato ripreso in considerazione perché le nuove tecnologie e i materiali più resistenti hanno risolto il problema dell'usura.

I motori rotativi interessano notevolmente anche il settore aeronautico per la loro compattezza e leggerezza. Esistono già alcune ditte specializzate nella costruzione di questo tipo di propulsori.

## 2.2 Schema costruttivo di base



Il motore Wankel appartiene alla categoria dei motori a combustione interna di tipo rotativo, in cui funge da pistone un rotore prismatico a base triangolare equilatera con i lati leggermente convessi (6). In questa tipologia di motori dunque il pistone non ha un moto rettilineo alternato, bensì ruota attorno a un asse.

Il rotore si trova all'interno della carcassa, detta statore (3), nella quale sono presenti le apposite aperture per l'aspirazione della miscela aria-carburante (1) e per l'uscita dei gas di scarico (2).

Come è evidente dalla figura, la sezione interna della carcassa sembra un'ellisse schiacciata con due lobi all'altezza dell'asse minore; questo profilo viene chiamato epitrocoideale.

Le basi dello statore sono costituite da due pareti piane, che presentano un'apertura centrale che permette l'alloggio dell'albero motore (8). Grazie alla rotazione del pistone, si vengono a creare tre camere di combustione (4) in cui si compiono in simultanea tre cicli Otto a quattro tempi con sfasamenti di  $120^\circ$  tra loro. Ogni fase di lavoro che comporta una variazione di volume dal minimo al massimo avviene con una rotazione di  $270^\circ$  da parte dell'albero motore.

Quindi, il ciclo termodinamico è lo stesso dei motori con pistoni a moto rettilineo alternato, con la differenza che in questo caso il processo avviene tre volte per ogni giro del rotore stesso (che corrisponde a tre giri dell'albero motore), dando origine a un ciclo più regolare e con una maggiore potenza sviluppata.

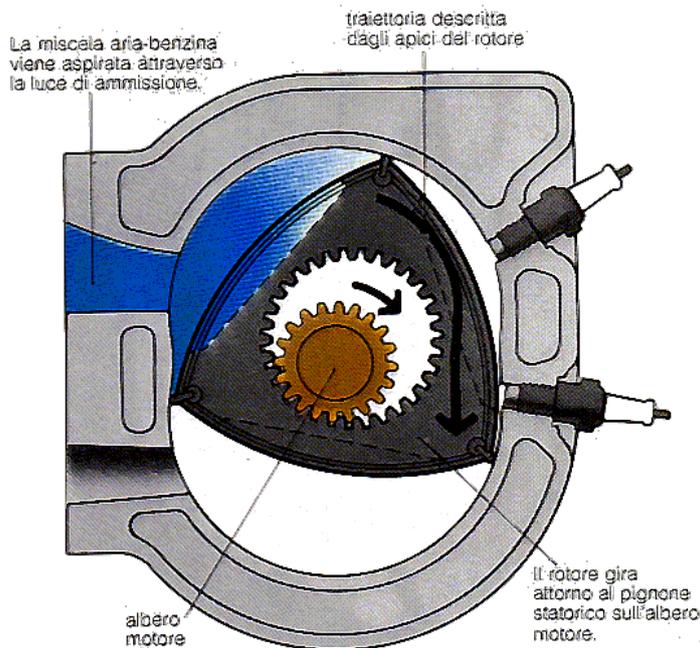
Al centro del rotore è calettata una ruota dentata a denti interni, detta corona rotorica (7), la quale ingrana con una ruota a denti esterni, detta pignone statorico (5), solidale alla piastra di chiusura dello statore e coassiale con i perni di banco dell'albero motore.

Quest'ultimo viene messo in rotazione grazie alla pressione esercitata dai gas in espansione sul rotore, che la trasmette all'eccentrico calettato all'albero motore, il quale ruota all'interno della bronzina anulare di grande diametro presente al centro del rotore e funge in pratica da manovella, generando il braccio utile per avere un certo momento motore diretto lungo l'asse dell'albero.

Infine, abbiamo le candele di accensione (9), necessarie all'avvio della combustione.

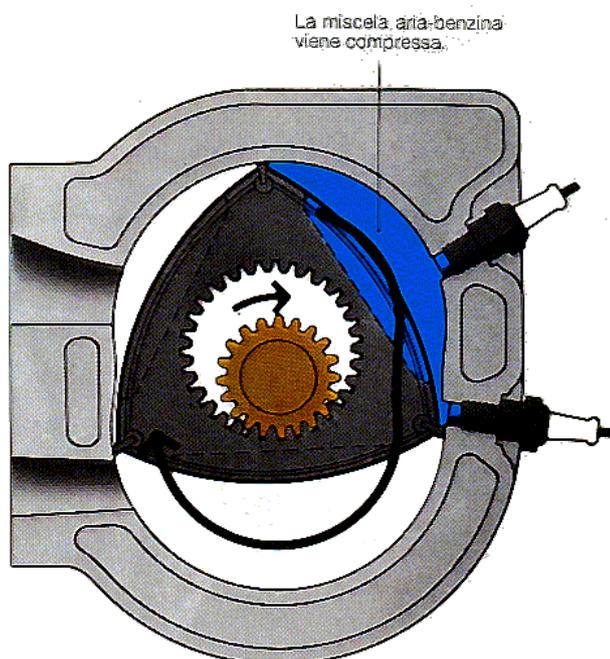
### 2.3 Fasi del ciclo

Il ciclo termodinamico seguito dai motori Wankel è assimilabile al ciclo Otto eseguito dai normali motori alternativi a benzina.



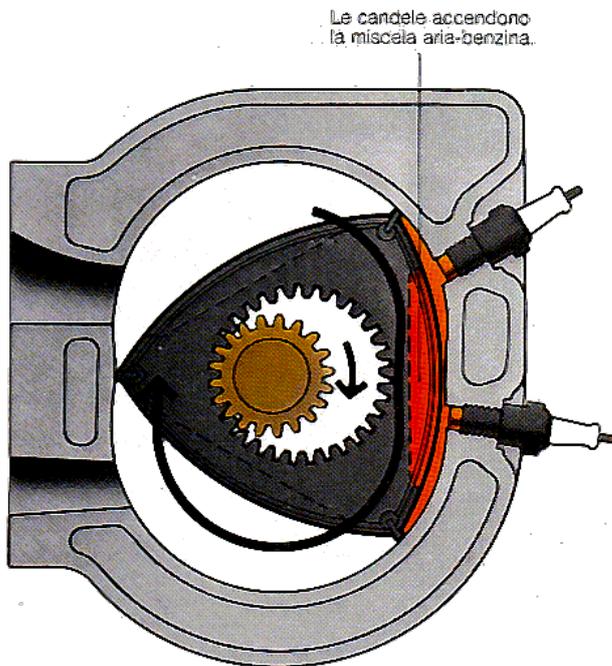
#### **Aspirazione:**

L'aspirazione si ha quando vi è una camera il cui volume è in espansione, ovvero quando il condotto di aspirazione non è ostruito dal rotore che, con il suo moto, aumenta il volume della camera di aspirazione.



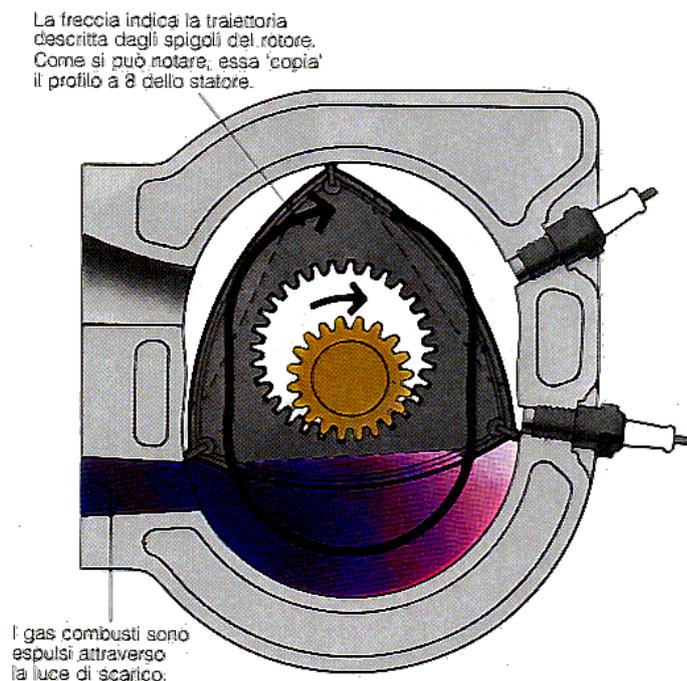
#### **Compressione:**

La compressione si ha quando la miscela aspirata è spinta verso la camera di scoppio, con il volume in diminuzione per effetto del movimento eccentrico del rotore che genera la compressione.



### **Combustione ed espansione:**

La scintilla fornita dalla candela incendia il gas precedentemente compresso che va ad espandersi grazie al calore della combustione, generando la coppia motrice e facendo muovere il rotore nella direzione in cui la camera si espande. L'albero eccentrico subisce una rotazione grazie alla presenza degli ingranaggi.

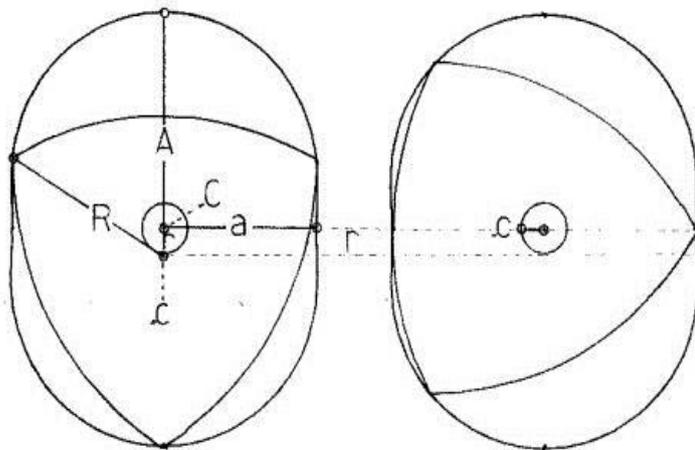


### **Scarico:**

La fase di scarico libera la camera dai residui della combustione preparandola per un altro ciclo.

Nel motore rotativo il rotore prima apre la camera di combustione al condotto di espulsione e poi, con il suo movimento, espelle completamente i gas di scarico.

## 2.4 Principi geometrici



Lo statore ha un profilo simmetrico rispetto ai due assi ortogonali baricentrici chiamato profilo epitrocoide.

Il profilo del rotore consiste invece in una base a forma di triangolo

equilatero, con i lati leggermente convessi, chiamato triangolo di Reuleaux.

È evidente che abbiamo il contatto fra rotore e statore sempre in tre punti, che corrispondono di fatto ai vertici del triangolo.

Al particolare profilo dello statore, Wankel vi era giunto unicamente per via empirica. Furono gli studi del prof. Baier dell'Università di Stoccarda a definirlo come un epitrocoide, ovvero una curva generata dal rotolamento di una circonferenza generatrice su una circonferenza fissa.

Quando il punto che descrive questa curva giace internamente o esternamente rispetto alla circonferenza, la curva diventa una trocoide. Queste tipo di curve sono caratterizzate, nel caso di una linea chiusa, dal fatto che il rapporto tra i diametri della circonferenza fissa e quella mobile è un numero intero (rapporto di 2:1 nel caso del Wankel), che rappresenta tra l'altro il numero di archi che costituiscono la trocoide.

Per far sì che la trocoide non abbia punti doppi, il punto prescelto per tracciare il profilo deve essere all'interno della circonferenza generatrice, ovvero quella mobile.

Tuttavia, la scelta di questo punto e della distanza con il centro del cerchio mobile (eccentricità) è arbitraria, quindi in teoria abbiamo un numero infinito di profili trocoidali validi per un motore di tipo rotativo.

La soluzione che abbiamo nel motore Wankel è quella con statore epitrocoidale a due lobi e rotore trilobato, come già detto chiamato triangolo di Reuleaux. In particolare, se potessimo vedere la profondità dalle immagini precedenti, noteremmo che è presente una nicchia all'interno di ciascuno dei tre lati bombati del rotore che ha la triplice di funzione di aumentare la cilindrata (e di conseguenza si hanno valori del rapporto di compressione volumetrico di 8:1 o 10:1 equiparabili a motori che seguono il ciclo Otto), di migliorare la forma della camera di combustione e le prestazioni fluidodinamiche durante la fase di combustione, che sarebbero altrimenti penalizzate dalla strozzatura di giunzione dei due lobi epitrocoidali.

Lo spessore della parete esterna dello statore non è soggetto a particolari limitazioni, ma se risulta eccessivo limita la combustione, rendendola lenta e con forte rischio di non essere completa, mentre uno spessore troppo sottile rende troppo basso il valore della cilindrata per avere un funzionamento accettabile del motore.

La soluzione scelta quasi sempre per i motori Wankel è avere uno spessore della cassa statorica circa pari alla metà del raggio della circonferenza circoscritta al rotore.

## 2.5 Vantaggi e svantaggi

I principali vantaggi che si hanno per quanto riguarda i motori Wankel sono:

- Minor numero di parti in movimento (assenza di manovelle, bielle, valvole e molle) rispetto a motori a pistoni di simile potenza, che generano meno rumorosità e la quasi totale assenza di vibrazioni; altro effetto correlato all'assenza di pistoni, spinotti e bielle è l'assenza delle forze di inerzia di secondo ordine, e quindi della necessità di bilanciarle, con conseguente rendimento energetico elevato;
- Maggiore leggerezza dovuta alle dimensioni ridotte di questi propulsori, caratterizzati quindi da un alto rapporto potenza/peso;
- Funzionamento molto regolare e dolcezza di utilizzo;
- Semplicità progettuale e manutentiva;
- Maggiore potenza a parità di cilindrata rispetto a un motore a pistoni, dovuto al fatto che si possono raggiungere velocità di rotazione più alte anche a causa dell'assenza di forze inerziali del secondo ordine e di masse volaniche che devono bilanciarle; altro vantaggio in termini di potenza è dato dalla rotazione di  $270^\circ$  (invece dei  $180^\circ$  in un motore a pistoni) dell'albero motore durante la fase di espansione correlata alla combustione;
- Minori emissioni inquinanti di ossidi di azoto, grazie a minori temperature medie dei gas di scarico;
- Vantaggi in fase di aspirazione e scarico, che durano di più rispetto al motore a pistoni e che consentono di avere minori perdite di carico;
- Può essere sovralimentato tramite turbina o compressori volumetrici.

Andiamo ora a vedere gli svantaggi di questo tipo di motori:

- Scarsa durata degli elementi di tenuta del rotore, che sono soggetti a un consumo eccessivo di olio lubrificante;
- Difficile smaltimento del calore in eccesso, con conseguente necessità della presenza di un impianto di raffreddamento liquido complesso ed efficace; in particolare, il rotore è soggetto a forti escursione termiche del valore di 900°C e necessita di essere costruito in leghe molto resistenti (acciaio e alluminio) e di conseguenza costose;
- Bassi valori di coppia a bassi regimi di rotazione;
- Forme delle parti costruttive complesse, richiedono lavorazioni difficili e in molti casi costose, come ad esempio processi di indurimento superficiale (tempra) e levigatura nelle parti interne dello statore per garantire la resistenza all'usura superficiale;
- Riduzione del rendimento del motore dovuto alle perdite che si hanno per i piccoli urti e lo strisciamento del rotore sulla superficie dello statore che compromette la tenuta delle guarnizioni;
- Maggiori consumi di combustibile rispetto ai motori a pistoni;
- Elevato tasso di idrocarburi incombusti prodotti.

Dopo queste considerazioni di carattere generale, vediamo nel dettaglio i motivi per i quali è preferibile utilizzare un motore Wankel su un applicazione aeronautica:

- Grande leggerezza e compattezza;
- Quasi totale assenza di vibrazioni;
- Alto rapporto potenza/peso;
- Assenza di grippaggio del rotore, in quanto il carter contenente i rotori si espande più dei rotori stessi;
- Non è soggetto a shock-cooling durante la fase di discesa dell'aereo;
- Non richiede miscele arricchite per effettuare il raffreddamento ad alte potenze;
- È meno soggetto a danneggiarsi in caso di fuori giri;
- Costi abbastanza contenuti;
- Architettura non troppo complicata.

Tutte queste ragioni lo rendono ideale per aerei di piccole/medie dimensioni e per modelli acrobatici che necessitano di alimentazioni particolarmente spinte.



## Capitolo 3

### La sovralimentazione

Il lavoro ottenibile per ogni ciclo da un motore dipende dalla sua cilindrata, ovvero dalla quantità di aria che è possibile inserire all'interno del motore. Pertanto la massa d'aria iniettata all'interno del motore è il prodotto tra il suo volume e la densità del fluido iniettato.

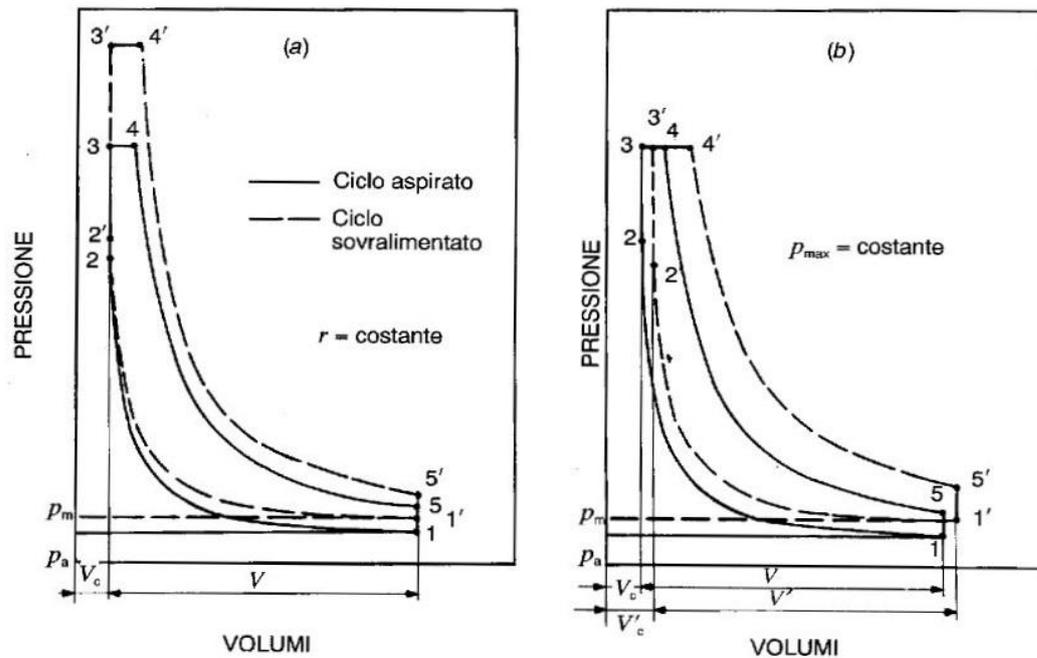
Essendo l'aria un fluido altamente comprimibile, è soggetta a forti variazioni di densità quando viene compressa, quindi una compressione iniziale prima dell'iniezione nel motore permette di iniettare molto più comburente. Poiché il rapporto tra le masse di combustibile e comburente è da mantenere attorno ad un certo valore per una buona miscelazione, è necessario iniettare più combustibile.

In questo modo il lavoro di un motore sovralimentato aumenta rispetto a quello svolto da un motore aspirato, a parità di cilindrata: questo significa che si può innalzare il rapporto potenza/peso del motore senza alterare significativamente le masse.

Nell'immagine seguente possiamo vedere il confronto tra il ciclo limite a quattro tempi sovralimentato e quello ad aspirazione naturale.

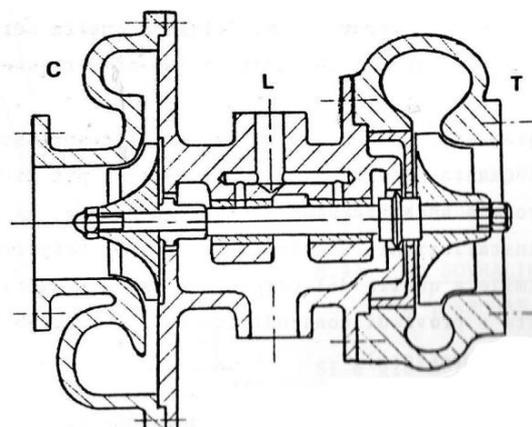
Nel caso (a), mantenendo inalterato il rapporto di compressione, la pressione massima del ciclo aumenta, aumentando il lavoro utile.

Nel caso (b), riducendo opportunamente il rapporto di compressione è addirittura possibile conservare la pressione massima costante, pur ottenendo un maggior lavoro utile.



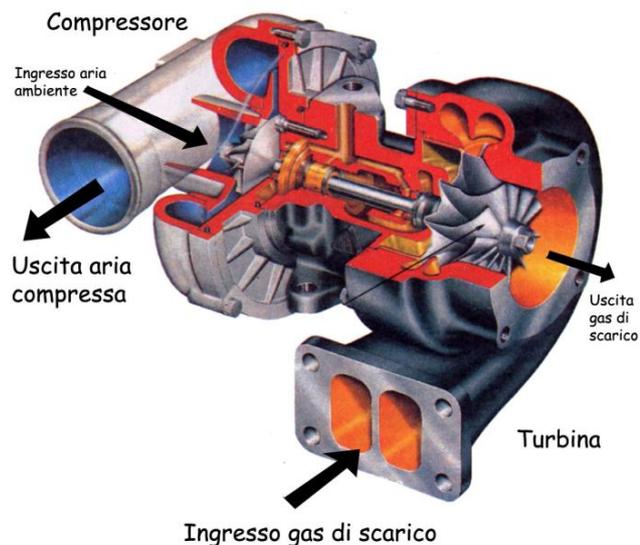
Esistono due possibilità per ottenere una pressione di ingresso nei cilindri maggiore di quella atmosferica:

- Compressore volumetrico collegato meccanicamente all'albero motore;
- Compressore dinamico a flusso centrifugo trascinato da una turbina a flusso centripeto alimentata dai gas di scarico del motore.

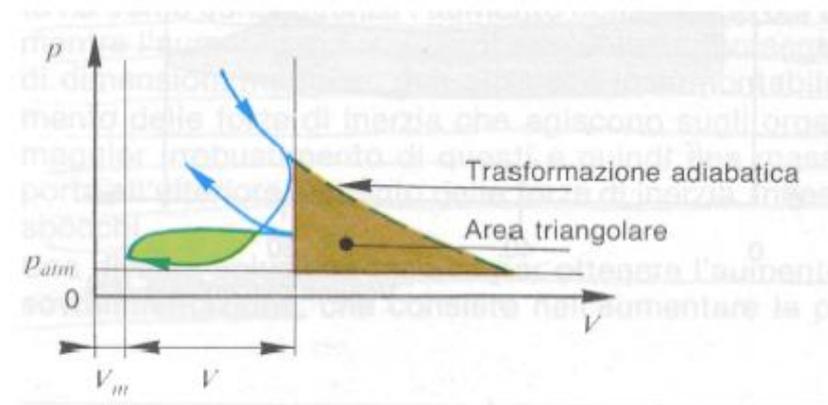


Nel secondo caso si recupera buona parte dell'energia perduta e si hanno benefici dal punto di vista del rendimento.

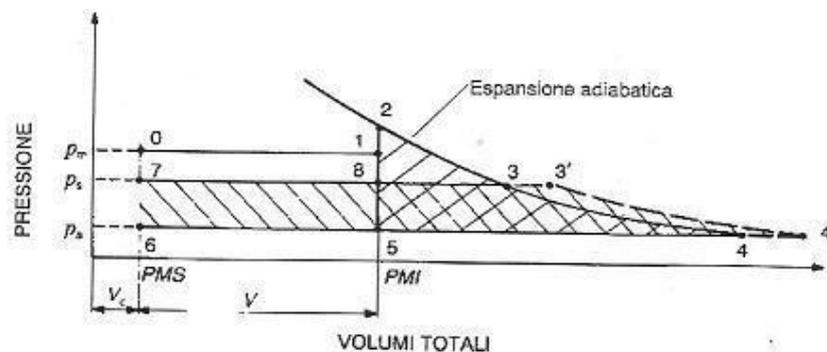
Per la similarità di funzionamento con il compressore dinamico centrifugo, la turbina, nella turbo-sovralimentazione, si presta ad essere accoppiata ad un compressore di questo tipo montato sul medesimo asse.



Il principale vantaggio di questo sistema è dato dal fatto che i gas di scarico, che in un motore con compressore volumetrico sono espulsi quando hanno ancora un alto contenuto energetico, vengono sfruttati dalla turbina e forniscono lavoro in uscita che viene a sua volta sfruttato dal compressore. Facendo riferimento al diagramma p-V sottostante, l'energia massima che può essere trasformata in lavoro meccanico dalla turbina è data dall'area triangolare, dove la curva superiore rappresenta un'espansione adiabatica dei gas di scarico.



L'espansione adiabatica va dal punto 2 (condizioni di pressione e temperatura dei gas all'uscita del motore) fino alle condizioni ambiente.



Inoltre il seguente diagramma h-s mostra come l'energia posseduta dal gas è trasferita al rotore nei passaggi tra gli elementi della turbina.

- Da 1 a 2 il flusso viene accelerato a spese di una parte di energia di pressione, ciò avviene con modeste perdite;
- Da 1 a 2 il flusso viene accelerato a spese di una parte di energia di pressione, ciò avviene con modeste perdite;
- Da 2 a 3 un'altra parte dell'energia di pressione e una parte dell'energia cinetica posseduta dal fluido vengono trasferite al rotore sottoforma di lavoro meccanico disponibile all'albero;
- Dal punto 3 il fluido deve possedere una bassa energia cinetica se il rotore è ben progettato.



Il valore del rapporto di compressione ci dice che:

- Esso varia al variare del regime di rotazione del motore, con un andamento circa proporzionale al quadrato del suo valore;
- Il rapporto di compressione dipende dal tipo di compressore e normalmente va oltre il valore 3 solo per quelli associati a motori di grande dimensione e potenza.

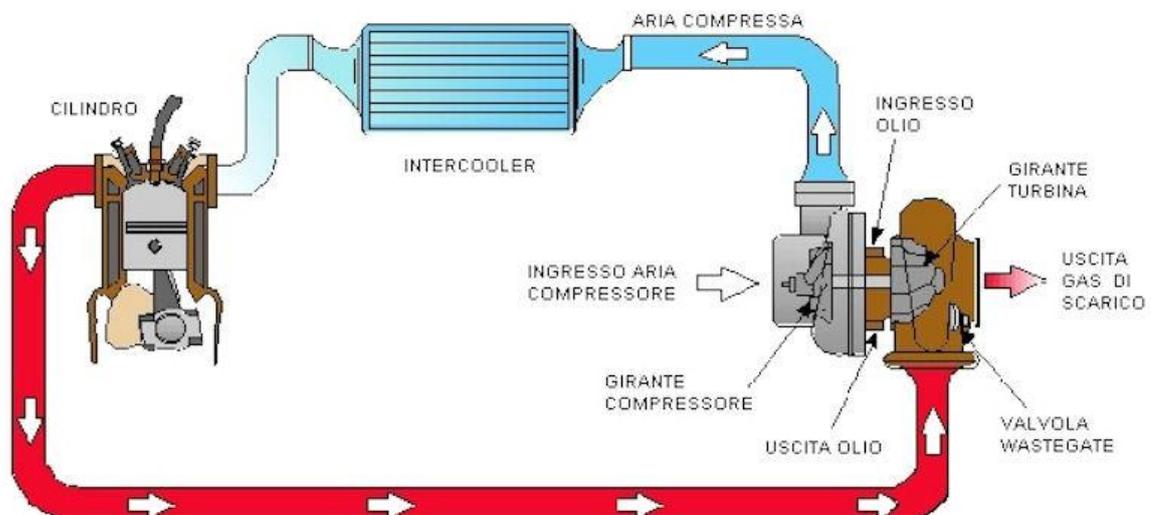
Il turbocompressore è situato normalmente vicino al motore, in modo da limitare le perdite di carico lungo i condotti di adduzione e per essere facilmente raggiungibile dal circuito di lubrificazione che, soprattutto nel turbocompressore, esplica la doppia funzione di lubrificante e refrigerante.

L'aria giunge all'aspirazione del compressore, che si trova in posizione centrale per consentire il flusso centrifugo, dopo essere stata filtrata nell'apposito filtro-aria ed esce radialmente per attraversare uno scambiatore. Quest'ultimo, denominato intercooler (o interrefrigeratore), non è in realtà sempre obbligatorio ma, con la sua presenza, aumenta notevolmente l'efficacia della sovralimentazione in quanto abbassa la temperatura dei gas di aspirazione, riscaldati durante la compressione, innalzandone la densità e quindi la portata, con conseguente aumento di potenza.

Dopo il passaggio nell'intercooler, l'aria entra nel motore dove svolge il suo normale ciclo, per poi uscire con un contenuto energetico ancora molto elevato nei condotti di scarico. Questi possono eventualmente presentare un collettore capace di rallentare la dinamica dei fluidi scaricati in modo da regolarizzare il flusso in turbina.

Il successivo passaggio dei gas avviene nella turbina a flusso centripeto, che si trova a ridosso del compressore, essendo le due giranti calettate sullo stesso albero.

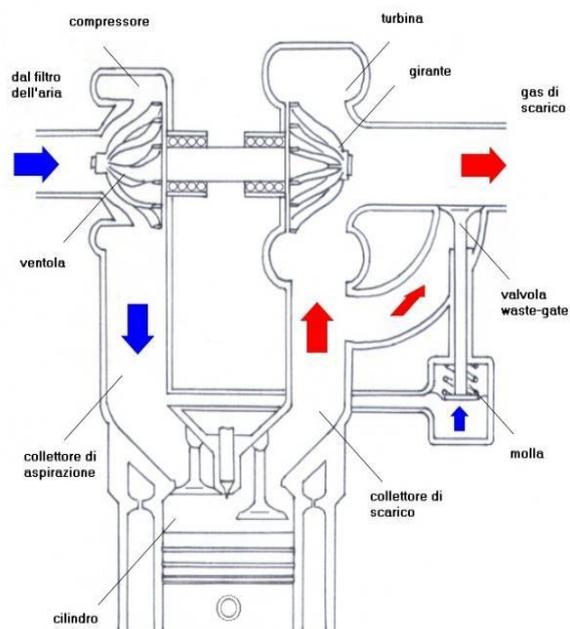
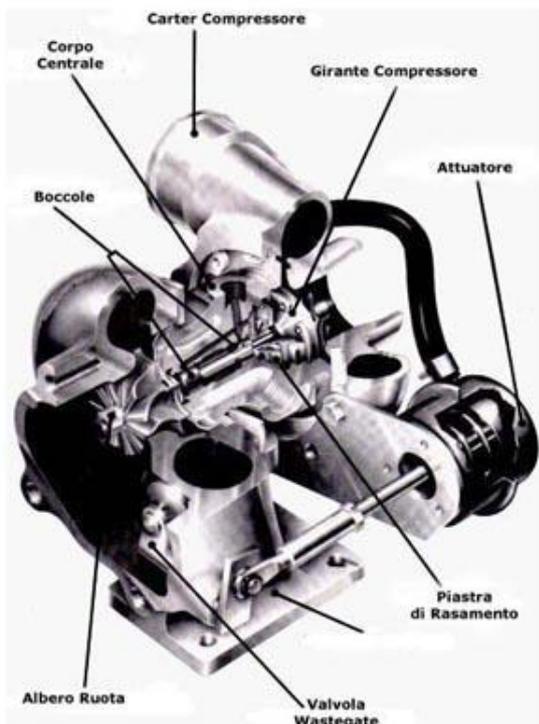
Questa caratteristica costruttiva del turbocompressore deve essere tenuta in seria considerazione dai costruttori, che devono evitare il surriscaldamento del compressore, fattore che causerebbe un crollo del rendimento del gruppo e il relativo grippaggio delle bronzine calettate sull'albero della girante.



Lo statore della turbina presenta sempre una valvola di bypass (wastegate), necessaria per evitare pressioni di sovralimentazione elevate ad alti regimi, che scarica parte dei gas combusti prima dell'immissione in turbina. Questo scarico riduce la contropressione al motore nelle condizioni a pieno carico, riduce il lavoro compiuto dal motore per l'espulsione dei gas e permette di utilizzare un turbocompressore con turbina più piccola, con conseguente minore inerzia e maggiore prontezza di risposta nei transitori.

Il motore, evitando di lavorare a rapporti di compressione troppo elevati, non viene influenzato negativamente sulla sua durata e non si compromette l'efficacia della combustione. Tuttavia, questo sistema presenta qualche problema costruttivo per la valvola di sfiato, dovuto all'alta temperatura e all'aggressività chimica dei gas combusti.

Una volta uscito centralmente dalla turbina, il gas di scarico passa attraverso eventuali catalizzatori e marmitte prima di essere immesso nell'ambiente.



Un aspetto molto importante legato ai sistemi di sovralimentazione che può interessare soprattutto i motori che si trovano a funzionare in un ampio campo di velocità e di richieste di coppia è il turbo lag.

Questo fenomeno è legato al fatto che variando le condizioni di regime, il turbo si presenta assai meno rapido del motore ad accelerare, originando il tipico e penalizzante ritardo nella risposta.

L'equazione fondamentale d'equilibrio dinamico (moto non stazionario) del turbo, in un determinato istante, è la seguente:

$$G_t \cdot c_{pg} \cdot T_{1t} \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_t^{\frac{k-1}{k}}}\right) \cdot \eta_t \cdot \eta_0 - \frac{G_c \cdot c_{pa} \cdot T_a}{\eta_c} \cdot \left(\beta_t^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) = \frac{d}{dt} \left( J_t \cdot \frac{\omega_t^2}{2} \right) = J_t \cdot \omega_t \cdot \frac{d\omega_t}{dt}$$

dove abbiamo indicato con:

- $G_t$  = portata in massa della turbina
- $G_c$  = portata in massa del compressore
- $B_t$  = rapporto d'espansione turbina
- $B_c$  = rapporto di compressione del compressore
- $T_{1t}$  = temperatura ingrasso turbina
- $\eta_t$  = rendimento adiabatico turbina
- $\eta_0$  = rendimento organico compressore
- $\omega_t$  = velocità di rotazione rotore
- $J_t$  = momento d'inerzia rotore

In questa equazione il primo termine rappresenta la potenza erogata dalla turbina, il secondo la potenza assorbita dal compressore, mentre il terzo rappresenta la variazione dell'energia cinetica del rotore del turbo.

Senza entrare troppo nel dettaglio, è evidente come il fenomeno del Turbo Lag sia tanto minore quanto maggiore sia la potenza accelerante del turbo.

Esistono vari modi per far fronte a questo problema (soprattutto operando sulle temperature dei gas di scarico) ed è evidente come l'inerzia del complesso rotorico rivesta un ruolo fondamentale in esso, essendo inversamente proporzionale a tale accelerazione, a parità di potenza sull'albero.

Si può affermare che la sovralimentazione comporta i seguenti vantaggi:

- Aumenta il rapporto potenza/peso, di importanza rilevante per propulsori impiegati su velivoli;
- Migliora il rendimento, ossia diminuisce i consumi specifici (sfrutta l'energia dei gas di scarico per comprimere la carica fresca);
- Rende il motore meno rumoroso perché assicura una combustione più graduale, mentre la turbina posta sullo scarico regolarizza le onde di pressione nei collettori;
- Riduce le emissioni allo scarico perché permette di recuperare le inevitabili perdite di potenza che comunemente si accompagnano ai provvedimenti che riducono le emissioni;
- Si ha una modesta diminuzione di potenza al diminuire della densità dell'aria ambiente, dovuta ad un aumento di quota o ad un cambiamento delle condizioni atmosferiche.

Per contro, alla sovralimentazione si accompagnano normalmente i seguenti svantaggi:

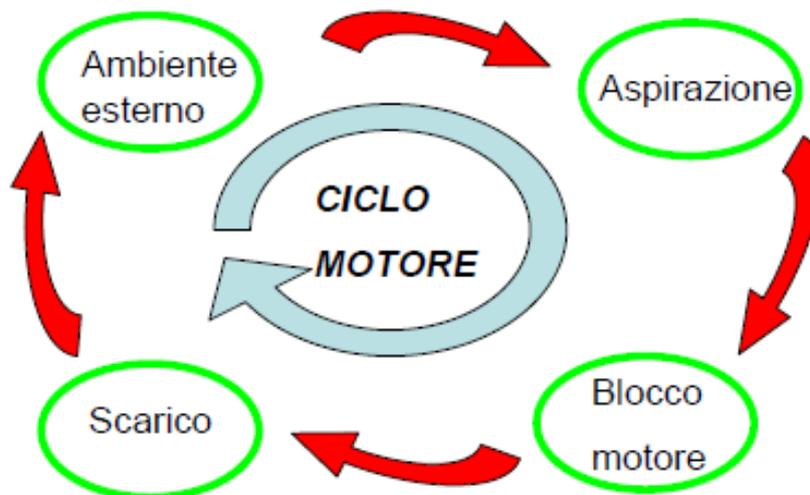
- Aumento dei carichi meccanici e termici sui principali organi del motore, con conseguente necessità di irrobustire gli organi principali del motore e migliorare il raffreddamento;
- Tempi più lunghi di risposta nei transitori.



## Capitolo 4

### Ordine dei componenti

In primo luogo si è effettuata un'analisi superficiale per stabilire quali e quante fossero le componenti da definire ed in quale sequenza andassero disposte. Si è poi definito uno schema logico che raccogliesse i componenti e la loro distribuzione all'interno del ciclo-motore, come mostra la figura seguente:



Il modello del ciclo motore è stato dapprima semplificato ai minimi termini, individuando tre macro-settori che verranno poi via via descritti sempre più dettagliatamente.

I tre macro-settori sono stati definiti come:

- Aspirazione
- Blocco motore
- Scarico

Tenendo conto che il riferimento è sempre il motore R902 della Elbit Systems preso in esame, vengono definiti gli elementi che compongono i tre settori e l'ordine in cui sono disposti nel ciclo motore.

#### **4.1 Aspirazione**

In questo settore vengono inseriti tutti i componenti che sono compresi tra l'ambiente esterno e le valvole d'aspirazione, quest'ultime escluse.

Ne fanno parte:

- Ambiente esterno
- Turbocompressore
- Intercooler
- Airbox
- Trombette d'aspirazione
- Collettore d'aspirazione

L'ambiente esterno non fa parte della sola aspirazione perché è il medesimo che si trova all'uscita dello scarico e le sue condizioni sono coincidenti nei due casi.

## 4.2 Blocco Motore

Viene definito come appartenente a questo settore tutto ciò che si trova tra le valvole di aspirazione e quelle di scarico.



I componenti che lo compongono sono:

- Valvole di aspirazione
- Cilindri
- Iniettori
- Valvole di scarico

Dopo essere stati definiti, i singoli cilindri dovranno essere collegati all'albero motore inserendo tutti i dati corrispondenti.

Dovranno inoltre essere descritti anche biella e manovella.

### **4.3 Scarico**

In questo settore rientra tutto ciò che si trova dopo le valvole di scarico fino all'ambiente esterno.

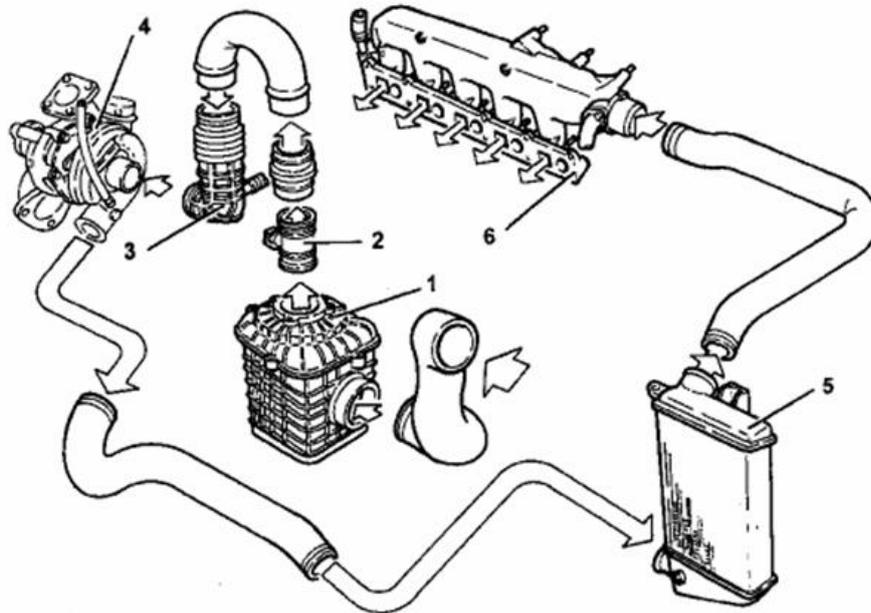
Nello studio dello scarico non si considera la turbina del turbocompressore.

Questo elemento viene analizzato nella sua completezza nella parte di aspirazione, anche se fisicamente è situato nello scarico.

## Capitolo 5

### L'aspirazione

La descrizione di questi elementi consiste, in linea di massima, nel definirne le geometrie, le temperature ed alcune caratteristiche dei condotti che portano il fluido fino alle valvole di aspirazione.



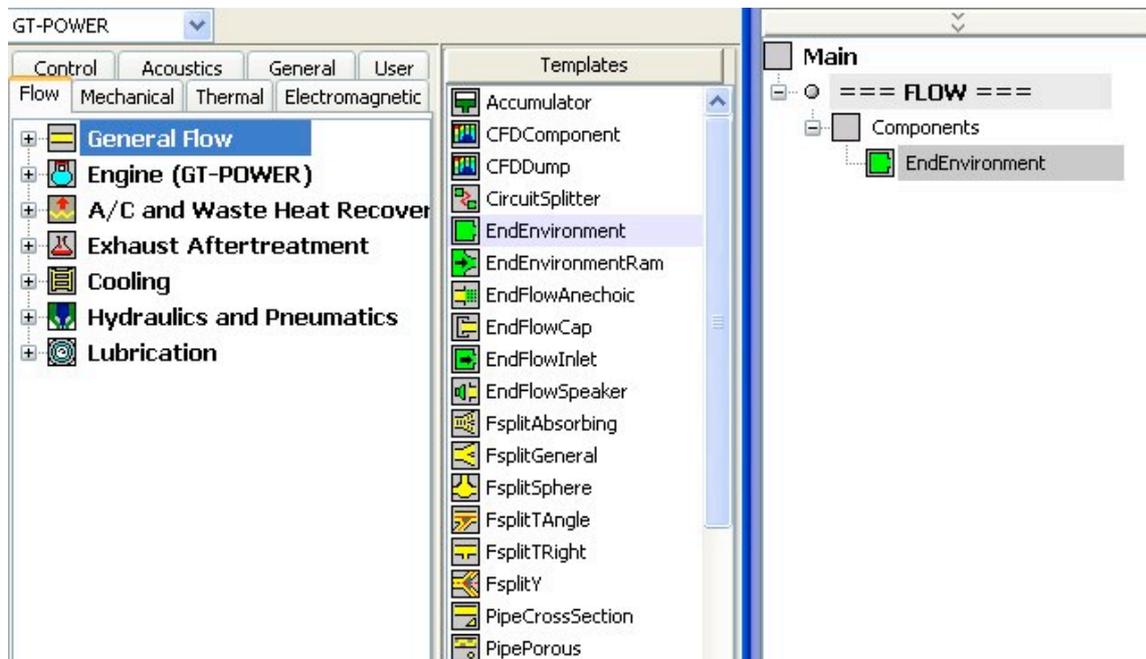
1. Filtro aria completo
2. Debimetro (misuratore massa-aria)
3. Manicotto
4. Turbocompressore
5. Intercooler
6. Airbox

In questo modello non vengono trattati il filtro dell’aria e il debimetro in quanto non influenzano i risultati che si intendono sviluppare.

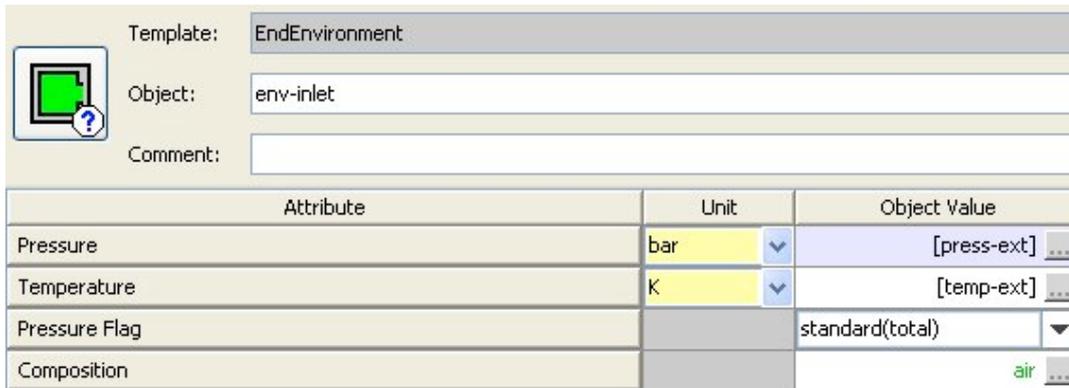
## 5.1 Ambiente esterno

Innanzitutto si definisce l’ambiente esterno in cui si trova ad operare il modello. Si considera il motore fermo, e, per la composizione dell’aria si utilizzano dei valori medi.

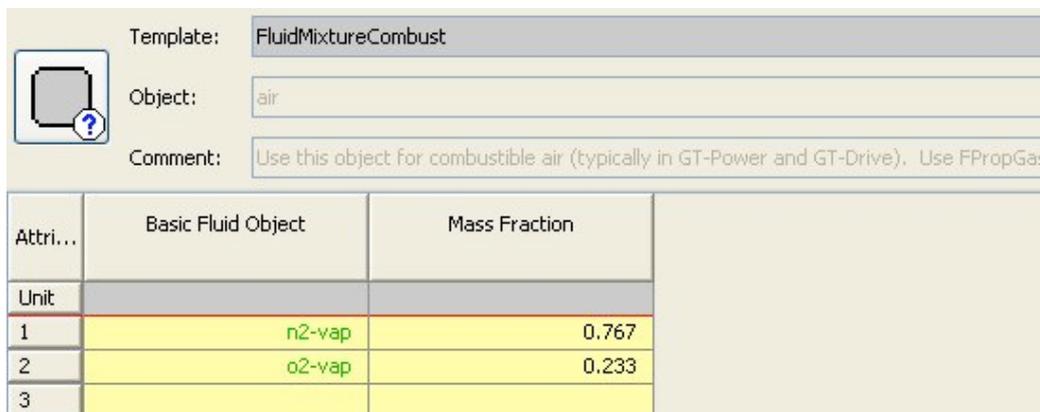
Nella libreria di GT-POWER si prende l’oggetto “EndEnvironment” e lo si definisce copiandolo (o alternativamente, trascinandolo) nel main del progetto, come in figura:



Si imposta l’ambiente esterno semplicemente come un composto di ossigeno ed azoto, con pressione e temperatura che diminuiscono all’aumentare dell’altitudine, come rappresentato in figura:



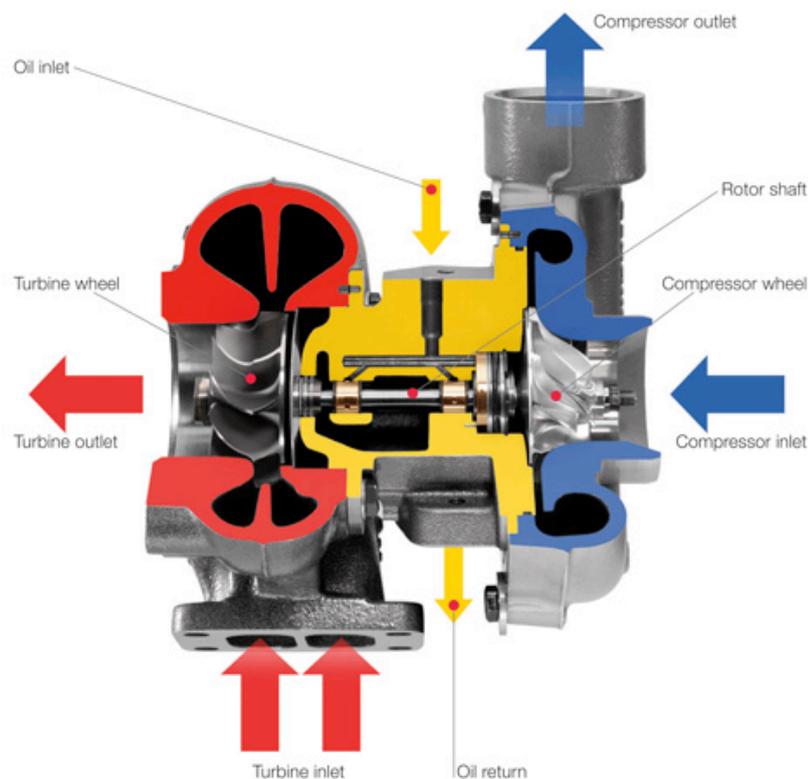
I valori di pressione e temperatura saranno introdotti prima della simulazione impostando opportunamente il “*Case Setup*” (vedi capitolo sulla simulazione). Per la composizione dell’aria sono stati presi valori medi:



L’elemento si può così ritenere definito potendolo poi trascinare sul piano di lavoro nel momento opportuno.

## 5.2 Turbocompressore

Come già anticipato nel capitolo sulla sovralimentazione, il turbocompressore è composto da una girante-turbina che viene messa in rotazione dai gas di scarico e da una girante-compressore collegata alla turbina mediante un piccolo albero.



Per effettuare la scelta del turbocompressore da inserire nel motore, nota la cilindrata e la potenza erogata dal motore, è stata svolta una prima simulazione del motore aspirato alle condizioni ambientali utilizzate dalla Garrett.

Questa simulazione è servita per ricavare la portata in massa d'aria aspirata dal motore, fornendo i seguenti valori:

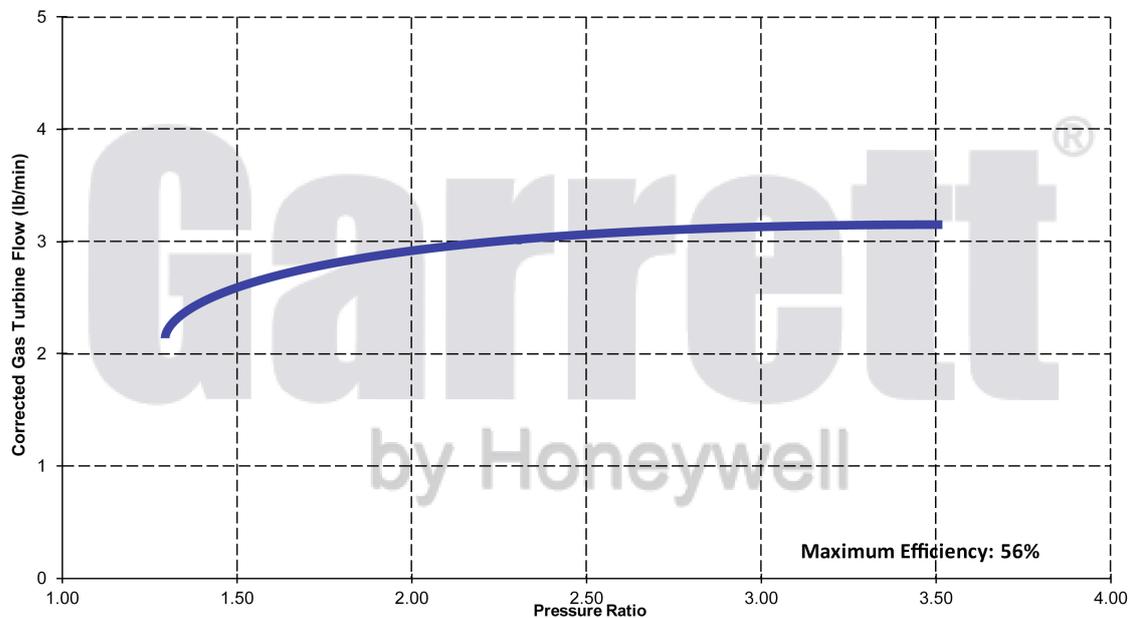
- 2.89 lb/min a 4000 RPM
- 7.85 lb/min a 7550 RPM

In base ai dati fin qui raccolti si è scelto, dal catalogo Garrett, il turbocompressore GT0632SZ.

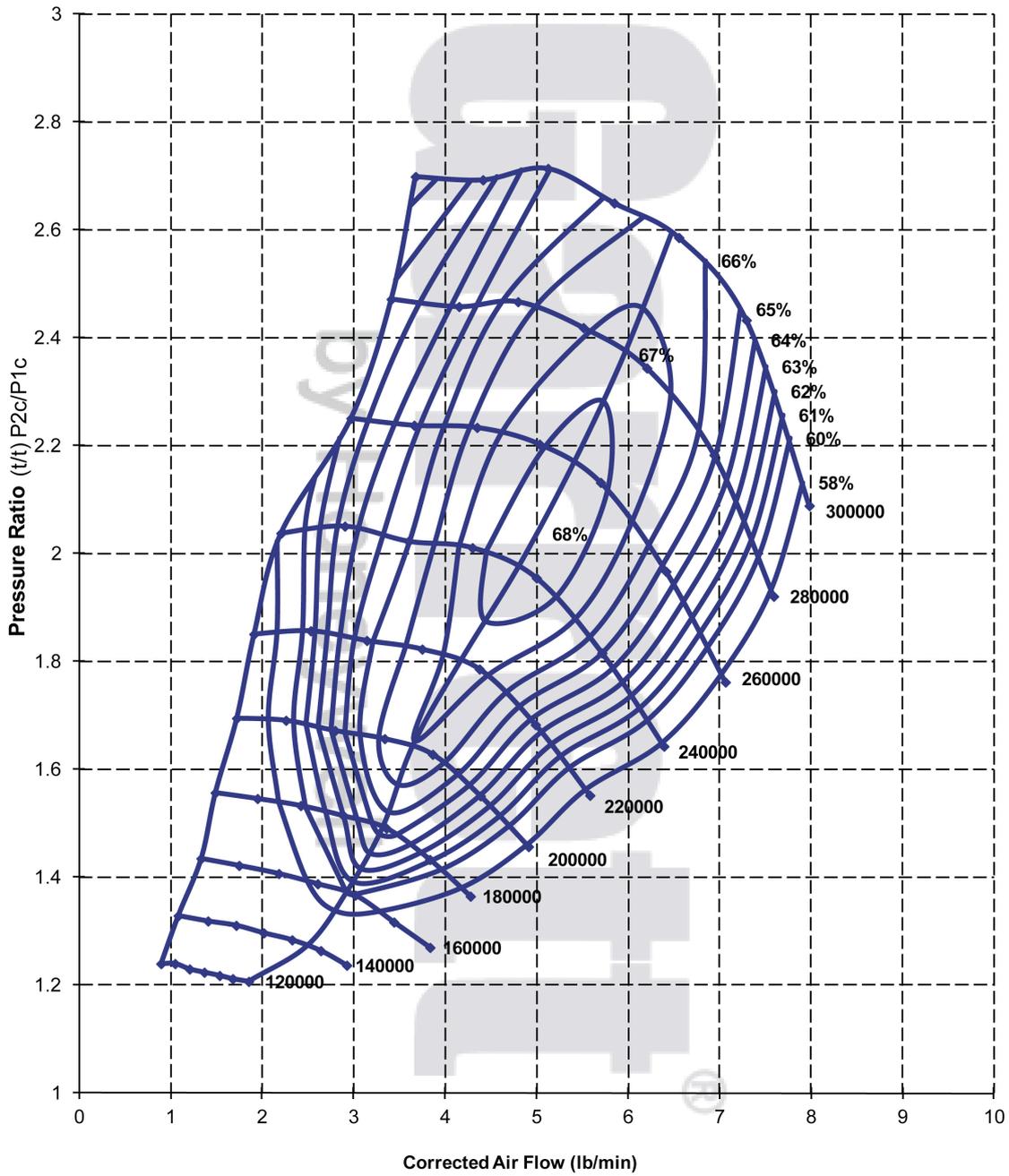


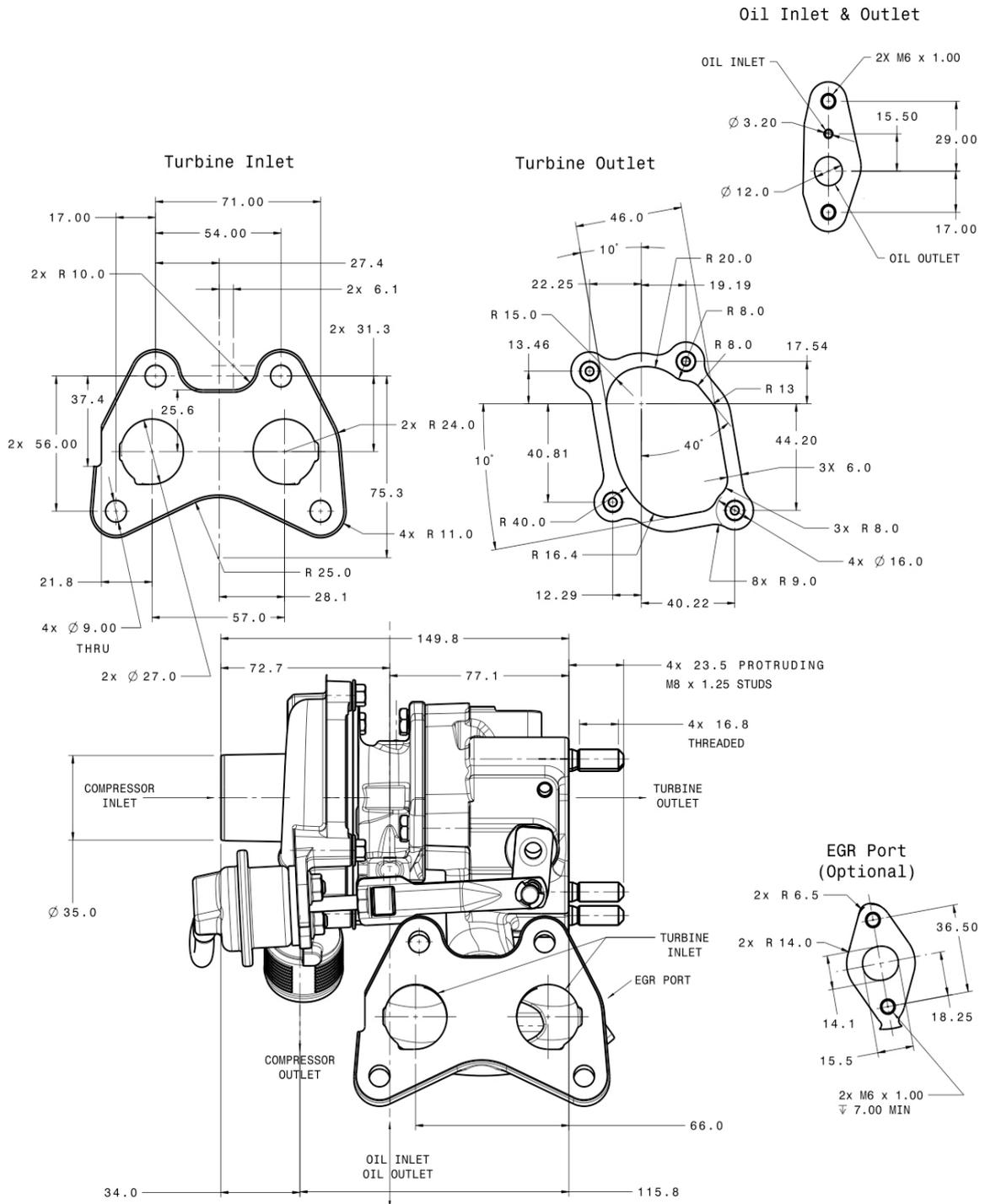
Si riportano le immagini delle mappe relative a turbina e compressore e della geometria del turbocompressore:

**GT0632SZ, 72 Trim, 0.18 A/R**



### GT0632SZ, 32 mm, 50 Trim, 0.32 A/R





Si procede poi alla definizione di questo elemento. Inizialmente, si crea una condotta cilindrica che rappresenta l’ingresso nel compressore e se ne definiscono le geometrie.


 Template: PipeRound  
 Object: comp-in  
 Comment:

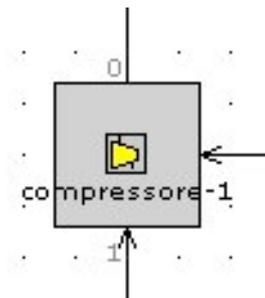
Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	70
Diameter at Outlet End	mm	70
Length	mm	150
Discretization Length	mm	40
Material for Default Surface Roughness		smooth_plastic
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	[temp-ext]
Heat Conduction Object		ign
Initial State Name		initial

Si possono decidere quali parametri graficare sul file dedicato alla visualizzazione dei risultati (GT-POST):

 Pressure (Static)	<input type="checkbox"/>
 Pressure (Total)	<input type="checkbox"/>
 Mass Flow Rate (at the Boundary)	<input type="checkbox"/>
 Integrated Mass Flow Rate (at the Boundary)	<input type="checkbox"/>
 Volumetric Flow Rate (at the Boundary)	<input type="checkbox"/>
 Velocity (at the Boundary)	<input type="checkbox"/>
 Average Subvolume Velocity (centroid)	<input type="checkbox"/>
 Mach Number	<input type="checkbox"/>
 Volume of Pipe Subvolume	<input type="checkbox"/>
 Courant Condition Timestep	<input type="checkbox"/>
 Unsteady Friction Enhancement	<input type="checkbox"/>
 Reynolds Number	<input type="checkbox"/>
 Traveling Waves	<input type="checkbox"/>
 Body Force Acceleration (Total)	<input type="checkbox"/>
 Body Force Acceleration (Components)	<input type="checkbox"/>

Questo elemento è definito e si potrà trascinare sul piano di lavoro a tempo debito.

Adesso è possibile creare il compressore e inserire gli elementi da rappresentare graficamente.



Per definire il compressore è necessario inserire la mappa del GT0632SZ.

	Template:	Compressor		
	Object:	compressore		
	Comment:			
Attribute	Unit	Rack Position #1	Rack Position #2	
Rack Array		1 ...	...	
Map Object or File		comp-gt0632 ...	...	

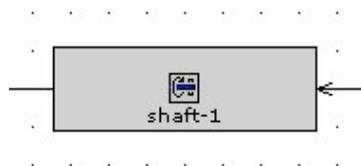
Una volta creato l'oggetto "mappa" si ottiene la schermata successiva nella quale è opportuno inserire i valori, punto per punto, di velocità di rotazione, portata, rapporto di compressione ed efficienza dei vari punti di funzionamento presenti sulla mappa del compressore del Garrett GT0632SZ.

## Capitolo 5 – L’aspirazione

Template: CompressorMap  
 Object: comp-gt0632  
 Comment:

Attri...	Speed	Mass Flow Rate	Pressure Ratio	Efficiency
Unit	RPM	lb/min		fraction
35	160000	3.85	1.262	0.5
36	180000	1.5	1.555	0.5
37	180000	1.7	1.55	0.5
38	180000	1.9	1.545	0.5
39	180000	2.1	1.54	0.5
40	180000	2.3	1.535	0.58
41	180000	2.5	1.53	0.6
42	180000	2.7	1.521	0.6
43	180000	2.9	1.511	0.61
44	180000	3.1	1.504	0.63
45	180000	3.3	1.495	0.64
46	180000	3.5	1.478	0.64
47	180000	3.7	1.45	0.62
48	180000	3.9	1.422	0.6
49	180000	4.1	1.39	0.58
50	180000	4.3	1.36	0.5
51	200000	1.73	1.695	0.5
52	200000	1.9	1.695	0.5
53	200000	2.2	1.69	0.58
54	200000	2.5	1.68	0.61
55	200000	2.8	1.67	0.63

Si crea ora, tramite l’elemento “ShaftTurbo”, l’albero che collega il compressore alla turbina e si inserisce come velocità di rotazione quella minima del compressore scelto.




 Template: ShaftTurbo  
 Object: shaft  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Initial Speed	RPM	180000
Initial Angular Position	deg	0
"Previous_case" Initialization State Option		DontOverride
Shaft Moment of Inertia	kg-m <sup>2</sup>	1E-6
Friction Mechanical Efficiency	fraction	def
Inertia Multiplier		def

Si scelgono infine i parametri da rappresentare graficamente.

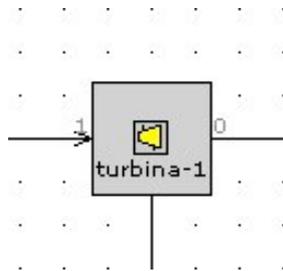

 Template: ShaftTurbo Part:  
 Object: shaft  
 Object Comment:  
 Comment:

Select / Unselect All Plots	<input type="checkbox"/>
 Speed (Last Cycle vs. Angle for Periodic Simulations)	<input type="checkbox"/>
 Speed vs. Time	<input checked="" type="checkbox"/>
 Shaft Net Torque (Summation)	<input type="checkbox"/>
 Shaft Net Power (Summation)	<input type="checkbox"/>
 Friction Torque	<input type="checkbox"/>
 Friction Power	<input type="checkbox"/>
 Inertia	<input type="checkbox"/>
 Position	<input type="checkbox"/>
 Displacement	<input type="checkbox"/>
 Acceleration	<input type="checkbox"/>

Per terminare il turbocompressore rimane da inserire la turbina, che è situata nello scarico, ma che viene presentata in questo capitolo perchè collegata al compressore collocato in aspirazione tramite l'albero (ShaftTurbo) che è stato appena creato.

Come per il compressore è necessario inserire la mappa della turbina.

Si seleziona l'oggetto "Turbine" dalla libreria, e lo si porta sul piano di lavoro, collegandolo opportunamente:



Al suo interno, si inserisce la mappa mostrata precedentemente, sempre inserendo i valori del numero di giri, portata, rapporto di pressione, ed efficienza punto per punto:

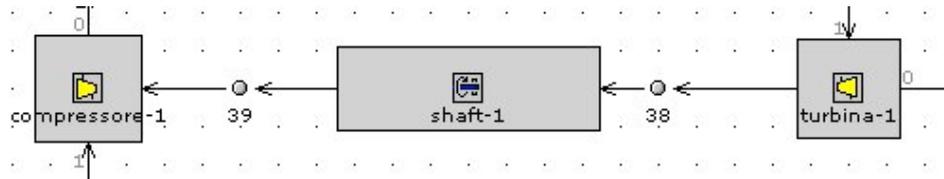
## Capitolo 5 – L'aspirazione

Template: TurbineMap					
					
Object: turb-gt0632					
Comment:					
Attri...	Turbine Speed		Mass Flow Rate		Efficiency
Unit	RPM	lb/min			fraction
1	120000	2.16	1.3	0.56	
2	120000	2.3	1.325	0.56	
3	120000	2.37	1.35	0.56	
4	120000	2.41	1.375	0.56	
5	120000	2.46	1.4	0.56	
6	120000	2.5	1.425	0.56	
7	120000	2.53	1.45	0.56	
8	120000	2.56	1.475	0.56	
9	120000	2.59	1.5	0.56	
10	120000	2.62	1.525	0.56	
11	140000	2.64	1.55	0.56	
12	140000	2.66	1.575	0.56	
13	140000	2.68	1.6	0.56	
14	140000	2.7	1.625	0.56	
15	140000	2.72	1.65	0.56	
16	140000	2.74	1.675	0.56	
17	140000	2.76	1.7	0.56	

Da ultimo si inseriscono nel menu denominato "Main" i valori limite di pressione e numero di giri che si ricavano dalla mappa prestazionale della mia turbina, inserendo poi pressione e temperatura di riferimento.

Template:	TurbineMap	
Object:	turb-gt0632	
Comment:		
Attribute	Unit	Object Value
Turbine Map File		ign ...
Plots?		<input checked="" type="checkbox"/>
Reference Pressure	bar	1
Reference Temperature	K	300
Reference Gas Constant	J/kg-K	def ...
Maximum Pressure Ratio		3.525
Maximum Speed	RPM	300000
Wheel Diameter	mm	def ...

Ora il mio gruppo turbocompressore è stato creato, ed è virtualmente distinto in tre componenti differenti: compressore (compressore-1), turbina (turbina-1), albero di collegamento girante (shaft-1).



Gli elementi così creati possono essere sfruttati per testare anche turbocompressori Garrett maggiorati, naturalmente sostituendone la mappa nella sezione "data" e caratteristiche di funzionamento generali nella sezione "main".

### **5.3 Intercooler**

L'intercooler è uno scambiatore di calore che raffredda l'aria in uscita dal compressore nei veicoli dotati di turbocompressore.

La turbo-sovralimentazione consente di aumentare la potenza del motore, anche se di capacità ridotta, inserendo una quantità maggiore d'aria nel motore, e quindi una maggior quantità di carburante.

Durante la compressione l'aria tende a riscaldarsi e la sua densità viene ridotta. Ciò contrasta l'effetto stesso della compressione.

L'effetto dell'intercooler è proprio quello di ridurre la temperatura dell'aria compressa, consentendo di sfruttare interamente la turbo-sovralimentazione, migliorando l'efficienza del motore.

Questo scambiatore si può schematizzare come un susseguirsi di condotte cilindriche e di biforcazioni. Quest'ultime vengono definite in base ai diametri degli sbocchi e al volume della biforcazione stessa.

Per prima si definisce la condotta cilindrica che si trova all’ingresso e all’uscita dell’intercooler:


 Template: PipeRound  
 Object: cooler-in  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	70
Diameter at Outlet End	mm	70
Length	mm	40
Discretization Length	mm	40
Material for Default Surface Roughness		user_value
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	[temp-ext]
Heat Conduction Object		ign
Initial State Name		initial


 Template: PipeRound  
 Object: cooler-out  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	70
Diameter at Outlet End	mm	70
Length	mm	40
Discretization Length	mm	40
Material for Default Surface Roughness		user_value
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	[cooler]
Heat Conduction Object		ign
Initial State Name		initial

Adesso si definiscono le biforcazioni inserendone il volume:


 Template: FsplitGeneral  
 Object: cooler-fsplit  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Volume	mm <sup>3</sup>	190000
Material for Default Surface Roughness		user_value
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	[cooler]
Heat Conduction Object		ign
Initial State Name		initial

Rimane da definire la condotta cilindrica che collega le due biforcazioni:

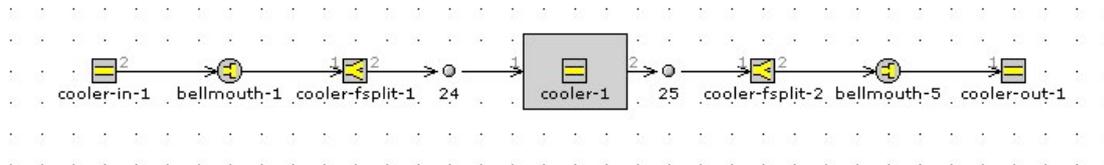

 Template: PipeRound  
 Object: cooler  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	2.6
Diameter at Outlet End	mm	2.6
Length	mm	300
Discretization Length	mm	40
Material for Default Surface Roughness		user_value
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	[cooler]
Heat Conduction Object		ign
Initial State Name		initial

Agli estremi dell’intercooler sono presenti due svassi (bellmouth-1,bellmouth-5) che vengono riportati nel modello con il seguente elemento:

Template: OrificeConn Object: bellmouth Comment:		
		
Attribute	Unit	Object Value
Hole Diameter	mm	def
Number of Holes		def
Forward Discharge Coefficient		1
Reverse Discharge Coefficient		1
Hole Thickness	mm	def

L’intercooler è stato definito in tutte le sue componenti e risulterà sul banco di lavoro nella seguente maniera:



## 5.4 Airbox

La funzione principale dell’airbox è quella di fornire aria il più possibile indipendente dai fenomeni dinamici esterni e con un alto valore di pressione.

Nel modello che stiamo costruendo si deve quindi rappresentare questo oggetto tenendo presente che:

- Il modello deve poter essere variato con estrema rapidità;
- Il modello deve essere “leggero”, per migliorare la velocità di calcolo;
- Il volume dell’airbox è la grandezza di maggior interesse;
- Deve avere un ingresso (collegato all’intercooler tramite una condotta cilindrica) e tre uscite, una per ogni valvola d’aspirazione;

Si considera l’airbox come un grande condotto con tre uscite che si rappresentano tramite altrettante biforcazioni.

Una volta fissata la lunghezza del condotto, se ne può variare il volume modificandone la sezione di passaggio o modificando il volume delle biforcazioni.

Si definisce per prima la biforcazione a tre sbocchi:

Template: FsplitGeneral		
Object: man-fs		
Comment:		
		
Attribute	Unit	Object Value
Volume	mm <sup>3</sup> ▼	256000 ...
Material for Default Surface Roughness		smooth_plastic ▼
Surface Roughness	mm ▼	def ...
Wall Temperature	K ▼	350 ...
Heat Conduction Object		ign ...
Initial State Name		initial ...

Rimane da definire il condotto che unisce le biforcazioni:

	Template:	PipeRectangle
	Object:	man-pipe
	Comment:	
Attribute	Unit	Object Value
Height at Inlet End	mm	70
Width at Inlet End	mm	70
Height at Outlet End	mm	70
Width at Outlet End	mm	70
Length	mm	92
Discretization Length	mm	40
Material for Default Surface Roughness		smooth_plastic
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	350
Heat Conduction Object		ign
Initial State Name		initial

L’airbox è completo e lo si potrà trascinare nel piano di lavoro a tempo debito.

## 5.5 Condotti d’aspirazione

Le trombette d’aspirazione collegano l’airbox con i condotti di aspirazione. Esse sono tre, una per cilindro.

Il fatto che nella realtà esse siano parzialmente inserite all’interno dell’airbox crea delle difficoltà nel definirle con questo simulatore.

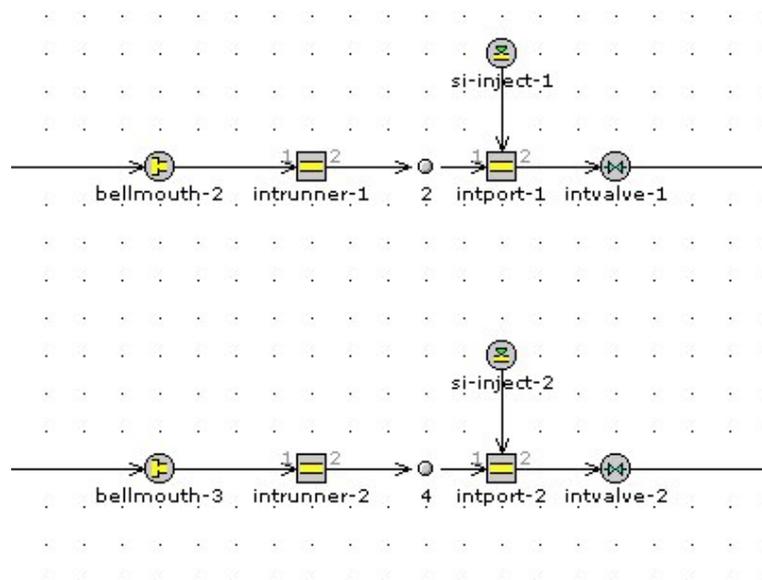
Dal disegno dell’elemento si può notare che si tratta essenzialmente di un condotto cilindrico con all’imbocco una svasatura per facilitare il passaggio del flusso.

Questa verrà rappresentata da un collegamento di cui viene impostato a priori il coefficiente di efflusso.

Nel modello le trombette saranno quindi definite da un collegamento ed un condotto cilindrico.

Il diametro del collegamento non è stato fissato ma ne è stato vincolato il coefficiente di efflusso considerando l'assenza del filtro dell'aria e le relative opzioni per la verifica dati.

Ogni condotto d'aspirazione, che nella realtà ha un andamento incurvato, è stato schematizzato dal susseguirsi di due tratti rettilinei, collegati poi all'elemento valvola:



Come si vede in figura, l'iniettore è stato installato nel secondo tratto rettilineo del condotto di aspirazione. Le ragioni di questa scelta verranno espone nel capitolo successivo.

Definisco le varie geometrie:


 Template: OrificeConn  
 Object: bellmouth  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Hole Diameter	mm	def
Number of Holes		def
Forward Discharge Coefficient		1
Reverse Discharge Coefficient		1
Hole Thickness	mm	def


 Template: PipeRound  
 Object: intrunner  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	45 ...
Diameter at Outlet End	mm	45 ...
Length	mm	350 ...
Discretization Length	mm	40 ...
Material for Default Surface Roughness		smooth_plastic ▾
Surface Roughness	mm	def ...
Wall Temperature	K	350 ...
Heat Conduction Object		ign ...
Initial State Name		initial ...

Template:

Object:

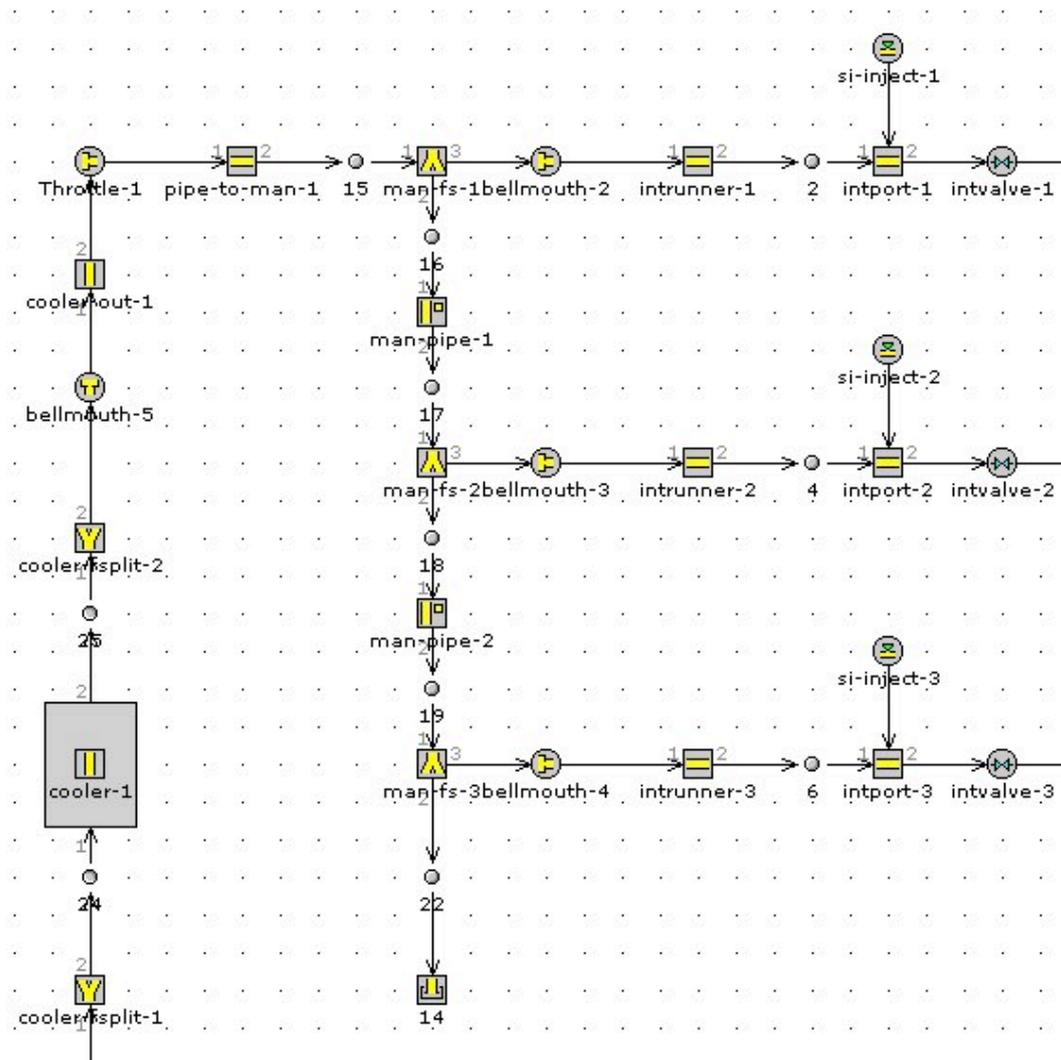
Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm <input type="button" value="v"/>	45 <input type="button" value="..."/>
Diameter at Outlet End	mm <input type="button" value="v"/>	45 <input type="button" value="..."/>
Length	mm <input type="button" value="v"/>	80 <input type="button" value="..."/>
Discretization Length	mm <input type="button" value="v"/>	40 <input type="button" value="..."/>
Material for Default Surface Roughness		cast_iron <input type="button" value="v"/>
Surface Roughness	mm <input type="button" value="v"/>	def <input type="button" value="..."/>
Wall Temperature	K <input type="button" value="v"/>	450 <input type="button" value="..."/>
Heat Conduction Object		ign <input type="button" value="..."/>
Initial State Name		initial <input type="button" value="..."/>

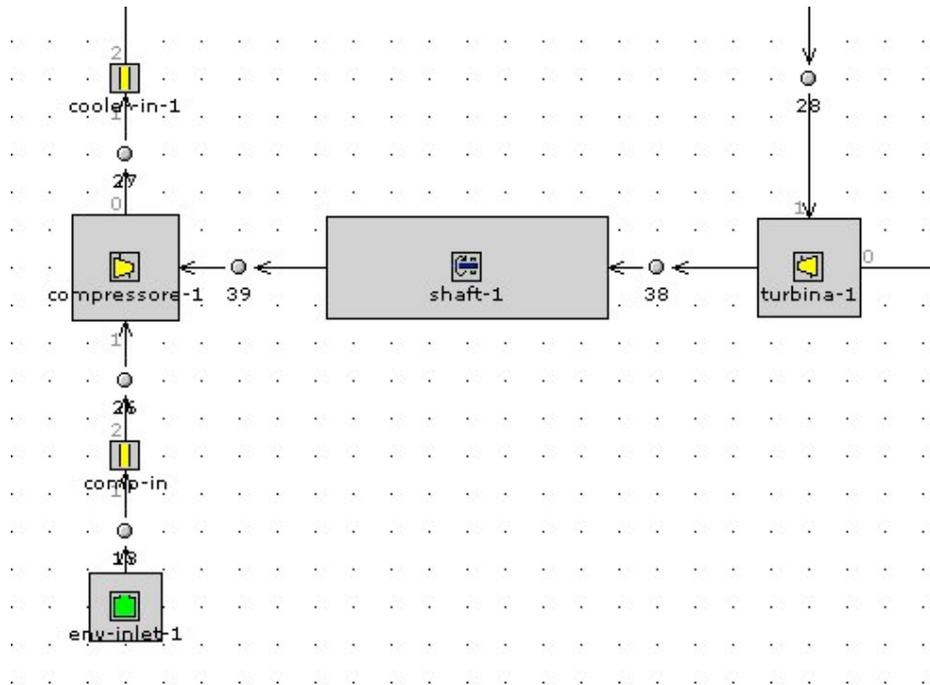
Sono stati definiti tutti i componenti dell’aspirazione, e assemblandoli si ottiene tutta l’aspirazione del modello.

Per quanto riguarda la definizione dell'elemento valvola l'argomento verrà trattato nel prossimo capitolo inerente la definizione degli organi del motore.

Di seguito viene riportata la sezione centrale dell’aspirazione, all’interno della quale si può riconoscere sulla sinistra l’intercooler e i relativi condotti, sulla destra invece la parte riguardante l’airbox e i condotti di aspirazione.



La figura seguente indica invece il gruppo turbocompressore associato all'ambiente attraverso il condotto comp-in-1 e all'intercooler mediante l'elemento cooler-in-1.





## Capitolo 6

### Blocco motore

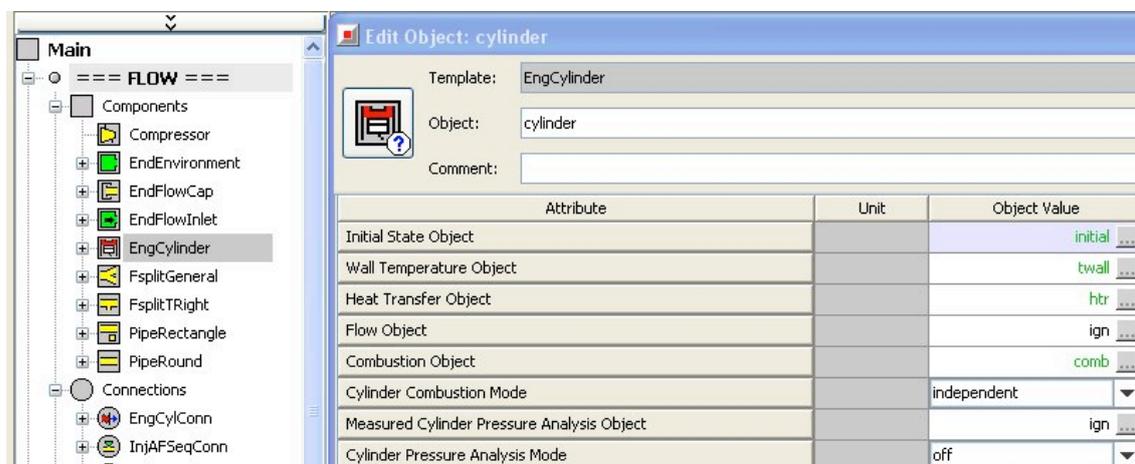
Come già anticipato nel capitolo introduttivo, si è cercato di simulare il motore Wankel come un motore a movimento alternativo, tre cilindri, quattro tempi.

Per simulare il blocco motore si devono definire i cilindri, le valvole, gli iniettori e l'albero motore.

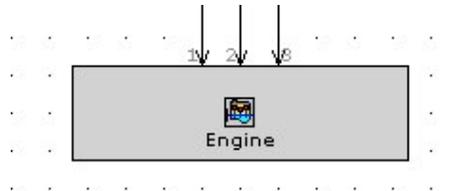
Nella creazione dei componenti di questo settore è possibile creare un singolo ramo con una valvola di aspirazione, un cilindro, un iniettore e una valvola di scarico e copiarlo per tre volte, ovvero il numero di cilindri del motore in esame.

#### 6.1 I cilindri

Si definisce il cilindro creando un nuovo elemento:



Tale elemento dovrà essere poi collegato, insieme ai restanti due cilindri all'albero motore (Engine):



Esso è così definito:

Template: EngineCrankTrain

Object: cranktrain

Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Engine Type		4-stroke
Speed or Load Specification		speed
Engine Speed	RPM	[RPM]
Engine Friction Object or FMEP		friction
Start of Cycle (CA at IVC)		-36

Al suo interno è inoltre possibile caratterizzare la geometria del cilindro:

Template: EngineCrankTrain

Object: cranktrain

Comment:

Attribute	Unit	Cylinder #1	Cylinder #2	Cylinder #3	Cylinder #4
Cylinder Geometry Object		geom	geom	geom	
Crank-Slider Object		ign	ign	ign	

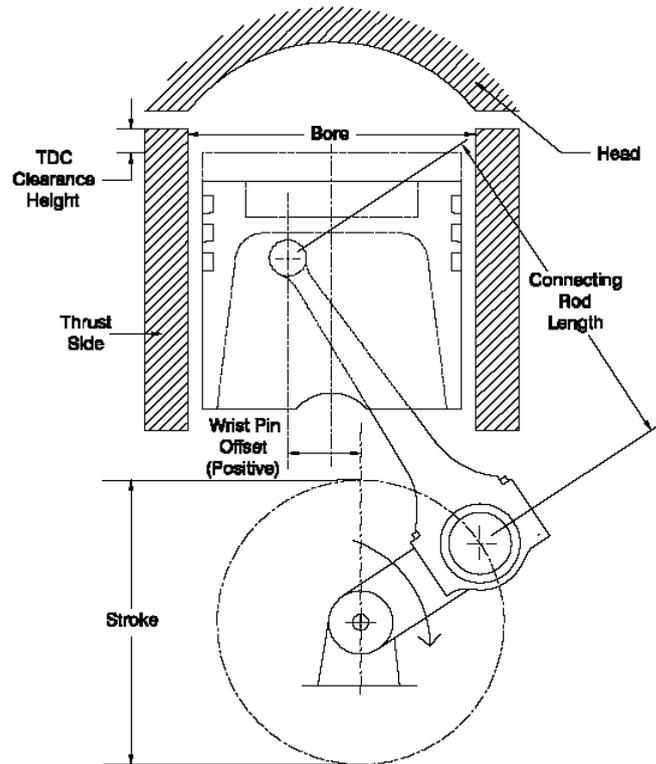
Con il termine “geom” si definiscono i valori geometrici che contraddistinguono cilindro, pistone e biella.

	Template:	EngCylGeom	
	Object:	geom	
	Comment:		
Attribute		Unit	Object Value
Bore	mm	▼	118.6 ...
Stroke	mm	▼	31.2 ...
Connecting Rod Length	mm	▼	180 ...
Compression Ratio			7.6 ...
TDC Clearance Height	mm	▼	0.5 ...

Si definiscono i valori che si trovano in questa tabella:

- **Bore**: alesaggio del cilindro;
- **Stroke**: corsa del pistone;
- **Connecting rod length**: lunghezza della biella;
- **Compression ratio**: rapporto di compressione;
- **Tdc clearance ratio**: distanza tra la parte superiore del cilindro (dove si appoggia la testata) ed il pistone, quando quest'ultimo si trova nella posizione di punto morto superiore.

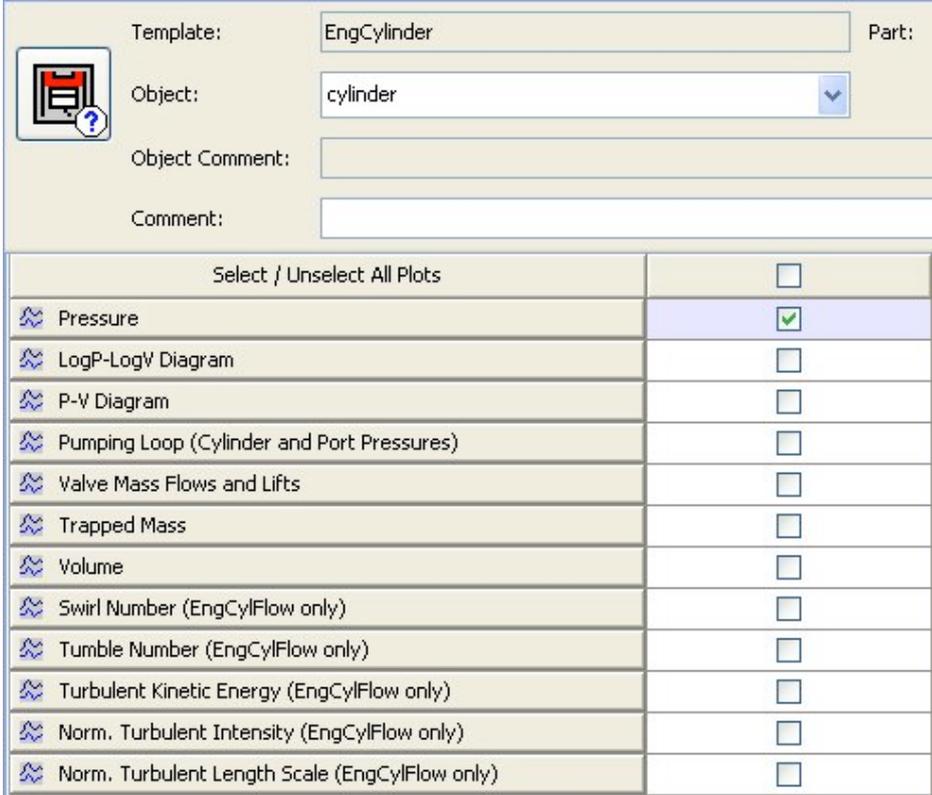
Questo valore viene utilizzato nel calcolo degli scambi termici.



Con il termine “*initial*” usato in precedenza si intendono semplicemente le condizioni iniziali dell’ambiente, ovvero aria alla pressione di 1 bar ed alla temperatura di 300 K:

	Template: <input type="text" value="FluidInitialState"/>	
	Object: <input type="text" value="initial"/>	
	Comment: <input type="text"/>	
Attribute	Unit	Object Value
Pressure	bar <input type="button" value="v"/>	1 <input type="button" value="..."/>
Temperature	K <input type="button" value="v"/>	300 <input type="button" value="..."/>
Composition		air <input type="button" value="..."/>

Infine si scelgono i valori da rappresentare su grafico:



Template:	EngCylinder	Part:
Object:	cylinder	
Object Comment:		
Comment:		
Select / Unselect All Plots		<input type="checkbox"/>
Pressure		<input checked="" type="checkbox"/>
LogP-LogV Diagram		<input type="checkbox"/>
P-V Diagram		<input type="checkbox"/>
Pumping Loop (Cylinder and Port Pressures)		<input type="checkbox"/>
Valve Mass Flows and Lifts		<input type="checkbox"/>
Trapped Mass		<input type="checkbox"/>
Volume		<input type="checkbox"/>
Swirl Number (EngCylFlow only)		<input type="checkbox"/>
Tumble Number (EngCylFlow only)		<input type="checkbox"/>
Turbulent Kinetic Energy (EngCylFlow only)		<input type="checkbox"/>
Norm. Turbulent Intensity (EngCylFlow only)		<input type="checkbox"/>
Norm. Turbulent Length Scale (EngCylFlow only)		<input type="checkbox"/>

I cilindri sono definiti e possono essere trasportati nel foglio di lavoro in fase di assemblaggio del modello.

## 6.2 Gli iniettori

Al giorno d'oggi, il compito di dosare la quantità di combustibile richiesta dal motore ad accensione comandata è affidata al sistema di iniezione.

Il sistema di iniezione, rispetto alla classica carburazione, consente di ottenere i seguenti vantaggi:

- Migliore controllo del rapporto aria/combustibile in tutte le condizioni di funzionamento e maggiore uniformità di distribuzione della miscela tra i vari cilindri, con evidenti benefici su consumo di combustibile, potenza massima, ripresa e qualità dei gas di scarico.
- Più elevato coefficiente di riempimento grazie alle minori perdite di carico e un riscaldamento contenuto nel condotto di aspirazione.
- Più bassa richiesta ottanica, a causa dei più brevi tempi a disposizione perché avvengano reazioni chimiche nella miscela.

I contro di questo sistema sono invece:

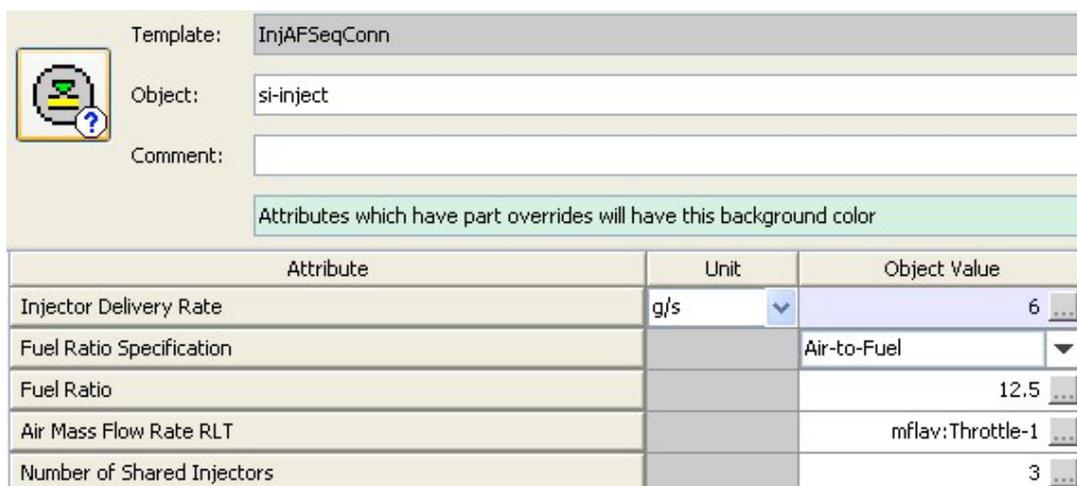
- Peggior omogeneizzazione della carica.
- Maggiore costo di realizzazione dell'impianto.
- Maggiore complessità con conseguente aumento dei problemi di messa a punto.

Il sistema di alimentazione per iniezione si è sviluppato inizialmente nel settore aeronautico, con gruppi di tipo meccanico ispirati agli analoghi destinati ai motori Diesel ed iniettando combustibile direttamente nel cilindro. Poi si è trovata più conveniente, per il motore ad accensione comandata, l'iniezione indiretta nel collettore di aspirazione perché garantisce una migliore omogeneizzazione della carica, sottopone l'iniettore a minori carichi termici e permette di usare pressioni di iniezione più basse.

La massiccia introduzione della tecnologia elettronica ha introdotto ulteriori vantaggi a livello di precisione e controllo.

Per la realizzazione dell'iniettore utilizzo l'oggetto "InjAFSeqConn" che può essere utilizzato sia per iniezione diretta che indiretta.

Si definisce l'elemento:



Template: InjAFSeqConn

Object: si-inject

Comment:

Attributes which have part overrides will have this background color

Attribute	Unit	Object Value
Injector Delivery Rate	g/s	6
Fuel Ratio Specification		Air-to-Fuel
Fuel Ratio		12.5
Air Mass Flow Rate RLT		mflav:Throttle-1
Number of Shared Injectors		3

## Capitolo 6 - Blocco motore


 Template: InjAFSeqConn  
 Object: si-inject  
 Comment:

Attributes which have part overrides will have this background color

Attribute	Unit	Object Value
Part Giving Angle (def=Attached Cylinder)		*
Driver Object Giving Angle		ign
Injection Timing Angle	deg	300
Injection Timing Flag		injection-start
Injector Location (Pipes only)		0.5
Injected Fluid Temperature	K	300
Fluid Object		indolene-combust
Vaporized Fuel Fraction		1

Si nota nella penultima voce della seconda immagine “*fluid object*” che definisce le proprietà del fluido che si andrà ad inserire:


 Template: FluidLiqIncompress  
 Object: indolene-combust  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Vapor Fluid Object		indolene-vap
Heat of Vaporization at 298K	J/kg	350000
Density	kg/m <sup>3</sup>	750
Absolute Entropy at 298K	J/kg-K	ign

## Capitolo 6 - Blocco motore

---

Template: FluidLiqIncompress				
Object: indolene-combust				
Comment:				
Attri...	Temperature Array	Pressure Array	Dynamic Viscosity Array	Thermal Conductivity Array
Unit	K	bar	kg/m-s	W/m-K
1	273	def	0.0004	0.147
2	280		0.00037	0.144
3	290		0.00034	0.147
4	300		0.00031	0.146
5	310		0.000286	0.145
6	320		0.00026	0.144
7	330		0.00024	0.143
8	340		0.00022	0.142

L'iniettore si può ritenere definito e pronto per essere portato nel piano di lavoro.

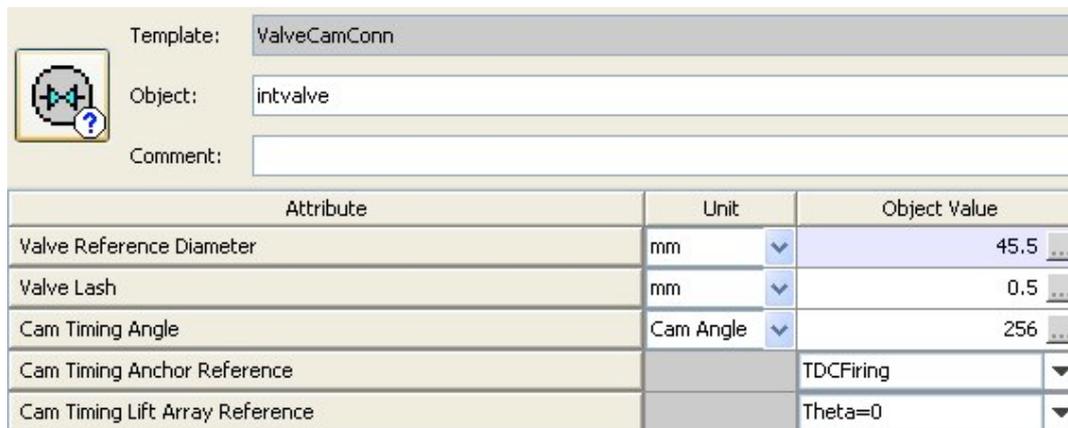


### 6.3 Valvole di aspirazione e scarico

Il motore in esame è stato simulato montando due valvole per cilindro: una valvola di aspirazione e una di scarico.

Le valvole differiscono geometricamente da quelle di aspirazione a quelle di scarico e i valori delle alzate sono stati forniti in base all'angolo motore; è da sottolineare che questi dati sono uguali per tutti i cilindri.

Una volta stabilite le alzate delle valvole si può definirle nel modello:



Template:	ValveCamConn	
Object:	intvalve	
Comment:		
Attribute	Unit	Object Value
Valve Reference Diameter	mm	45.5 ...
Valve Lash	mm	0.5 ...
Cam Timing Angle	Cam Angle	256 ...
Cam Timing Anchor Reference		TDCFiring
Cam Timing Lift Array Reference		Theta=0

Dove si è inserito:

- Diametro della valvola;
- Gioco della valvola;
- Fasatura

I dati riguardanti l'alzata della valvola possono essere inseriti singolarmente oppure si può semplicemente allegare un foglio excel nell'array delle alzate.

## Capitolo 6 - Blocco motore

Template: ValveCamConn

Object: intvalve

Comment:

Attri...	Angle Array	Lift Array
Unit	Cam Angle	mm
1	-73	0
2	-72	0.00191
3	-71	0.00533
4	-70	0.0107
5	-69	0.0179
6	-68	0.0271
7	-67	0.0373
8	-66	0.0495
9	-65	0.0648
10	-64	0.0842
11	-63	0.10897
12	-62	0.14021
13	-61	0.17907

Lo stesso discorso vale per l'inserimento dei coefficienti di efflusso e di reflusso della valvola:

Template: ValveCamConn

Object: intvalve

Comment:

Attri...	Reference Array	Forward CD	Reverse CD	Swirl Coefficients
Unit				
1	0	0	0	ign
2	0.028	0.0915	0.0915	
3	0.056	0.182	0.182	
4	0.084	0.244	0.244	
5	0.112	0.311	0.311	
6	0.14	0.371	0.371	
7	0.167	0.411	0.411	
8	0.195	0.443	0.443	
9	0.223	0.464	0.464	
10	0.251	0.469	0.469	
11	0.279	0.481	0.481	

La fasatura consiste nel posizionare reciprocamente le due camme.

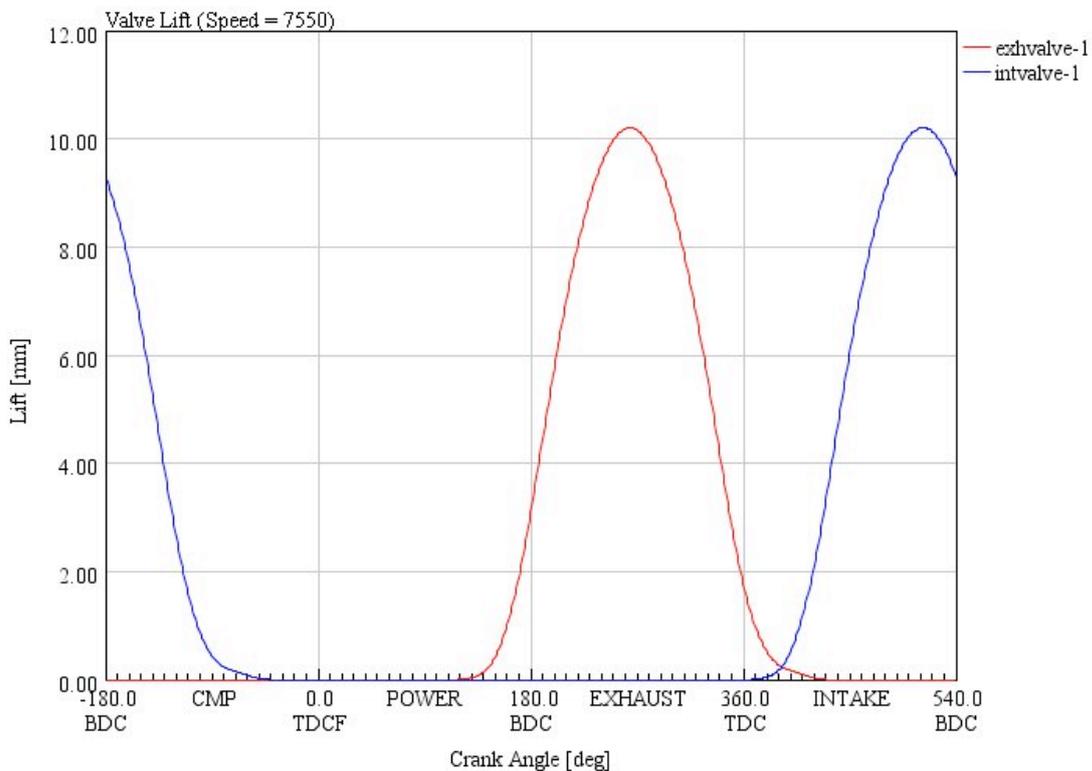
Il punto di riferimento sulle curve è dato dal vertice della curva di alzata.

Il punto di alzata massima è anche il punto ad angolo zero nell'array di alzata.

I punti della rampa di ascesa avranno quindi angolo negativo mentre quelli in discesa saranno i punti con angolo positivo.

Per settarle reciprocamente nel menù principale "main" si definisce il "cam timing angle" di ognuna, ovvero la distanza angolare tra l'angolo zero dell'albero motore ed il punto di massimo della curva.

Si ottiene un grafico delle alzate con il seguente andamento:



Terminata la fasatura si sono definite completamente le valvole presenti nel blocco motore e le si potrà trascinare al momento opportuno nel piano di lavoro.

## 6.4 Albero motore

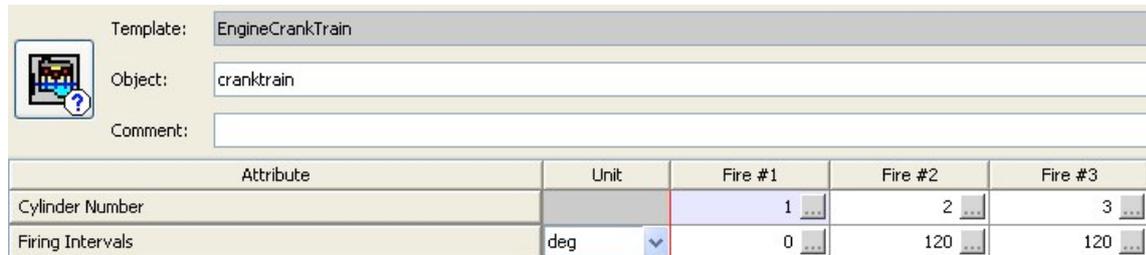
I tre cilindri creati precedentemente vanno ora collegati all'albero motore.

Finora i cilindri erano tre elementi uguali, ora invece li si deve individuare singolarmente con i numeri 1, 2, 3 per poterne definire la sequenza di scoppio.

Essenzialmente si deve collegare un motore quattro tempi, ai tre cilindri:

	Template: EngineCrankTrain	
	Object: cranktrain	
	Comment:	
Attribute	Unit	Object Value
Engine Type		4-stroke
Speed or Load Specification		speed
Engine Speed	RPM	[RPM]
Engine Friction Object or FMEP		friction
Start of Cycle (CA at IVC)		-36

Una volta collegati è necessario definirne la posizione e l'ordine di scoppio. Sono 3 cilindri che scoppiano ogni 120° l'uno dall'altro, seguendo questo schema:



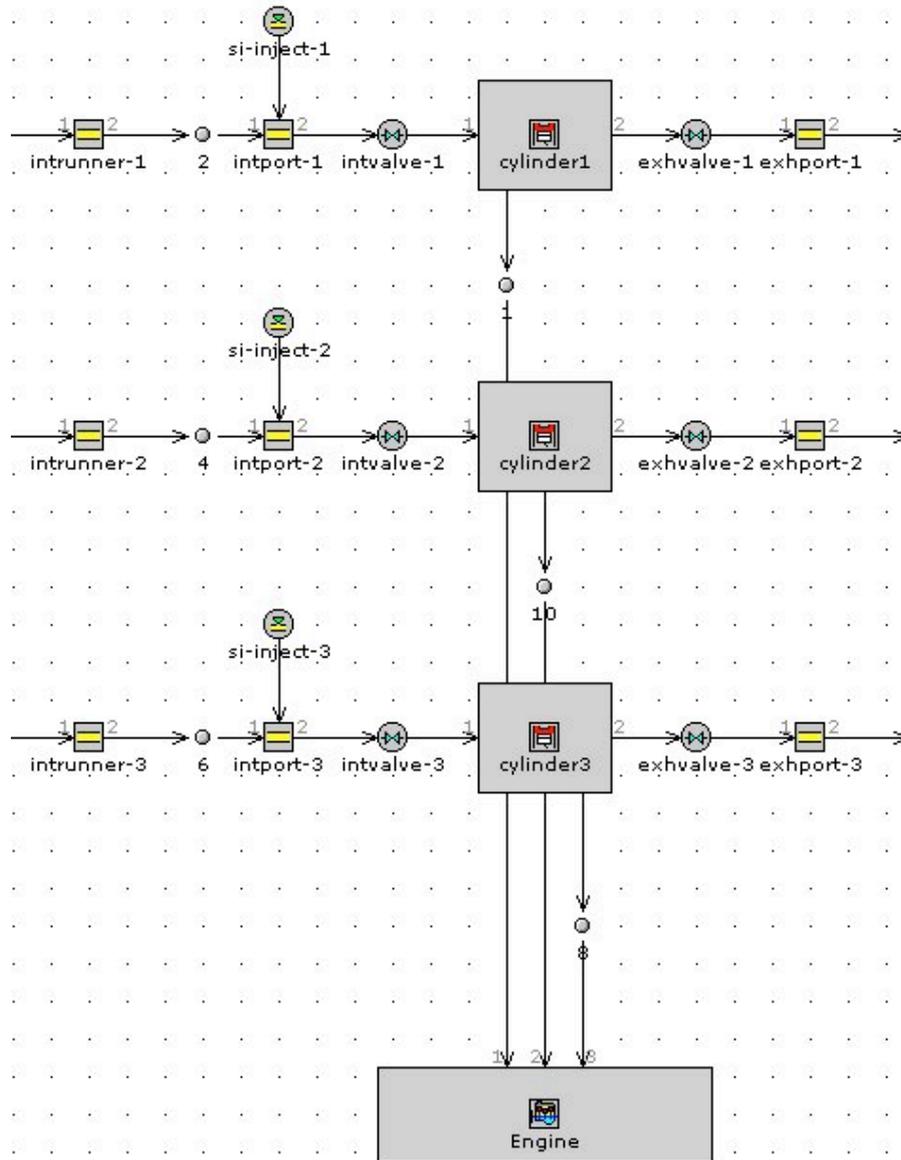
Template:	EngineCrankTrain			
Object:	cranktrain			
Comment:				
Attribute	Unit	Fire #1	Fire #2	Fire #3
Cylinder Number		1	2	3
Firing Intervals	deg	0	120	120

Sono stati così definiti tutti i vari componenti.

Ora assemblandoli si ottiene il blocco motore del modello, rappresentato di seguito.

Nella parte centrale si notano i tre cilindri ai quali vengono associate le relative valvole di aspirazione e di scarico. In basso invece è presente l'albero motore sul quale sono applicati i tre collegamenti appartenenti ai singoli cilindri.

Come già anticipato, gli iniettori sono collegati al condotto di aspirazione, trattandosi di iniezione indiretta.





## Capitolo 7

### Lo scarico

La descrizione di questo settore consiste nel definirne le geometrie, le temperature ed alcune altre caratteristiche dei condotti che portano i gas di scarico dalle valvole di scarico all'ambiente esterno.

I componenti sono una serie di condotti cilindrici e biforcazioni che si legano fino ad avere un'unica uscita.

Si analizza a titolo d'esempio il primo componente dopo le valvole di scarico ovvero il collettore di scarico.

Ricordo che la turbina, anche se installata sullo scarico, è stata già trattata nel capitolo riguardante l'aspirazione.

Si seleziona l'elemento "*PipeRound*" dalla libreria e si vanno ad inserire i dati del collettore di scarico:

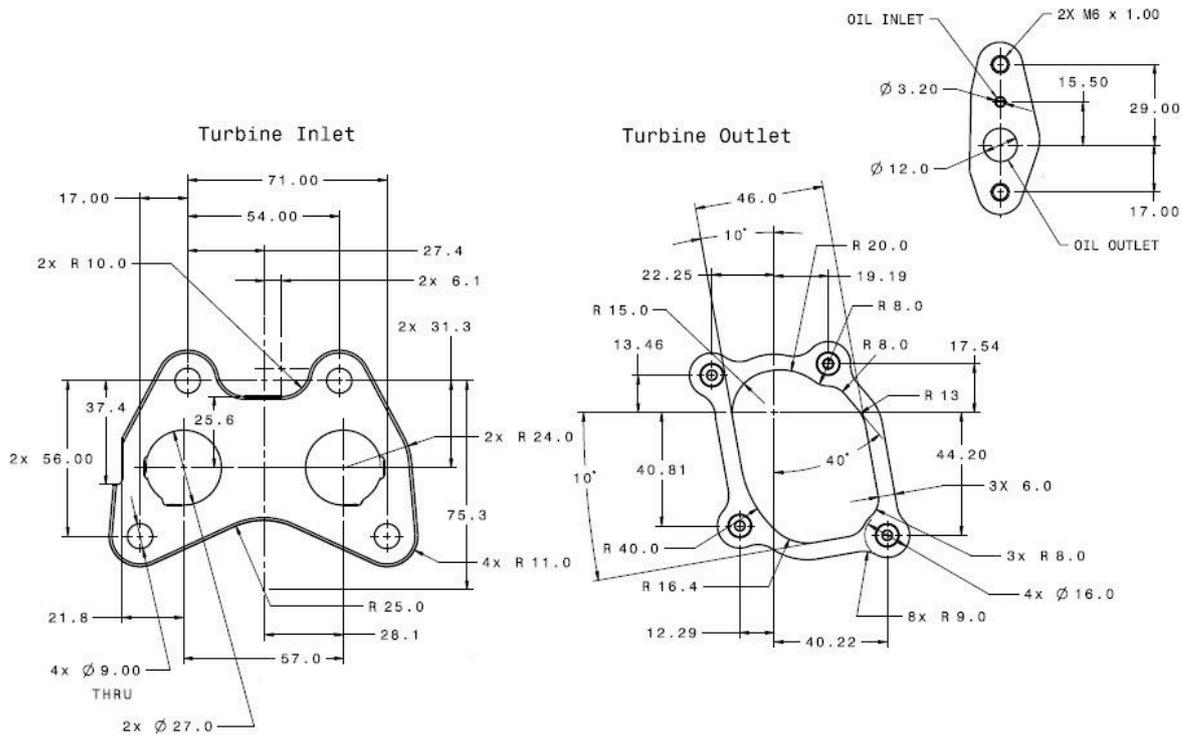
	Template:	PipeRound
	Object:	exhport
	Comment:	
Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	35 ...
Diameter at Outlet End	mm	35 ...
Length	mm	60 ...
Discretization Length	mm	55 ...
Material for Default Surface Roughness		cast_iron
Surface Roughness	mm	def ...
Wall Temperature	K	550 ...
Heat Conduction Object		ign ...
Initial State Name		initial ...

I collettori di scarico provenienti dai tre cilindri vengono poi fatti convogliare in delle biforcazioni, con le seguenti caratteristiche:

Template:	FsplitGeneral	
Object:	stage2	
Comment:		
Attribute	Unit	Object Value
Volume	mm <sup>3</sup>	169646
Material for Default Surface Roughness		user_value
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	1000
Heat Conduction Object		heat
Initial State Name		initial

Ora il collettore di scarico è completamente definito. Resta da definire il collegamento tra turbocompressore e collettore di scarico tramite un condotto troncoconico che abbia ad una estremità le dimensioni dell'uscita del “manifold”, e dall'altra l'ingresso turbina; e un terminale di scarico che abbia le dimensioni dell'uscita turbina.

Ecco ad esempio la geometria del turbocompressore Garrett GT0632SZ, da cui sono stati ricavati i diametri equivalenti:



Gli elementi presenti all'ingresso e all'uscita della turbina vengono quindi così determinati:

	Template:	PipeRound
	Object:	ext-mainfold
	Comment:	
Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	65
Diameter at Outlet End	mm	65
Length	mm	50
Discretization Length	mm	55
Material for Default Surface Roughness		cast_iron
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	1000
Heat Conduction Object		heat
Initial State Name		initial


 Template: PipeRound  
 Object: turb-out  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Diameter at Inlet End	mm	55
Diameter at Outlet End	mm	55
Length	mm	200
Discretization Length	mm	40
Material for Default Surface Roughness		user_value
Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	K	950
Heat Conduction Object		ign
Initial State Name		initial

Dopo aver definito la marmitta si deve definire l'ambiente esterno, "env-outlet", in cui vengono espulsi i gas di scarico.

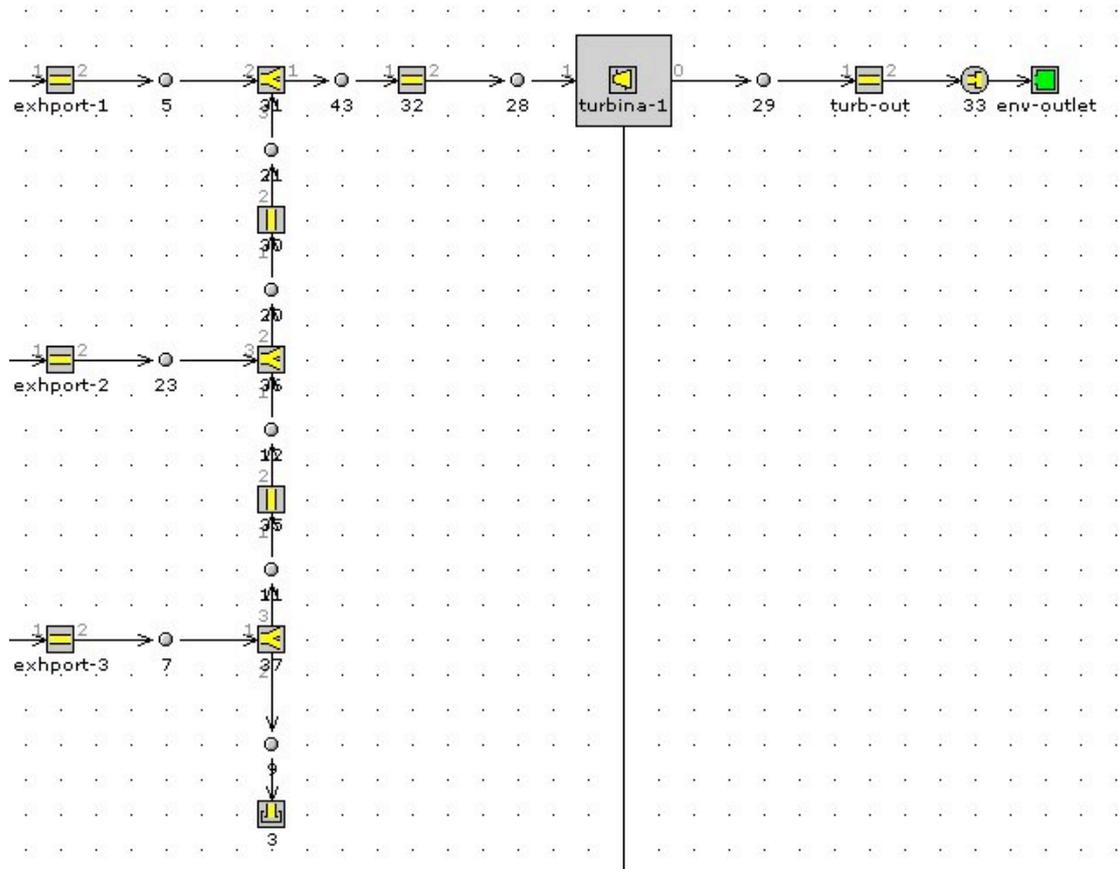
Si può riutilizzare l'elemento ambiente che era stato creato per l'aspirazione.


 Template: EndEnvironment  
 Object: env-outlet  
 Comment:

Attribute	Unit	Object Value
Pressure	bar	[press-ext]
Temperature	K	[temp-ext]
Pressure Flag		standard(total)
Composition		air

Infine si assemblano tutti i componenti creati fino ad ottenere il modello completo dello scarico.

La figura seguente presenta il dettaglio di tutti i componenti descritti in questo capitolo.

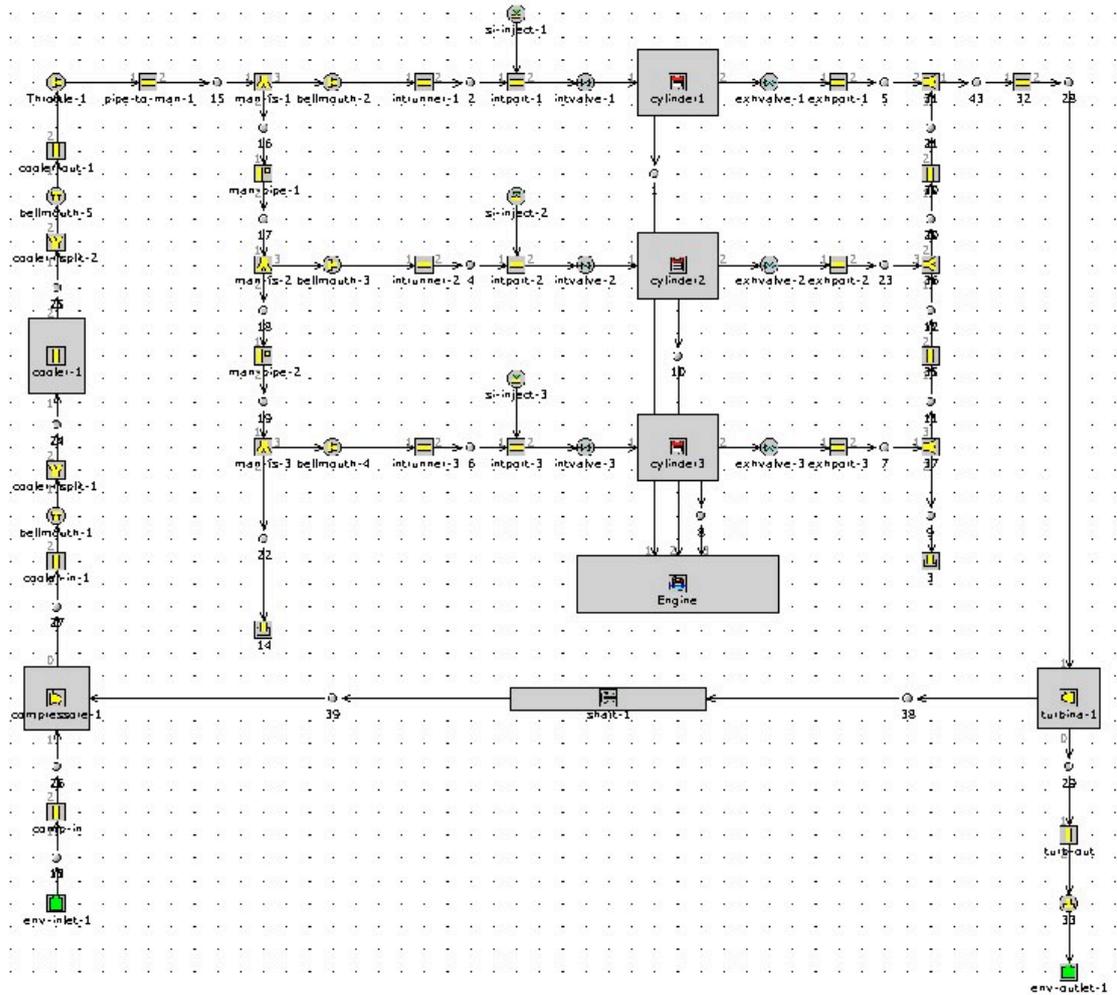




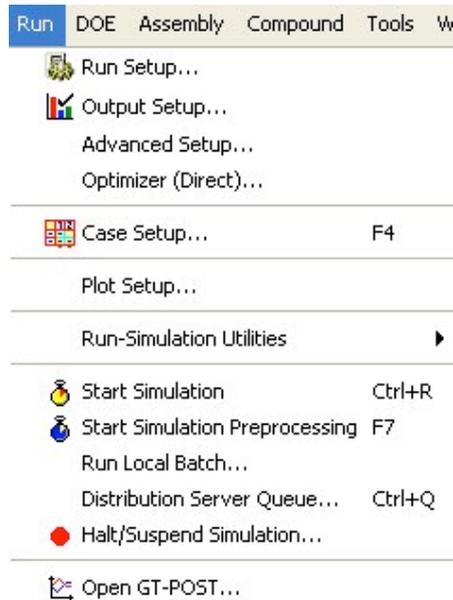
# Capitolo 8

## La simulazione

Prima di definire i parametri di simulazione si assemblano le varie parti fino ad ora analizzate per arrivare al modello finale, che risulterà come in figura:



Avendo definito il modello finale, si può impostare la simulazione definendo le variabili che si devono controllare ed i tempi di durata della prova, per fare ciò si apre il “*Run Setup*” dal menù:



Nella prova da effettuare si impostano i vincoli su di una sola variabile: la velocità angolare dell'albero motore chiamata semplicemente “RPM”, ovvero i giri al minuto dell'albero.

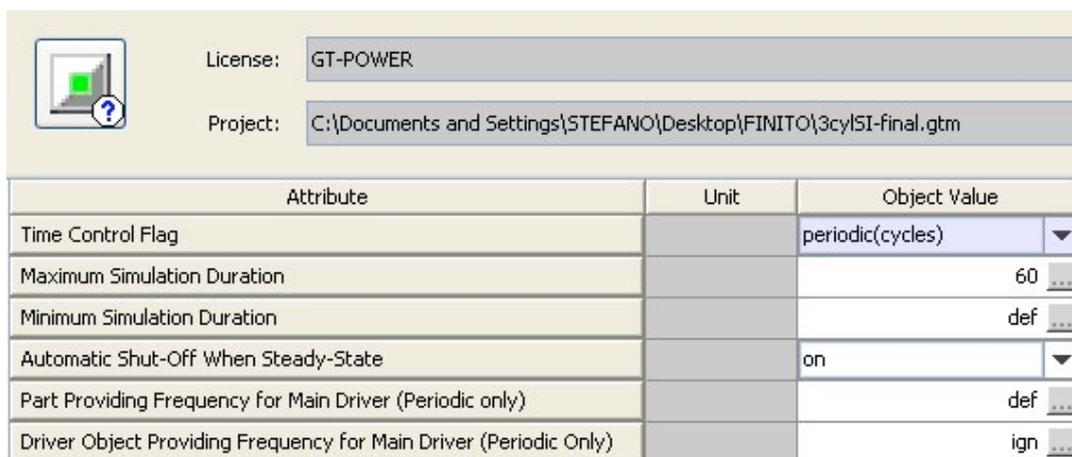
L'utilizzo di una variabile non esclude l'utilizzo di un'altra. Per questo motivo, sono stati valutati e modulati anche altri parametri in modo da rispettare le varie condizioni ai diversi giri del motore.

Inizialmente, occorre impostare la durata della prova. Questa scelta può risultare un'arma a doppio taglio, perché ovviamente, maggiore è la durata della prova e maggiore è l'attendibilità dei risultati.

Ciò avviene poiché con l'aumentare della durata vengono a ridursi quelli che possono essere errori per approssimazione delle condizioni iniziali, come le temperature delle condotte.

Una durata più lunga implica il fatto che la simulazione necessiti di un tempo maggiore per essere eseguita.

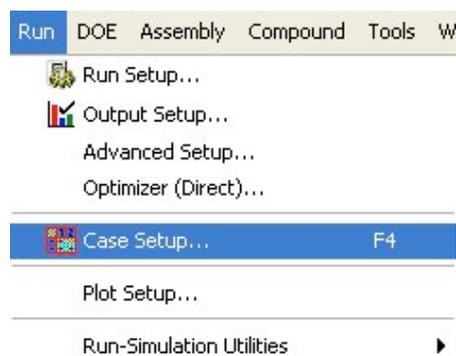
Dalle prove effettuate si è ritenuto di dover impostare una durata della prova di 60 cicli.



License: GT-POWER  
Project: C:\Documents and Settings\STEFANO\Desktop\FINITO\3cyl5I-final.gtm

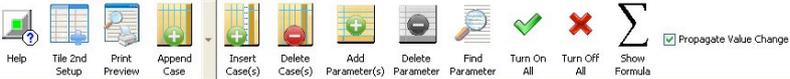
Attribute	Unit	Object Value
Time Control Flag		periodic(cycles) ▼
Maximum Simulation Duration		60 ...
Minimum Simulation Duration		def ...
Automatic Shut-Off When Steady-State		on ▼
Part Providing Frequency for Main Driver (Periodic only)		def ...
Driver Object Providing Frequency for Main Driver (Periodic Only)		ign ...

Ora si deve definire su quanti livelli si vuole fare variare la variabile che si è creata, impostando il “*Case Setup*”:



## Capitolo 8 - La simulazione

Come detto, la variabile principale è “RPM” che viene fatta variare da 4000 a 7550 giri al minuto su otto livelli, come mostra la figura:



Parameter	Unit	Description	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
<b>Case On/Off</b>		<b>Check Box to Turn Case On</b>	<input checked="" type="checkbox"/>							
<b>Case Label</b>		<b>Unique Text for Plot Legends</b>	Speed = 4000	Speed = 4500	Speed = 5000	Speed = 5500	Speed = 6000	Speed = 6500	Speed = 7000	Speed = 7550
backp	mm		38.42	38.42	38.42	38.42	38.42	38.42	38.42	38.42
cooler	K		320	320	320	320	320	320	320	320
friction			1	1	1	1	1	1	1	1
heattrans			8	8	8	8	8	8	8	8
molt			1.1	1.2	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	2
molt2			1	1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
moltcomp			1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6
press-ext	bar	pressione ambiente	1	1	1	1	1	1	1	1
RPM	RPM	Engine Speed	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7550
temp-ext	K	temperatura ambiente	300	300	300	300	300	300	300	300
throttle	mm		70	70	70	70	70	70	70	70
wastegate	mm		0	0	0	0	0	0	0	0

Il case setup presenta inoltre una serie di parametri, che, in parte, sono stati definiti nei capitoli precedenti. In aggiunta, sono presenti con la denominazione “molt”, dei parametri che descrivono i moltiplicatori di massa del gruppo turbocompressore.

Si può ora dare il via alla simulazione:



Di seguito è mostrata la videata del solutore che esegue i calcoli e compila una serie di file, contenenti i dati della simulazione, nella medesima directory in cui si trova il progetto.

```

C:\Documents and Settings\STEFANO\Desktop\FINITO\3cylSI-final
TURB: CMP=turbin RPM=202459. PRmap= 2.267 Mass= 0.035 Power= 2.61 Ef=0.436
      UOLEF  IMEP  Pmax  Ieff  REScs  FAeff
cylinder1:  0.671  6.10  36.84  12.1  15.6  0.2624
cylinder2:  0.650  5.64  35.23  11.0  16.5  0.2928
cylinder3:  0.623  5.27  34.38  10.3  17.1  0.3663
ENGINE: IMEP = 5.67 bar, UOLEF = 0.648 UOLEFm = 0.648

FLOW CONUERGENCE:
NO  Mass dfmax (%) = 5.3024 at con : 12
NO  Pres. dpmax (%) = 2.9117 at cmp : intrunner-3
MECH CONUERGENCE:
NO  Torq. dTqmx (%) = 14.6362 at cmp : shaft-1
Timesteps/cycle=723, average time step = 0.996 deg

MAIN DRIVER: Case# 1 Period# 9 Freq/RPM=66.6667 4000. Time=0.24

COMP: CMP=compre RPM=206435. PRmap= 1.429 Mass= 0.039 Power= 2.43 Ef=0.521
TURB: CMP=turbin RPM=206435. PRmap= 2.282 Mass= 0.034 Power= 2.67 Ef=0.438
      UOLEF  IMEP  Pmax  Ieff  REScs  FAeff
cylinder1:  0.694  6.36  38.03  12.2  15.4  0.2759
cylinder2:  0.669  5.83  36.21  11.0  16.4  0.3161
cylinder3:  0.642  5.46  35.35  10.3  17.1  0.3948
ENGINE: IMEP = 5.88 bar, UOLEF = 0.668 UOLEFm = 0.668

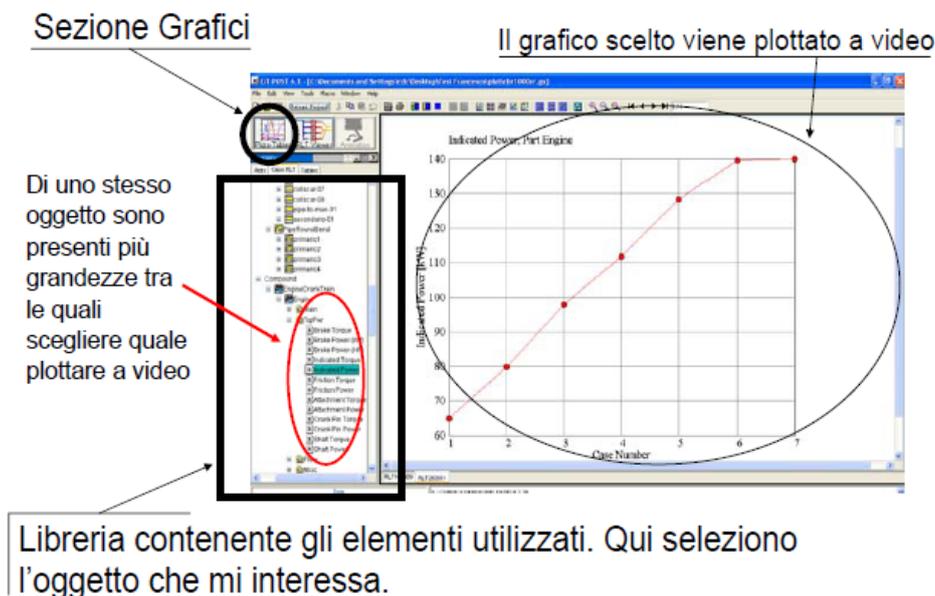
FLOW CONUERGENCE:
    
```

Per visualizzare i risultati si utilizza GT-Post.

GT-Post è uno strumento di GT-Power che visualizza i risultati della simulazione aprendo uno dei file precedentemente creato.

I file interfacciabili con GT-Post sono stati creati come file.gx.

## 8.1 L'Interfaccia grafica di GT-POST



Oltre alla soluzione grafica, GT-POST consente di visionare i risultati sotto forma di tabella selezionando il valore interessato e scegliendo la voce “*View Data*”.

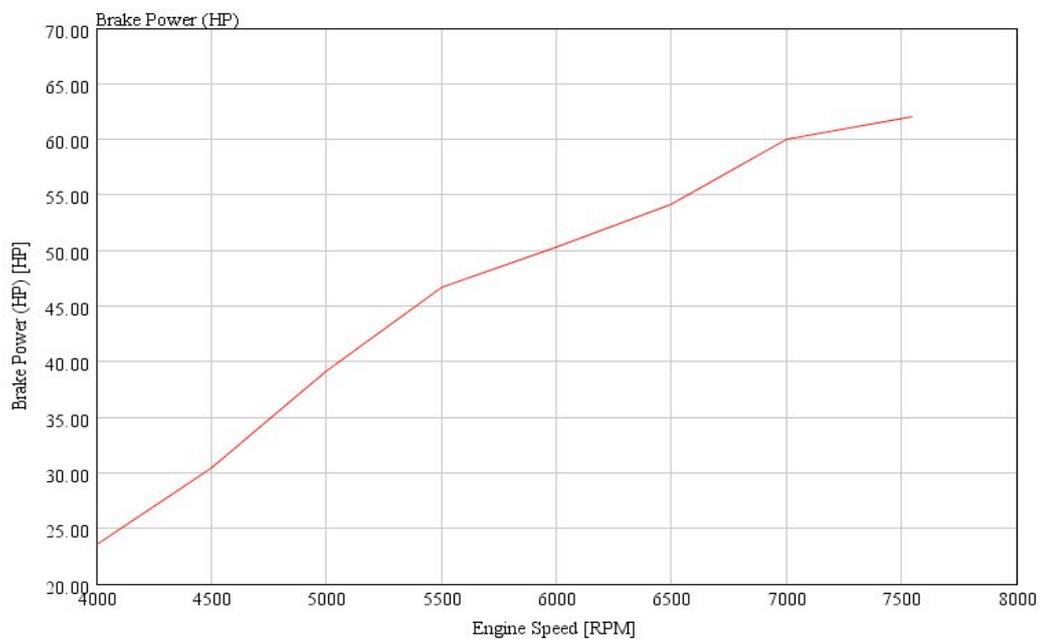
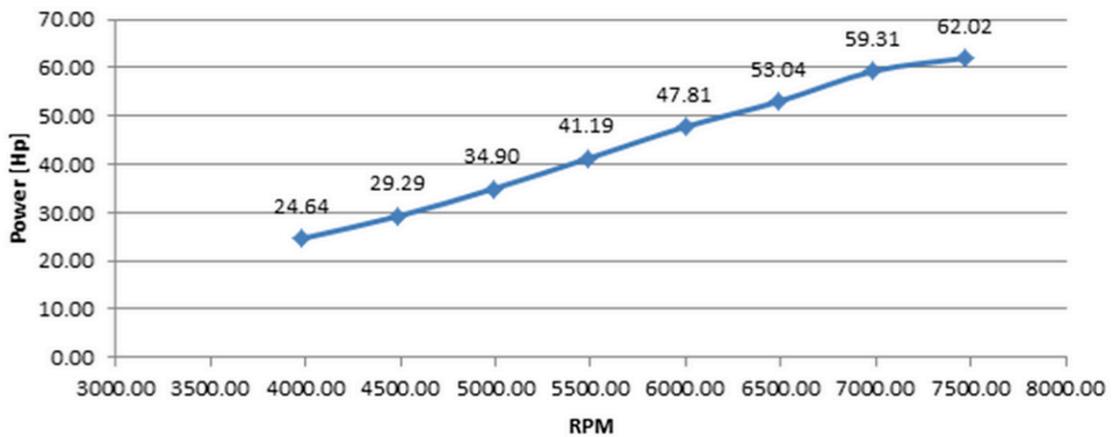
“*RLT Viewer*” ha, invece, un’interfaccia grafica più intuitiva: permette di effettuare un’analisi rapida e complessiva sul modello oggetto della simulazione, per poi andare più nel dettaglio selezionando un singolo componente.

Selezionando l’oggetto si accede alle tabelle numeriche contenenti tutti i dati a riguardo; per i valori elencati viene data la possibilità di scegliere l’unità di misura che ci risulta più utile, dato che nel programma sono caricati tutti i coefficienti di conversione tra le unità di misura.

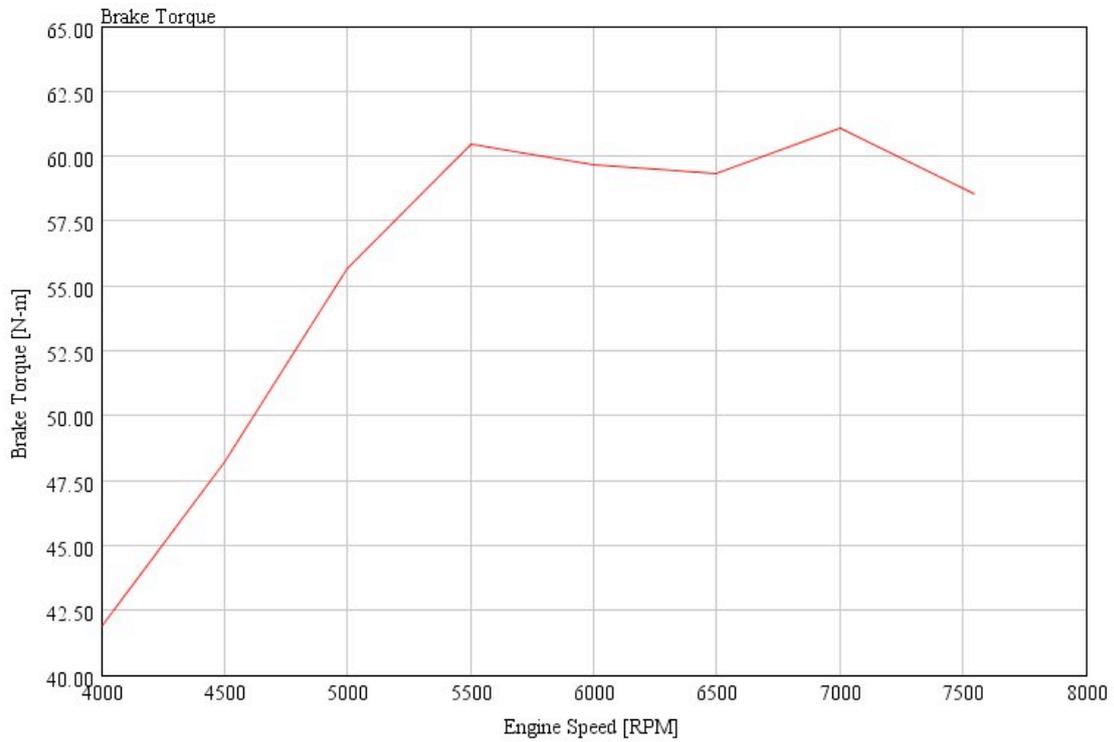
## 8.2 Analisi della simulazione

Come anticipato nel capitolo introduttivo, si è prima realizzato il modello del motore aspirato, cercando di ottenere la curva di potenza fornitaci dal costruttore.

Di seguito, sono riportati rispettivamente la curva di potenza fornita e quella ricavata con GT-POWER.



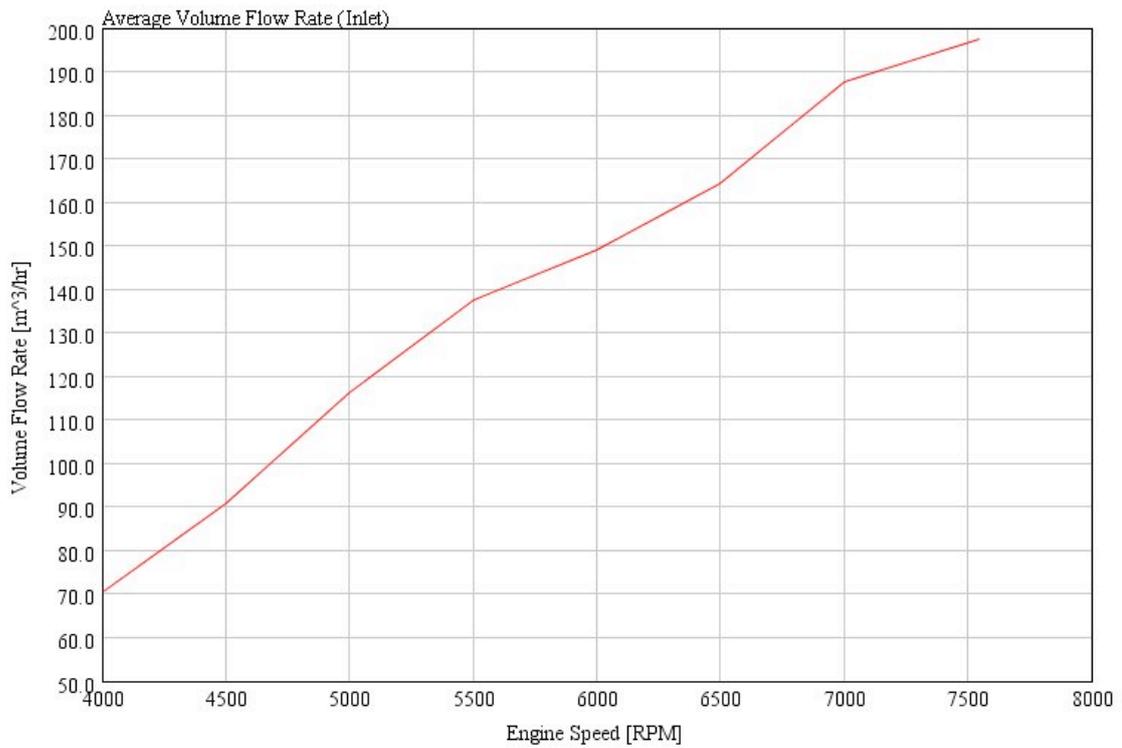
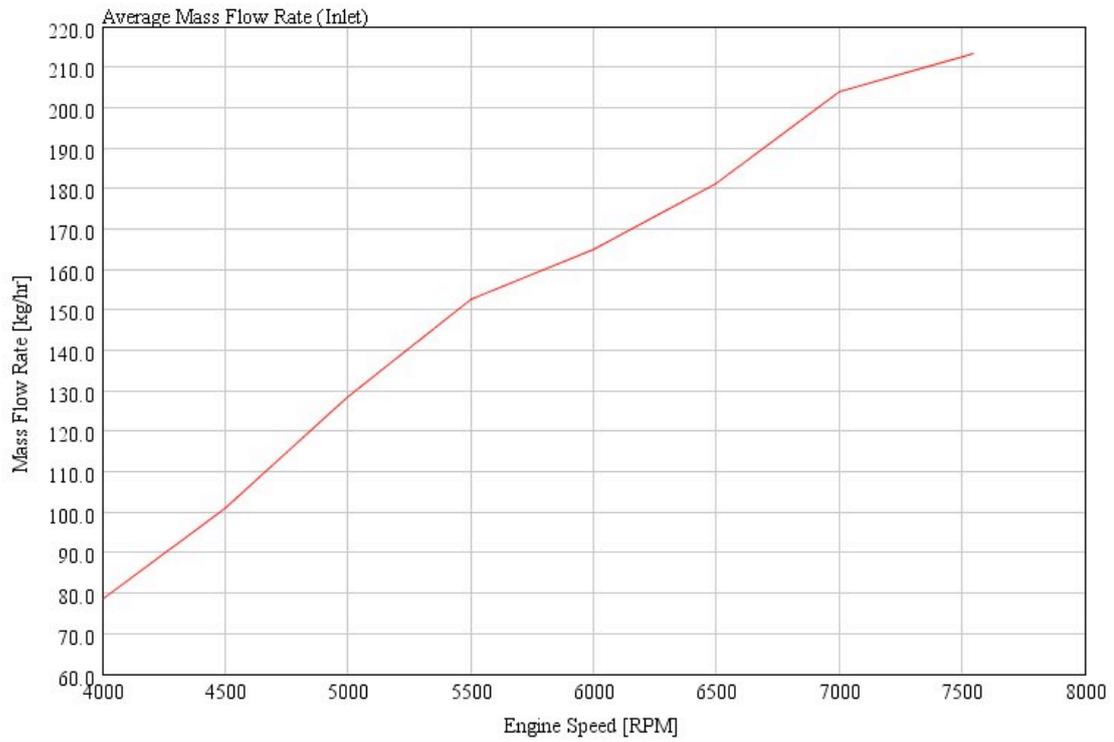
Si riporta anche il grafico relativo alla curva di coppia.



I dati di maggiore interesse e quelli relativi alla scelta del turbocompressore riguardano la portata massica e volumetrica del flusso d'aria in aspirazione e la pressione nel manifold.

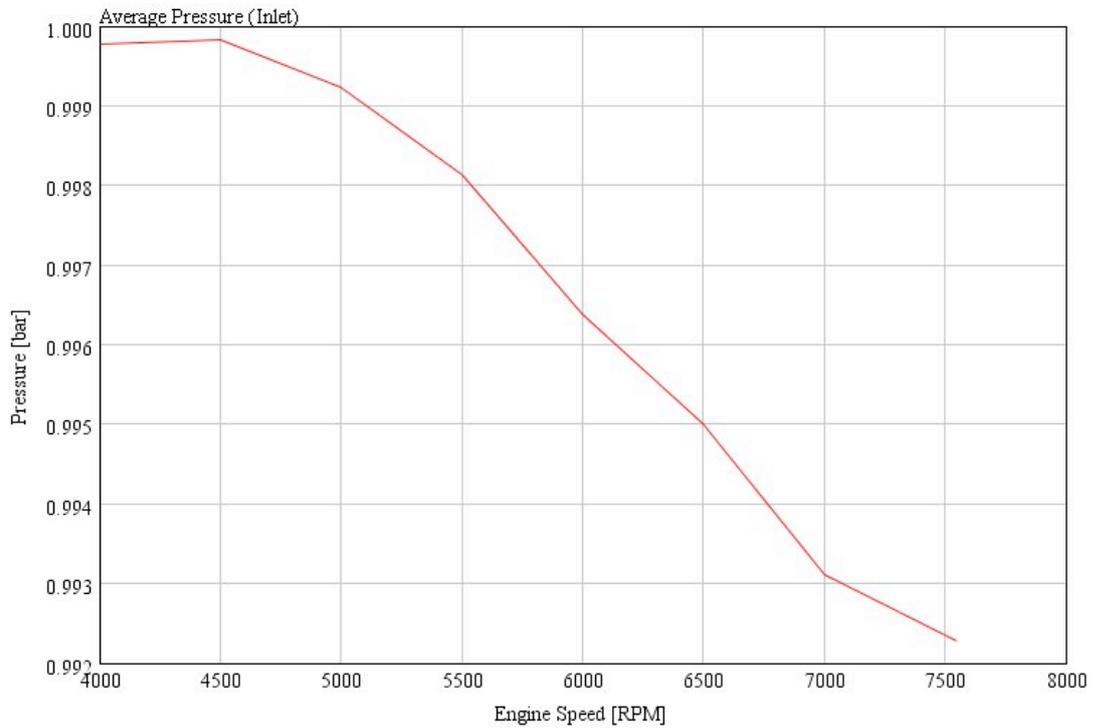
## Capitolo 8 - La simulazione

---



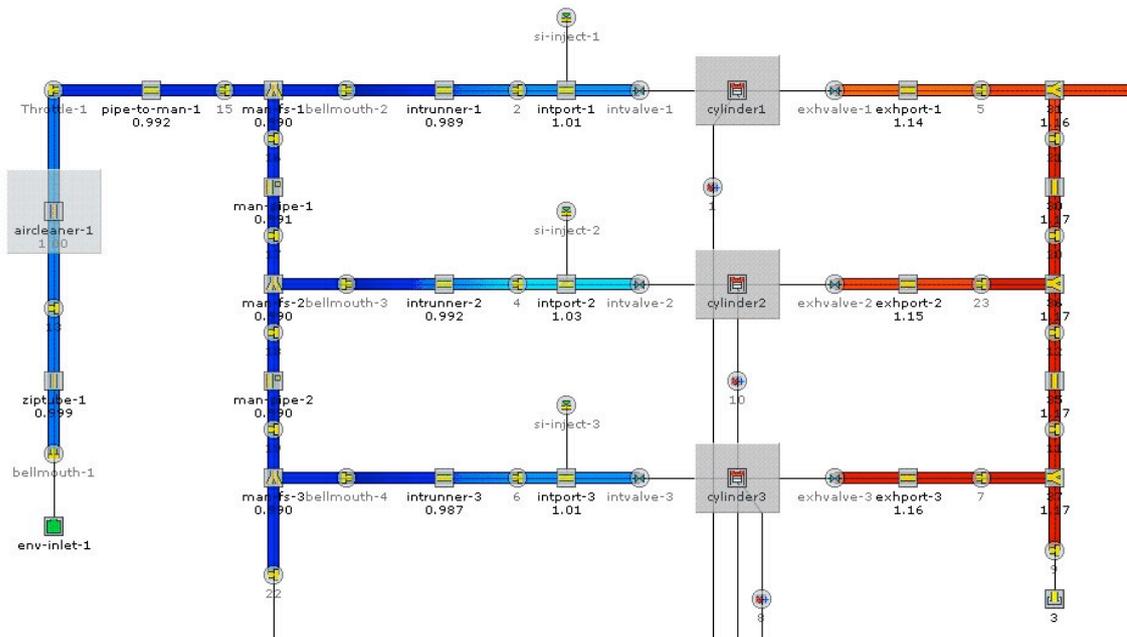
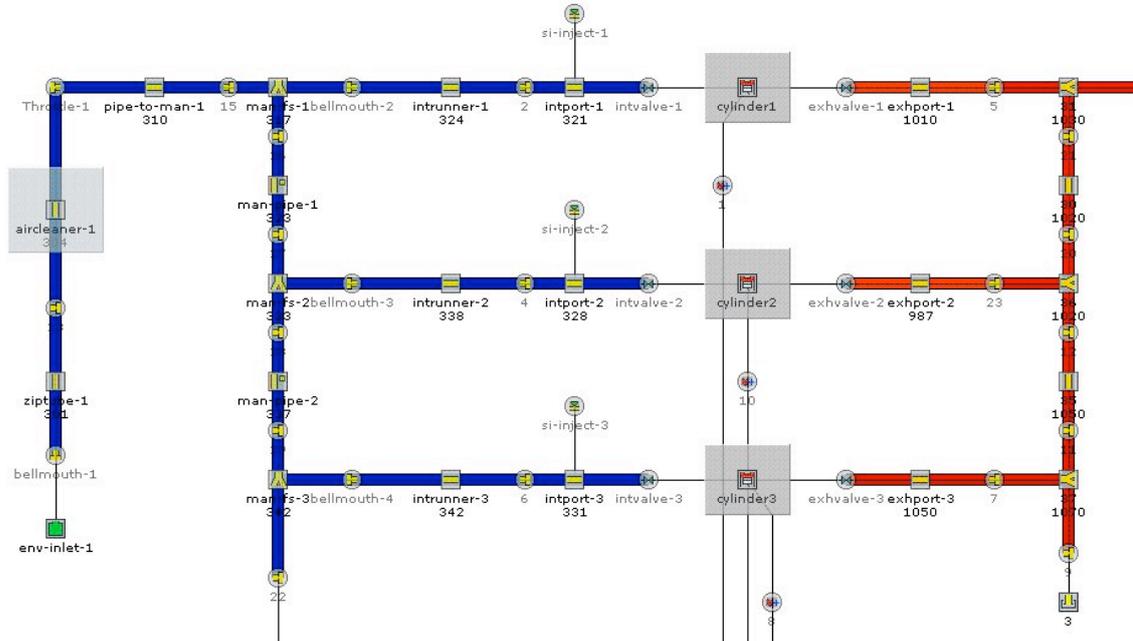
## Capitolo 8 - La simulazione

---



Con *RTL Viewer* si mostra l'andamento di temperature e pressioni nel motore aspirato.

## Capitolo 8 - La simulazione



In base alle simulazioni fatte e ai dati raccolti il turbocompressore più adatto è risultato essere il GT0632SZ prodotto dalla Garrett.

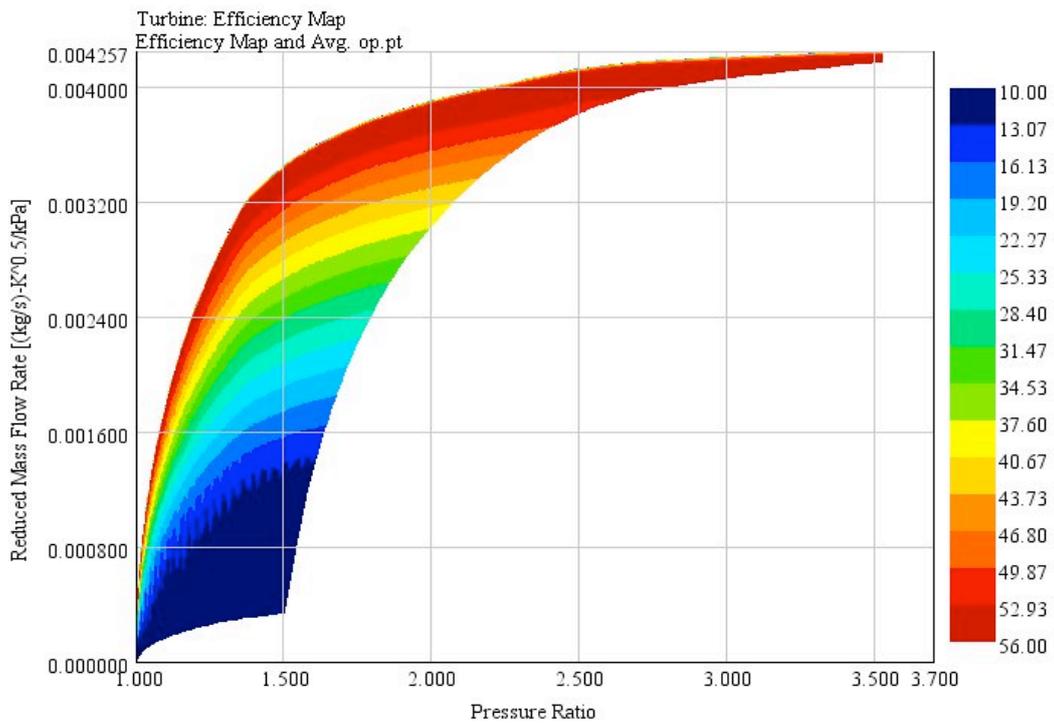
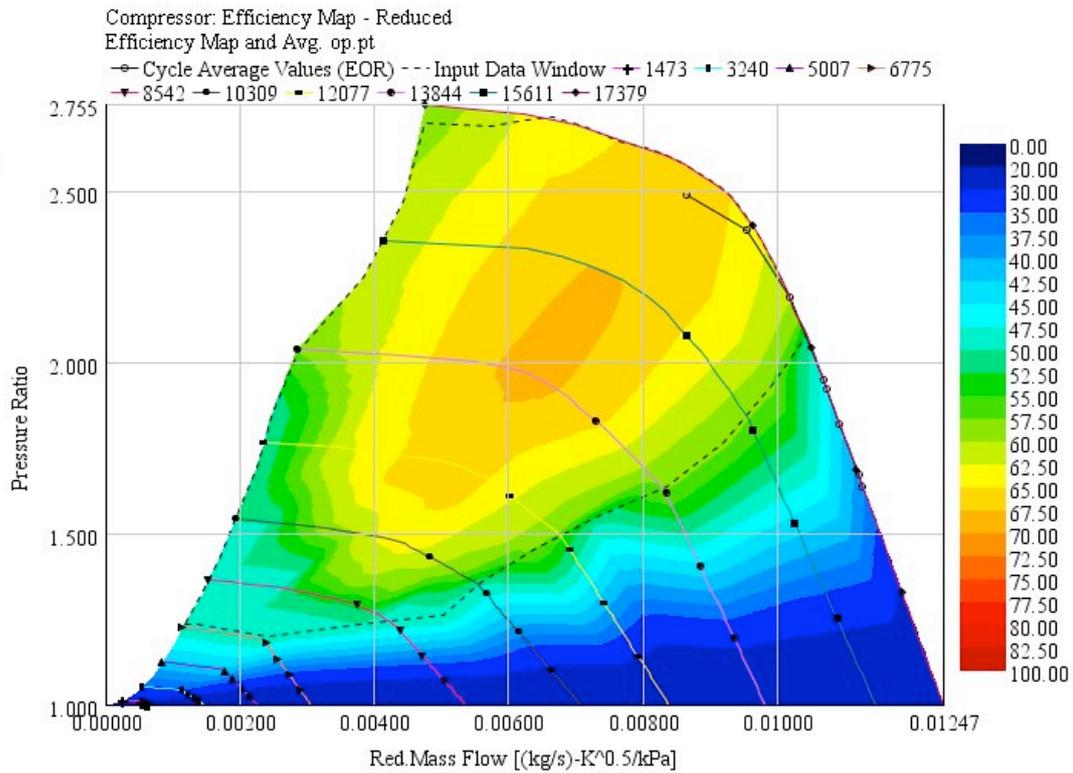
Le mappe di compressore e turbina a catalogo sono state utili per ricavare, con Excel, i punti di funzionamento del turbocompressore e i valori sono stati inseriti nel software, come spiegato nel capitolo 5.

Una volta definito completamente il gruppo turbocompressore è stato possibile inserirlo nel modello iniziale del motore aspirato.

Ora che il modello del motore sovralimentato è stato creato, il programma di simulazione GT-POST fornisce risultati su ogni punto di funzionamento stabilito nel "*Case Setup*"; i risultati che andremo ad analizzare sono epurati da una lunga fase di affinamento del modello.

Analizziamo il funzionamento del gruppo turbocompressore Garrett GT0632SZ:

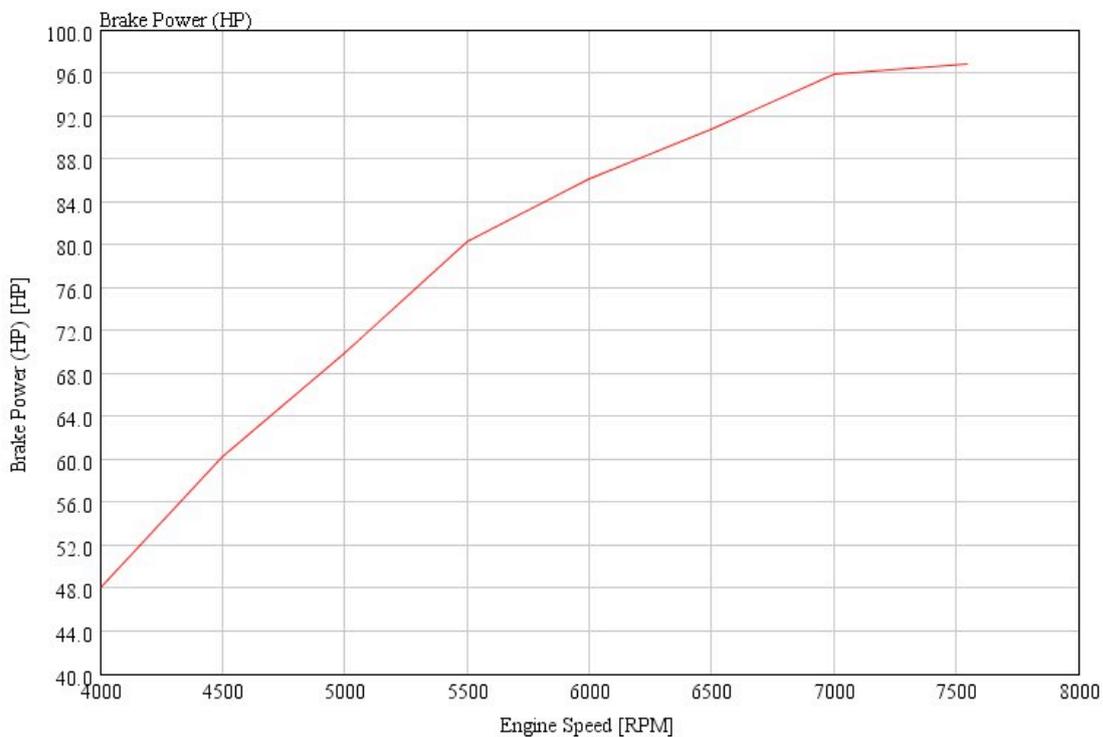
## Capitolo 8 - La simulazione



Come possiamo notare dai due grafici il turbocompressore lavora perfettamente nel nostro modello, rimanendo sempre nelle zone a rendimento maggiore ed elaborando un'ottima portata considerando le dimensioni dello stesso.

Di seguito si riporta il grafico inerente il funzionamento del nostro motore sovralimentato, ovvero la potenza.

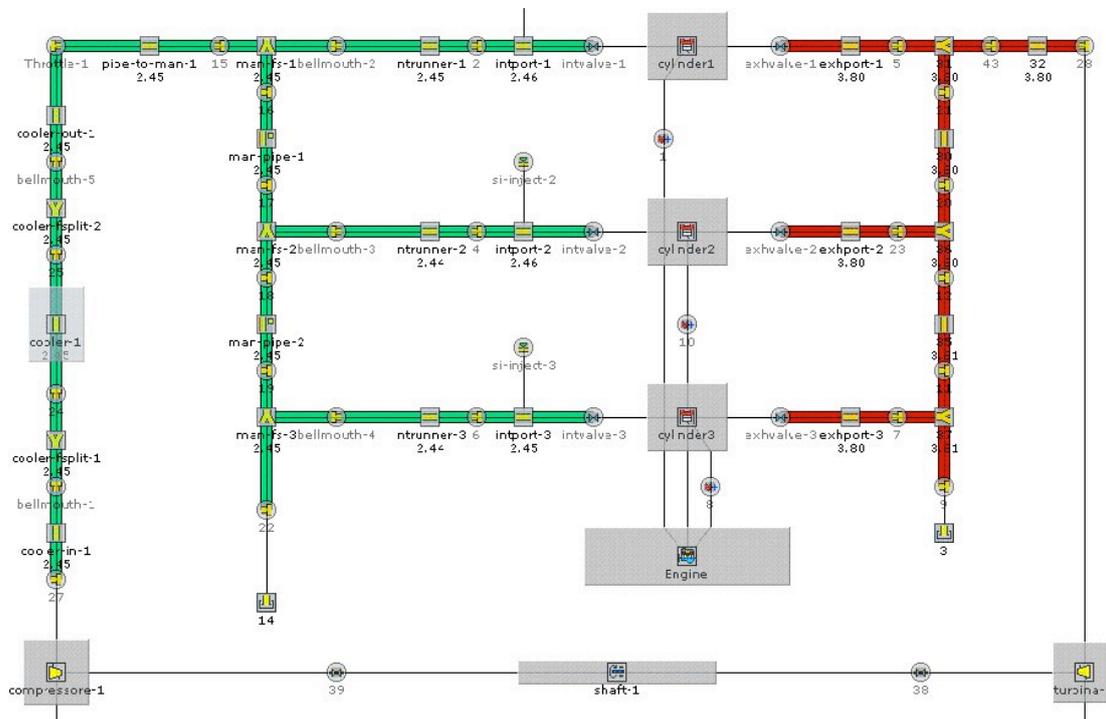
Dalla sua analisi, si può notare l'incremento di potenza ottenuto con il turbocompressore rispetto allo stesso motore aspirato. Si è passati infatti da una potenza massima di circa 62 HP a 7550 RPM a 97 HP sempre a 7550 RPM.



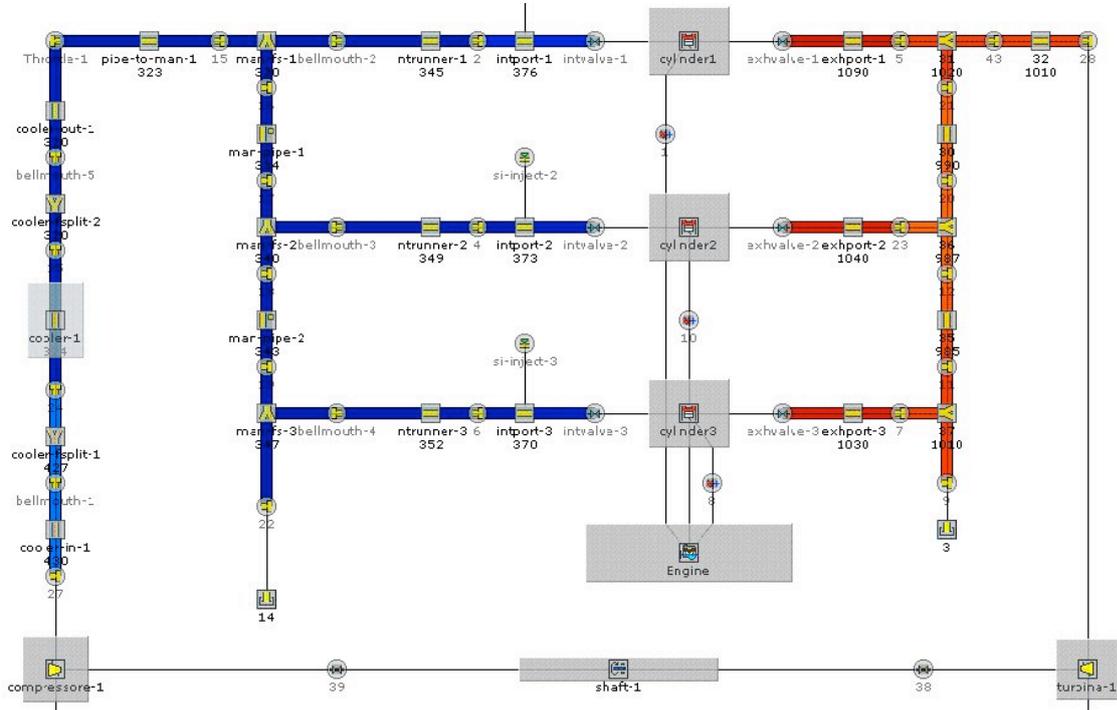
## Capitolo 8 - La simulazione

Il modello elaborato risponde bene alle simulazioni con questo turbocompressore: la simulazione infatti converge, sintomo che tutti i valori inseriti, i coefficienti, le mappe concorrono a punti di funzionamento che il calcolatore riesce a determinare in breve tempo.

In ultimo, riportiamo l'andamento di pressioni e temperature nel motore sovralimentato.



Capitolo 8 - La simulazione



## Capitolo 9

### Conclusioni

Il presente studio ha trattato la realizzazione di un modello atto ad effettuare la simulazione monodimensionale del motore Wankel R902 montato sull'UAV Hermes 450 della Elbit Systems, prima aspirato e poi sovralimentato con turbocompressore.

Per eseguire la simulazione del motore si è utilizzato un codice specifico per la simulazione dell'intero ciclo motore: GT-Power (Gamma Technologies).

Sono stati conseguiti tutti gli obiettivi prefissati:

- La costruzione di un modello che ricalcasse le caratteristiche tecniche del motore stesso;
- La scelta di turbina e compressore adeguati al motore in esame;
- La simulazione del funzionamento del modello realizzato;
- L'analisi dei dati conseguiti dalla simulazione.

La notevole mole di dati, necessari alla definizione del modello, carica questo codice di calcolo di un'inerzia che ne rende lunga e laboriosa la creazione ma che al contempo permette di trarre una grande quantità di informazioni dalla simulazione e rende rapide le eventuali modifiche.

Il lavoro richiedeva lo studio del propulsore in esame, sovralimentandolo con un turbocompressore adeguato, individuandone la quota di ristabilimento (critical altitude) e la potenza erogata dallo stesso alla quota di 10000 metri.

Si è trattato di studiare il comportamento del modello sovralimentato al variare dell'altitudine.

La creazione del modello ha subito numerose modifiche durante il corso del lavoro, e ha presentato difficoltà soprattutto nella scelta delle mappe del turbocompressore. L'impossibilità di avere mappe già prestabilite e configurate ha reso necessario lo studio delle stesse mediante metodi empirici. L'utilizzo di Excel ha quindi permesso di interpolare i grafici di compressore e turbina presenti sul catalogo Garrett con dei punti, che inseriti opportunamente in un grafico hanno permesso di risalire alle componenti necessarie per descrivere le mappe in questione.

Sono state compiute diverse simulazioni per poter raggiungere un risultato ottimale.

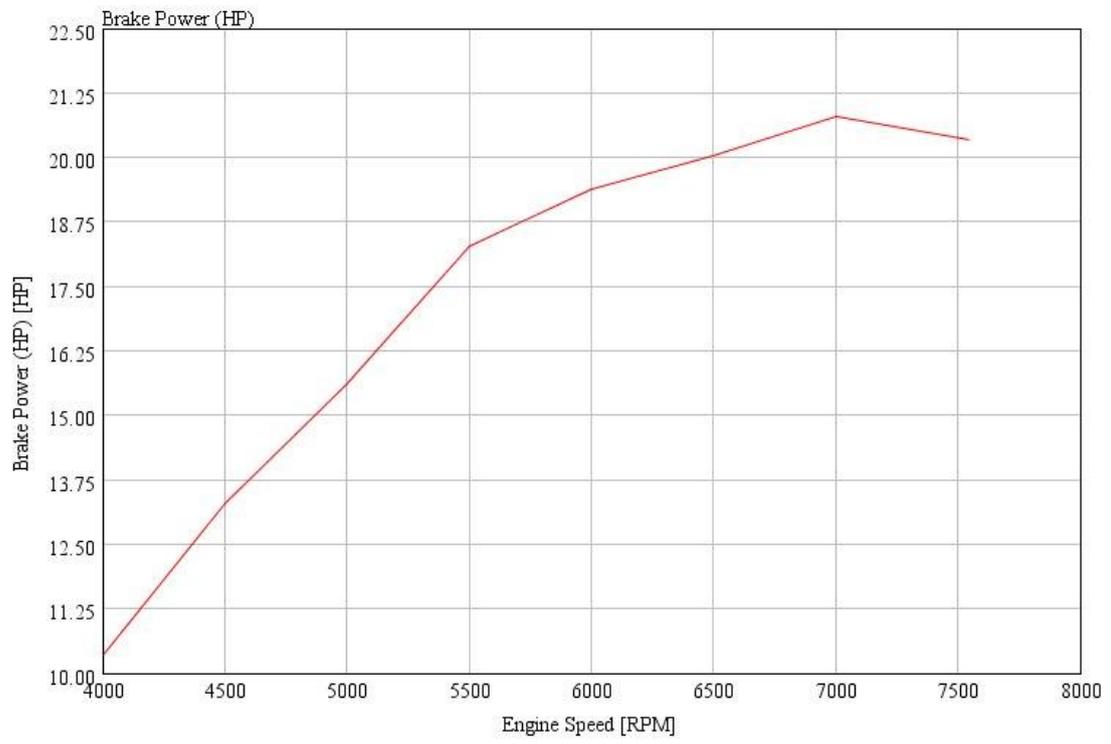
Il lavoro ha consentito di ottenere un incremento di potenza tale da poter raggiungere una critical altitude di:

- 3587 metri s.l.m. alle condizioni ISA+0 (264.83 K, 0.65 bar);
- 4147 metri s.l.m. alle condizioni ISA-50 (211.19 K, 0.605 bar);
- 3330 metri s.l.m. alle condizioni ISA+25 (291.51 K, 0.672 bar).

Infine, la potenza massima erogata dal motore sovralimentato alla quota di 10000 metri è risultata essere 20.79 HP a 7000 RPM.

## Capitolo 9 - Conclusioni

---





## Bibliografia

- G. Ferrari, *Motori a combustione interna*. Il Capitello, 2000
- Garrett by Honeywell, *Garrett Catalogue*, Volume 5, 2009
- GT-POWER Tutorial, *Application manual*, version 7.0, 2009
- GT-SUITE Flow, *Reference manual*, version 7.0, 2009
- L. Tartakovsky, V. Baibikov, M. Veinblat, *Improvement of Wankel engine performance at high altitudes*, 3rd Conference on UAV Propulsion Technologies, Haifa, 30 January 2014
- P. Nugent, *Turbolgy for beginners* , July 2004
- Tesi di Giacometti Francesco, *Studio ed ottimizzazione per la trasformazione di un motore aeronautico aspirato in sovralimentato*, AA 2005-2006
- Tesi di Lucchi Claudio, *Studio e ottimizzazione di un silenziatore autoportante per applicazioni aeronautiche*, AA 2010-2011
- Tesi di Grilli Domenico, *Analisi di fattibilità di un motore turbodiesel common rail ad alte prestazioni per generazione elettrica*, AA 2012-2013
- Sito internet: [http://it.wikipedia.org/wiki/Motore\\_Wankel](http://it.wikipedia.org/wiki/Motore_Wankel)
- Sito internet:  
<http://www.umberto.altervista.org/wankel/tesina/index2.html>
- Sito internet:  
<http://www.wroar.net/pages/sovralimentazione-motori-2.html>
- Sito internet: <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/>

SOFTWARE utilizzati:

- **GT-Suite** – Gamma technologies
- **GT-POWER** – Gamma technologies
- **GT-POST** – Gamma technologies
- **Microsoft Excel** – Microsoft corporation





## *Ringraziamenti*

*Giunto al termine di questo lavoro, desidero ringraziare chi, in maniera più o meno diretta e più o meno consapevole, ha contribuito alla sua realizzazione.*

*Innanzitutto i miei ringraziamenti sono rivolti al Prof. Ing. Luca Piancastelli per la disponibilità, il tempo e la pazienza accordatami durante la fase di preparazione e sviluppo del mio elaborato finale.*

*Un grazie infinito va ai miei genitori, Roberto e Romana, per avermi permesso di intraprendere questo percorso e per il loro continuo e instancabile sostegno, soprattutto nei momenti più difficili.*

*Grazie a mio fratello Davide, senza il quale le mie giornate sarebbero sicuramente più noiose.*

*Un pensiero affettuoso va poi a tutti i nonni e gli zii, per i consigli, gli insegnamenti e il loro sostegno.*

*Un enorme grazie va ai miei compagni Mino, Filo e Gatto, che mi sono stati da stimolo e di grandissimo aiuto, e coi quali ho condiviso gran parte di questo percorso.*

*Un sincero grazie a tutti i miei amici; insieme a loro mi sono svagato e ho trascorso serate rilassanti senza pensare troppo allo studio.*

*Un grande grazie va alla mia morosa, Sofia, che mi ha spronato, bacchettato e incoraggiato, e che ha dovuto ascoltare fino all'esaurimento le mie cantilene sui teoremi di Analisi.*

