

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ 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 Assistito Dal Calcolatore

**OTTIMIZZAZIONE DI UN MOTORE DIESEL  
PER USO AEREO**

**CANDIDATO**  
Rosa Matteo

**RELATORE**  
Ing. Piancastelli Luca

Anno Accademico 2013-2014  
Sessione II



# INDICE

Pagina

## CAPITOLO I

1.1 – Breve riassunto storico della nascita del motore Diesel.....	5
1.2 - Schema costruttivo generale.....	7
1.2.1 - <i>La testata</i> .....	7
1.2.2 - <i>Il basamento</i> .....	9
1.2.3 - <i>Il pistone</i> .....	9
1.2.4 - <i>Segmenti, bielle e albero motore</i> .....	10
1.2.5 - <i>Gli organi della distribuzione</i> .....	11
1.2.6 - <i>La pompa di iniezione</i> .....	12
1.2.7 - <i>Gli iniettori</i> .....	12
1.2.8 - <i>La formazione della miscela</i> .....	13
1.2.9 - <i>La combustione</i> .....	14
1.2.10 - <i>Il diesel a iniezione diretta</i> .....	16
1.2.11 - <i>Il diesel a iniezione indiretta</i> .....	17
1.2.12 - <i>L'alimentazione</i> .....	18
1.2.13 - <i>La lubrificazione</i> .....	18
1.2.14 - <i>Il raffreddamento</i> .....	19
1.3 - Funzionamento del ciclo a quattro tempi.....	20
1.4 - Rendimenti, calcolo della potenza e bilancio termico.....	25

## CAPITOLO II

2.1 – La sovralimentazione.....	28
2.1.1 - <i>La sovralimentazione dinamica</i> .....	29
2.1.2 - <i>La sovralimentazione meccanica</i> .....	29
2.1.3 - <i>La sovralimentazione chimica</i> .....	31

## CAPITOLO III

3.1 – Il turbocompressore.....	32
3.2 – Le origini.....	32
3.3 – Gli sviluppi.....	33

3.4 - Perché il turbocompressore.....	34
---------------------------------------	----

## CAPITOLO IV

4.1 – Effetto dell’altitudine sui motori.....	36
4.1.1 - <i>Caratteristiche dell’atmosfera</i> .....	36
4.1.2 - <i>Regioni dell’atmosfera</i> .....	36
4.1.3 - <i>Unità di misura</i> .....	37
4.1.4 - <i>Atmosfera standard internazionale (ISA)</i> .....	37
4.2 - Motore semplice in quota.....	40
4.3 - Rimedi alla diminuzione di potenza con la quota.....	41

## CAPITOLO V

5.1 – Obiettivo dello studio.....	45
5.2 – Caratteristiche del motore utilizzato.....	45
5.3 – Ottimizzazione.....	47

## CAPITOLO VI

6.1 – Conclusioni.....	54
6.2 – Sviluppi futuri.....	54

BIBLIOGRAFIA.....	55
-------------------	----

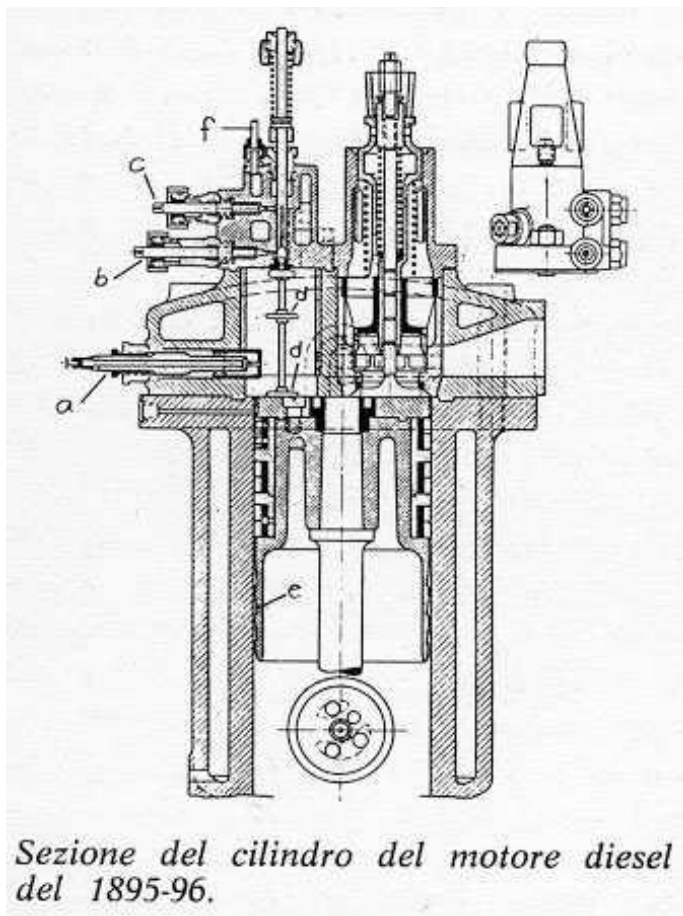
# CAPITOLO I

## 1.1 – Breve riassunto storico della nascita del motore Diesel

Il 23 febbraio del 1892 l'ingegner Rudolf Diesel depositava all'ufficio brevetti di Berlino il progetto di un singolare motore.

Un progetto, come descritto nella domanda per il brevetto, relativo a “...un processo lavorativo per macchine motrici a combustione interna, caratterizzato dal fatto che in un cilindro l'aria viene compressa dal pistone di lavoro con una forza tale che la temperatura risultante è di gran lunga superiore a quella d'accensione del carburante da impiegare...”

Con questa semplice quanto efficace descrizione nasceva, giusto 112 anni fa, il cosiddetto motore “ad accensione per compressione” in contrapposizione al già esistente motore a ciclo Otto o semplicemente a benzina, che veniva e viene tuttora comunemente



definito “ad accensione per scintilla”.

Sino al 1908 il Diesel fu un motore per impianti fissi.

Lo condannavano essenzialmente a quest'impiego il peso rilevante e il sistema di alimentazione a portata costante del combustibile.

Esso si dimostrò molto promettente come motore marino e la Fiat ne iniziò la produzione con

questa destinazione sin dal 1908.

Rispetto al motore a vapore era meno ingombrante, non richiedeva una caldaia e chi la alimentasse e, ovviamente, nemmeno uno spazio per lo stivaggio del carbone.

Lo scoppio della Prima Guerra Mondiale doveva dare grande impulso alla costruzione di motori Diesel per uso marino. Così già nel 1910–13 la Fiat costruiva motori Diesel della potenza di 700 – 800 CV che venivano poi utilizzati dalle diverse marine europee, da quella italiana a quella tedesca, dalla inglese alla danese e così via.

Le ottime premesse spinsero la Fiat alla costruzione di diversi motori, realizzando nel 1914 il più potente Diesel marino al mondo: 2300 cavalli vapore. Nel 1922 un motore Diesel Fiat venne applicato su di una locomotiva italiana, era un due tempi da 440 CV. Nel 1929 venne invece realizzato (sempre dalla Fiat) il primo e unico Diesel da aviazione che abbia volato in Italia, della potenza di 180 – 220 CV a 1500 – 1700 g/min.

In questo periodo cominciarono ad essere costruiti dei particolari motori Diesel a due tempi, i cosiddetti a “testa calda”. In questi motori il combustibile veniva iniettato in una precamera del cilindro con un notevole anticipo rispetto al PMS, talvolta anche di 180°, ed il carburante si incendiava spontaneamente a causa dell’elevata temperatura della precamera, che veniva preriscaldata prima dell’avviamento e non veniva raffreddata durante il funzionamento.

Questi motori vennero costruiti principalmente per installazioni fisse ed ebbero un discreto successo in agricoltura, in quanto marche come la Landini e la Orsi costruirono dagli inizi degli anni ‘30 fino ai primi anni ’60 solamente trattori a testa calda ed ebbero un successo a dir poco strepitoso.

Il contributo risolutivo alla diffusione del motore Diesel fu l’invenzione della pompa meccanica da parte di Robert Bosch. Com’era avvenuto per l’accensione Bosch riuscì nel 1927 a offrire pompe d’iniezione affidabili mettendo in condizione i costruttori di come far affluire il combustibile dal serbatoio al motore e del processo d’iniezione in sé sia sui motori stazionari sia su quelli per autotrazione.

## **1.2 - Schema costruttivo generale**

Un tipico motore diesel è costituito da un basamento, nel quale sono alloggiati l'albero a gomiti (o albero motore), che ruota sui cuscinetti di banco, le bielle (articolate sui perni di manovella dell'albero per mezzo di cuscinetti) e i cilindri.

Questi ultimi possono essere ricavati direttamente nella fusione del basamento (detto anche monoblocco) o essere costituiti da canne riportate.

I pistoni, ciascuno dei quali è vincolato alla relativa biella per mezzo di un perno di acciaio detto spinotto, scorrono nei cilindri; la tenuta è assicurata da alcuni anelli elastici (detti comunemente fasce o segmenti) che sono alloggiati in apposite cave praticate nei pistoni.

La parte inferiore del basamento è chiusa da una coppa nella quale è contenuto l'olio lubrificante. Superiormente al monoblocco è fissata, mediante viti, la testata, nella quale sono alloggiare le valvole, con le relative molle, guide e sedi (se queste sono, come di norme accade, di tipo riportato).

L'albero a camme (che impartisce il moto alle valvole) viene azionato dall'albero motore tramite catena, ingranaggi o cinghia dentata. Quando esso è alloggiato nel basamento, il moto viene trasmesso alle valvole per mezzo di punterie, aste e bilancieri; quando invece esso si trova nella testata, le camme agiscono su bilancieri o punterie a bicchiere, che trasmettono il moto direttamente all'estremità dello stelo delle valvole.

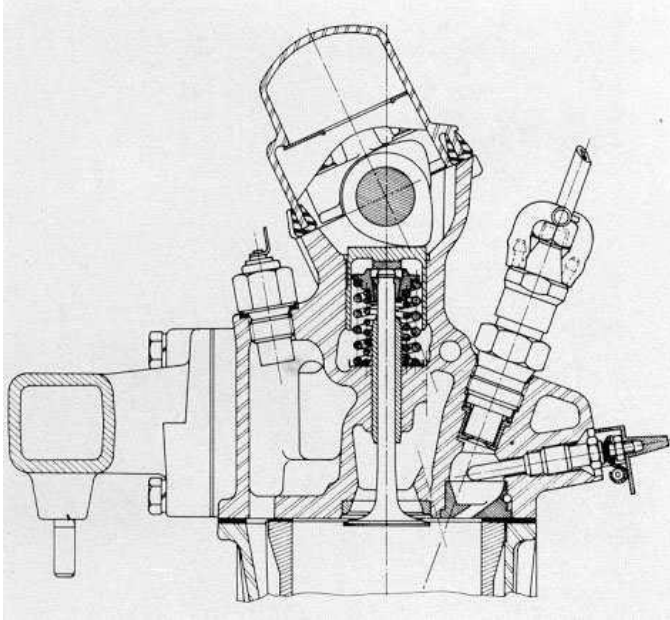
La testata può essere unica ma, specialmente nei motori di grossa cilindrata, si adottano talvolta più testate per ogni "linea" di cilindri (in certi casi vi è addirittura una testata per ogni cilindro).

### *1.2.1 - La testata*

La testata dei motori diesel va suddivisa principalmente in due categorie: la testata per motori ad iniezione indiretta e la testata per motori ad iniezione diretta.

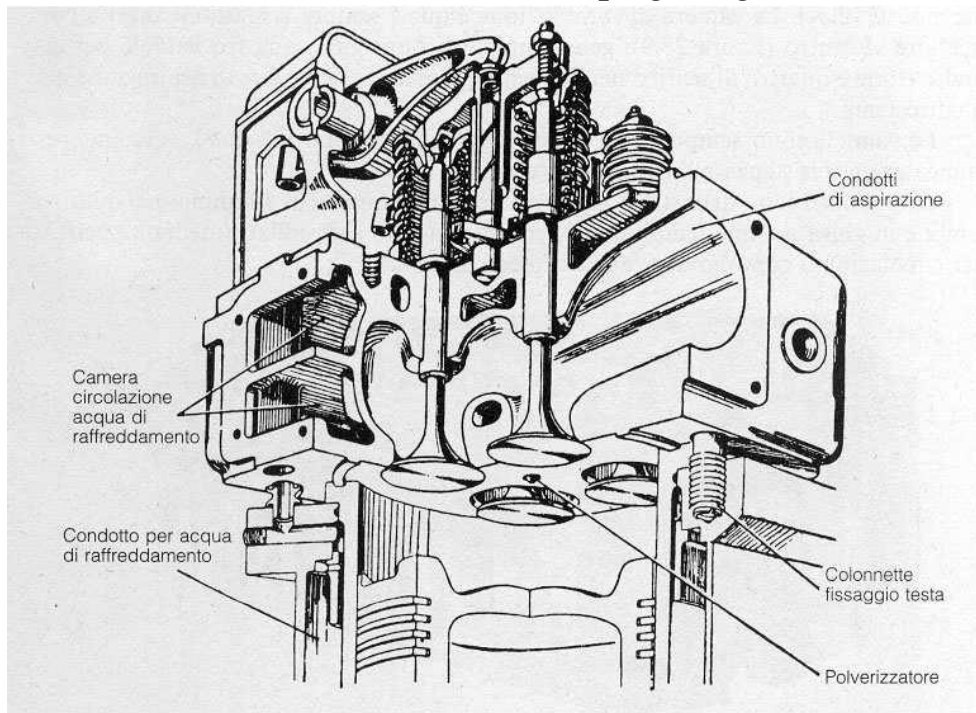
Nei motori diesel a iniezione indiretta la testata si differenzia da quella adottata negli altri motori principalmente per la presenza della camera ausiliaria, con relativo iniettore e candeleto a

incandescenza. Essa è generalmente ricavata da fusioni in lega di alluminio o in ghisa. Come possiamo notare dalla figura sottostante, la testa sezionata trasversalmente presenta una camera ausiliaria di turbolenza e il moto alterno delle valvole è assicurato da un albero a camme in testa. Le sedi e le guide delle relative valvole sono riportate



(cioè installate con una precisa interferenza nei loro alloggiamenti) così come la parte inferiore della camera ausiliaria. Sono inoltre ben visibili i passaggi per il liquido di raffreddamento e la disposizione dell'iniettore e della candele incandescente.

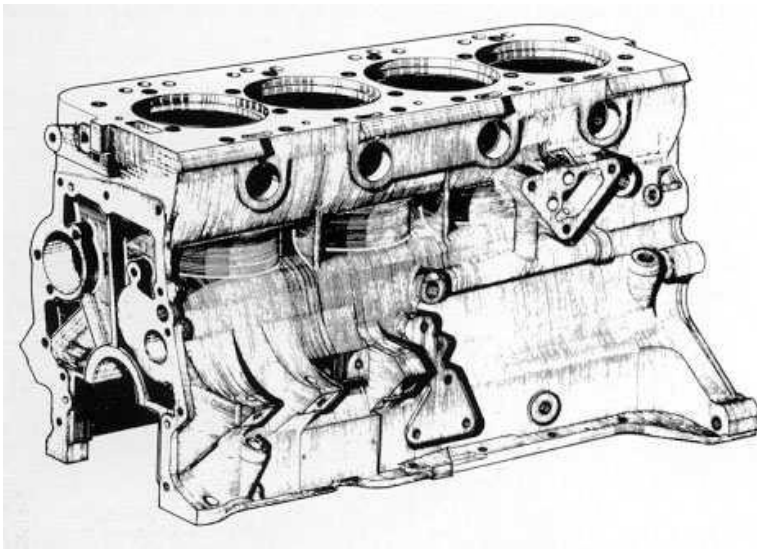
I motori diesel a iniezione diretta sono privi di camera ausiliaria e di conseguenza la testa risulta molto più semplice. In motori di rilevanti dimensioni si usano molto spesso teste singole (una per cilindro); come materiale di norma si impiega la ghisa.





### 1.2.2 - Il basamento

Il basamento o monoblocco del motore è chiuso inferiormente dalla coppa dell'olio e superiormente dalla testa, alloggia al suo interno l'albero motore, con relativi cuscinetti, bielle, pistoni completi di fasce elastiche e spinotti, e infine le canne dei cilindri. Esso è ricavato da una fusione in ghisa o, più raramente, in lega di alluminio; internamente sono ricavate intercapedini per il passaggio del liquido di raffreddamento e canalizzazioni per il passaggio dell'olio del circuito di lubrificazione.



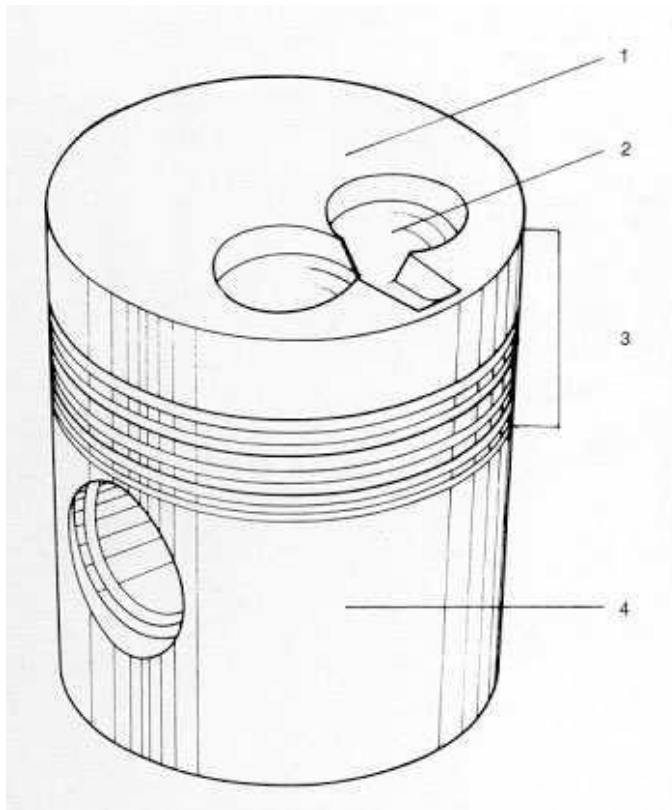
Nella figura possiamo vedere un basamento di un motore diesel a quattro cilindri in linea.

Si può inoltre vedere il cielo dello stantuffo che si trova al punto morto superiore.

### 1.2.3 - Il pistone

I pistoni impiegati nei motori diesel sono abbastanza simili a quelli che si usano nei motori a benzina, ma sono da questi immediatamente riconoscibili per la particolare forma del cielo. Nei diesel a iniezione diretta infatti la camera di combustione è ricavata completamente nel cielo del pistone, ovvero sulla testa, mentre in quelli a iniezione indiretta solitamente la camera principale è praticamente costituita da una fresatura rettilinea e da due circolari praticate nel cielo.

Il pistone scorre nella canna del cilindro con un lieve gioco diametrale, indispensabile per consentire il mantenimento, in qualunque condizione di funzionamento, di un sottile velo di olio lubrificante che, interponendosi tra le due superfici di lavoro impedisce il contatto metallico diretto.



Nel disegno è rappresentato un pistone per motore diesel con camera ausiliaria ad alta turbolenza.

- 1 – cielo;
- 2 – deflettore;
- 3 – testa;
- 4 – mantello.

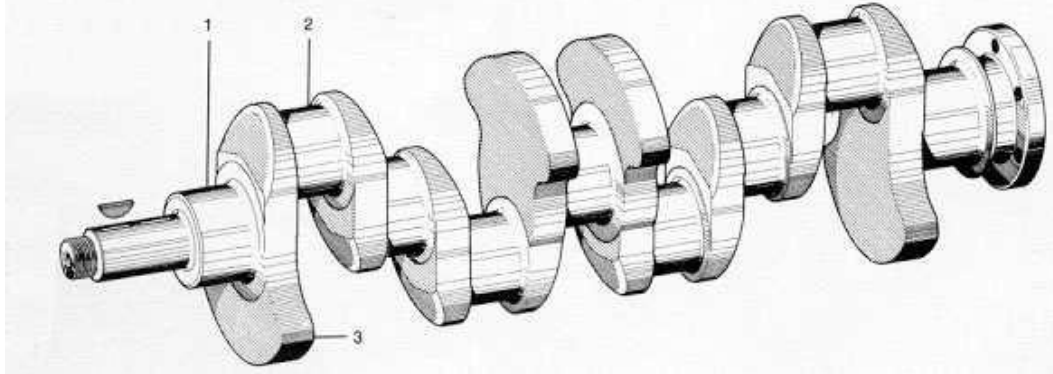
#### *1.2.4 - Segmenti, bielle e albero motore*

Le bielle sono di norma realizzate in acciaio forgiato. L'estremità più piccola viene detta piede di biella; in essa è praticato un foro cilindrico in cui, generalmente tramite interposizione di una boccia, lavora lo spinotto. L'altra estremità, collegata alla prima tramite il fusto, prende il nome di testa di biella. In questo modo le bielle, con relativi cuscinetti speciali antifrizione chiamati comunemente bronzine, possono essere installate sui perni di manovella dell'albero a gomiti. L'albero a gomiti ruota quindi su dei cuscinetti alloggiati nei supporti di banco; di norma ciascuno di questi è dotato di un cappello amovibile che viene fissato al basamento per mezzo di due viti (talvolta, per assicurare la massima rigidità, le viti di fissaggio sono quattro). I cuscinetti vengono installati nei loro alloggiamenti con una certa interferenza che impedisce loro qualunque possibilità di spostamento; sono inoltre dotati di un nasello che ne assicura il corretto posizionamento.

La figura sottostante mostra un albero a gomiti di un motore a quattro cilindri, con cinque perni di banco e contrappesi integrali.

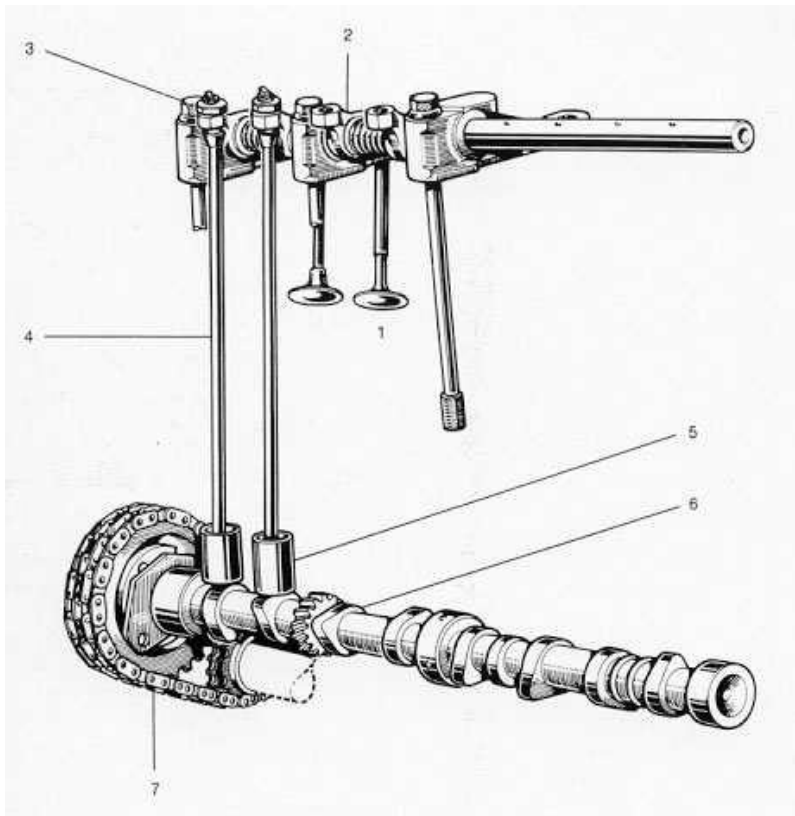
Varie canalizzazioni interne rendono possibile il passaggio dell'olio lubrificante dai cuscinetti di banco a quelli di biella.

1-perni di banco; 2-perni di biella; 3-contrappesi per equilibratura



### 1.2.5 - Gli organi della distribuzione

Gli organi della distribuzione sono costituiti da tutti quei componenti per mezzo dei quali viene regolato il flusso dei gas che entrano o escono dai cilindri. L'albero a camme, che può essere posto nel basamento o nella testata del motore, ruota con velocità



dimezzata rispetto a quella dell'albero a gomiti, dal quale viene azionato per mezzo di ingranaggi, catene o cinghie dentate.

Nei motori di notevole cilindrata, impiegati su autocarri medi e

pesanti, esso è generalmente posto nel basamento e comanda le valvole per mezzo di punterie, aste e bilancieri.

Le valvole di scarico vengono lambite dai caldissimi gas combusti e di conseguenza lavorano ad un'elevata temperatura; le loro condizioni di funzionamento sono particolarmente gravose nel caso di motori sovralimentati.

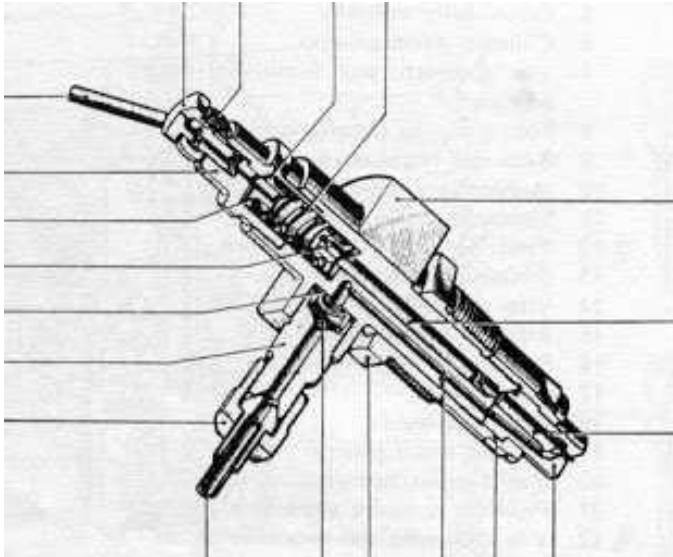
#### *1.2.6 - La pompa di iniezione*

La pompa di iniezione invia il gasolio, sotto elevata pressione, agli iniettori per mezzo di tubazioni metalliche; essa ha anche l'importante funzione di regolare la quantità di combustibile immessa ad ogni ciclo in ciascun cilindro. Le pompe di iniezione di più comune impiego sui motori dei veicoli industriali, diffusissime anche in campo automobilistico, sono quelle in linea, costituite da un corpo pompa (generalmente in lega leggera) nel quale sono alloggiati un albero a camme e gli elementi pompanti (uno per ogni cilindro).

#### *1.2.7 - Gli iniettori*

La pompa di iniezione invia il gasolio sotto elevata pressione agli iniettori, che lo immettono nella camera di combustione sotto forma di uno o più getti opportunamente orientati. Ciascun iniettore è composto da un porta-polverizzatore, costituito in genere da un cilindro di acciaio fissato alla testata, da un polverizzatore (anch'esso in acciaio) la cui estremità è munita di uno o più fori, e da un ago (o spillo). Quest'ultimo sotto la spinta di una molla tarata agente su di esso tramite un'asta, impedisce il passaggio del gasolio al foro (o ai fori) del polverizzatore, consentendolo solo durante la fase di iniezione (allorché la pompa fa innalzare rapidamente a valori assai cospicui la pressione del combustibile). Il funzionamento è estremamente semplice: attraverso le tubazioni di mandata il gasolio giunge all'iniettore, all'interno del quale raggiunge, tramite opportune canalizzazioni, la camera anulare ove grazie alla elevata pressione fa sollevare l'ago e può quindi fuoriuscire con violenza attraverso uno o più fori del polverizzatore. La pressione d'iniezione viene determinata dal carico della molla, che in genere può essere regolato per mezzo di pastiche calibrate in acciaio o di un registro a vite.

Vengono generalmente fissati alla pompa di iniezione o addirittura alloggiati nel corpo pompa anche un “variante di anticipo” ed un “regolatore di velocità”. Il primo ha la funzione di adeguare l’anticipo di iniezione alla velocità di rotazione del motore. Agli alti regimi, poiché il tempo per la formazione della miscela aria-



gasolio e per la sua combustione è minore e poiché la durata del ritardo all’accensione, benché inferiore come tempo, in realtà risulta maggiore se espressa in gradi di rotazione dell’albero a gomiti, è necessario che l’anticipo di iniezione sia maggiore.

### *1.2.8 - La formazione della miscela*

Nei motori ad accensione per scintilla per ottenere una buona combustione il titolo della miscela deve essere sempre assai prossimo a quello chimicamente corretto ovvero circa 15:1 (cioè 15 parti, in peso, di aria per ogni parte di benzina), risultando leggermente ricco alla massima potenza e nel funzionamento al minimo. Nei motori Diesel invece occorre sempre aria in eccesso per compensare la miscelazione, che non può mai risultare molto buona, date le modalità secondo le quali essa si svolge.

Con miscele il cui titolo si avvicina a quello chimicamente corretto la combustione peggiora e si hanno una notevole fumosità allo scarico, una diminuzione della potenza erogata e un surriscaldamento del motore. In pratica nel Diesel veloce il titolo più ricco che si può impiegare è di circa  $17 \div 22$ ; il motore funziona assai bene con miscele magre, come quelle che si hanno a carichi parziali (si rammenti che, come già detto, nei Diesel il comando dell’acceleratore agisce sulla mandata del gasolio e quindi per ridurre la potenza si diminuisce la quantità di combustibile che va a mescolarsi con l’aria immessa nel cilindro ad ogni ciclo, “smagrendo” così il titolo della miscela).

I vari metodi di formazione della miscela adottati dalle case costruttrici di motori Diesel sono tutti studiati, tra l'altro, in modo da ridurre il ritardo all'accensione e da far sì che la quantità di gasolio pronta alla combustione nel momento in cui questa ha inizio sia piuttosto ridotta (in modo da limitare la rapidità di incremento di pressione e la quantità di calore generata durante la prima fase della combustione). Inizialmente è quindi necessario ridurre la velocità di formazione della miscela pronta ad accendersi, mentre in seguito (dopo cioè che la combustione ha avuto inizio) è importante ottenere una distribuzione uniforme della composizione della miscela in tutta la camera, per migliorare l'utilizzazione dell'ossigeno dell'aria ed ottenere una combustione più completa possibile. La formazione della miscela in pratica non è altro che la risultante di vari processi fisici quali la polverizzazione del getto, il riscaldamento e l'evaporazione del carburante e la sua distribuzione nella camera. Le goccioline si formano per frantumazione del getto di gasolio a causa della presenza dei fori del polverizzatore e delle forze aerodinamiche. Dopo l'inizio della combustione, la pressione e la temperatura nel cilindro aumentano e di conseguenza sia il riscaldamento che l'evaporazione delle goccioline di gasolio risultano più rapidi. L'energia impiegata per la distribuzione del combustibile nella camera è costituita dalla somma dell'energia cinetica del getto più quella dell'aria, e dipende dal tipo di camera e dal metodo di formazione della miscela.

#### *1.2.9 - La combustione*

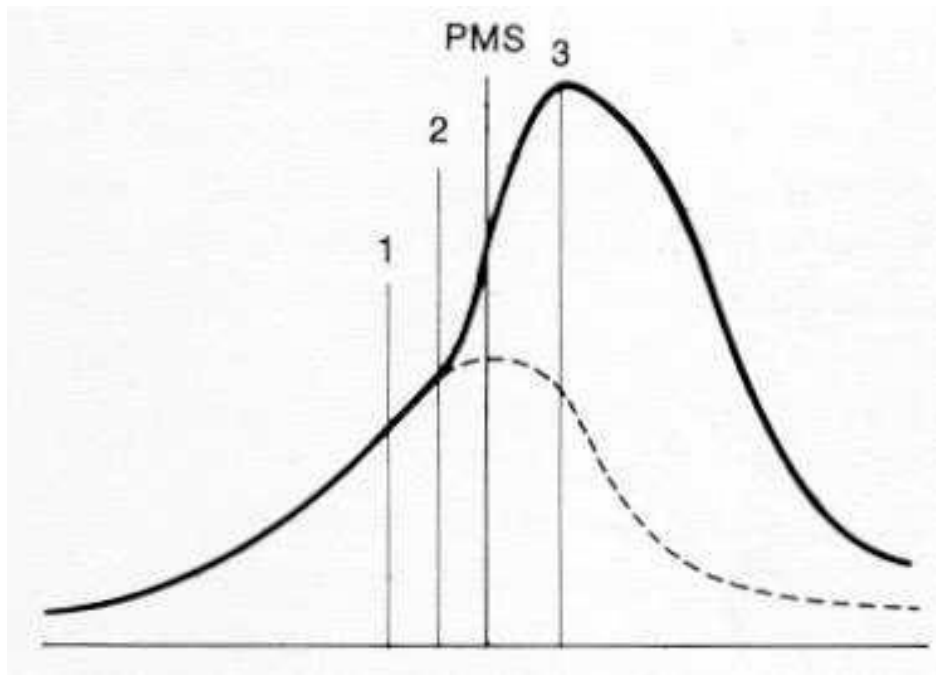
Verso la fine della corsa di compressione, con un certo anticipo rispetto al PMS, ha inizio l'iniezione del combustibile all'interno del cilindro; essa si prolunga per un notevole arco di rotazione dell'albero a gomiti ( $30^\circ \div 40^\circ$ ) e termina in prossimità del PMS (talvolta poco dopo di esso). Dato che occorre un certo tempo perché la combustione si svolga completamente, e dato che occorre introdurre il gasolio progressivamente all'interno del cilindro in modo che essa proceda in maniera graduale, è infatti indispensabile far cominciare l'iniezione del gasolio con un certo anticipo rispetto al PMS ( $15^\circ \div 25^\circ$ ). La combustione non comincia esattamente

allorché le prime goccioline di gasolio vengono iniettate nel cilindro, ma con un certo ritardo (misurabile in millisecondi).

E' quindi evidente che il ritardo all'accensione deve essere ridotto al minimo per ottenere il miglior funzionamento del motore; esso diminuisce con l'aumentare della temperatura del regime di rotazione e della turbolenza, ed è assai influenzato dal tipo di camera e di iniettore adottato.

Durante il periodo corrispondente al ritardo all'accensione le goccioline di combustibile, di dimensioni microscopiche (il diametro è compreso mediamente tra 0,05 e 0,005 mm), vaporizzano, ovvero passano dalla fase liquida a quella gassosa, a spese del calore dell'aria compressa nel cilindro; in pratica si tratta di una fase di preparazione e di innesco alla combustione vera e propria. Allorché il gasolio inizia a bruciare la pressione e la temperatura all'interno del cilindro cominciano ad aumentare rapidamente. L'istante in cui comincia questo brusco innalzamento della pressione coincide con l'inizio della combustione vera e propria. Man mano che nuovo gasolio viene immesso nella camera, esso vaporizza, si mescola con i gas in combustione e con l'aria ad elevata temperatura e quindi brucia.

Se la pressione aumenta molto rapidamente (ovvero se gradiente di pressione è elevato) il funzionamento del motore è piuttosto ruvido e si possono avere dei fastidiosi battiti. Lunghi anni di studi ed esperienze da parte delle case costruttrici hanno portato ad eccezionali risultati per quanto riguarda il controllo della combustione e gli attuali motori Diesel per autotrazione sono caratterizzati da un funzionamento estremamente dolce e silenzioso. Dopo aver raggiunto la pressione massima la combustione prosegue assai più lentamente, fino a terminare durante la fase di espansione (anche  $60^\circ \div 70^\circ$  dopo il PMS).



1 inizio iniezione; 1-2 ritardo all'accensione; 2-3 fase di combustione rapida.

Il grafico illustra l'andamento della pressione all'interno del cilindro in prossimità del PMS a fine fase di compressione.

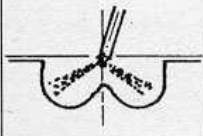
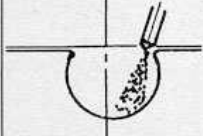
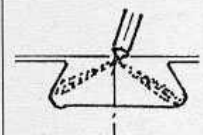
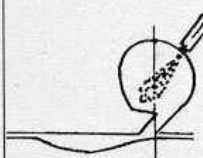
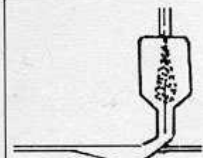
Il processo di combustione è influenzato, oltre che dalla durata del ritardo all'accensione, dalle modalità secondo le quali avviene la miscelazione tra aria e gasolio. Si tenga presente che, a differenza di quanto accade nei motori a benzina, nei motori Diesel la combustione può iniziare contemporaneamente in punti diversi della camera ed inoltre non si ha un vero e proprio fronte di fiamma.

#### 1.2.10 - Il diesel a iniezione diretta

Nel motore a iniezione diretta la camera di combustione viene detta "aperta", in quanto si trova tra il cielo dello stantuffo e la testata: la turbolenza dell'aria è relativamente bassa ed una buona miscelazione viene assicurata principalmente da polverizzazione molto spinta. Questa viene ottenuta adottando iniettori dotati di più fori (da 2 a 6) ed elevate pressioni di iniezione (150 ÷ 240 bar). Per ridurre il ritardo all'accensione, i condotti sono conformati e disposti in modo da impartire all'aria un moto di rotazione. Alla fine della corsa di compressione il pistone si avvicina notevolmente alla testata fino a sfiorarla allorché raggiunge la posizione di PMS.



Ecco qui rappresentate due tabelle, che illustrano rispettivamente le caratteristiche delle camere di combustione sia per motori ad iniezione diretta ed indiretta:

Tipo di camera	Schema	Rapporto di utilizzazione aria	Pressione massima (bar)	Caratteristiche
Camera aperta		0,95	90	Sistema generale; campo di utilizzazione aria e campo di numero di giri contenuti. Alta affidabilità per motori di grandi dimensioni.
Camera MAN		1,35	80	Pressione media effettiva alta a confronto con la soluzione precedente. Attenzione all'affidabilità e alle caratteristiche di partenza a freddo.
Camera a bordo rientrante		1,30	90	Buone caratteristiche di contenimento inquinanti, sollecitazioni termo-elastiche alte; porre attenzione ai problemi di affidabilità.
Precamera ad alta turbolenza		1,10	70	Sistema di largo impiego nel campo dei piccoli motori. È caratterizzato da ampi campi di utilizzazione aria e numero di giri. Nei motori di dimensioni maggiori sorgono problemi di affidabilità.
Precamera Perkins		1,20	65	Caduta delle caratteristiche, rapporto di utilizzazione aria peggiore della configurazione a precamera ad alta turbolenza con affidabilità leggermente superiore. L'affidabilità è comunque inferiore a quella dei motori a iniezione diretta.

### 1.2.11 - Il diesel a iniezione indiretta

Nel motore Diesel a iniezione indiretta la combustione avviene in due vani separati, collegati tra di loro tramite un condotto di sezione piuttosto ridotta. Il gasolio viene iniettato nella camera ausiliaria all'interno della quale l'aria è dotata di un energico moto turbolento. La formazione della miscela avviene principalmente a spese dell'energia cinetica dell'aria e di conseguenza grazie anche alle ridotte dimensioni della camera ausiliaria la pressione di iniezione non è molto elevata (solitamente da 100 a 160 bar) e si possono impiegare pulverizzatori con un solo foro dal diametro talvolta piuttosto rilevante (1 ÷ 2 mm). Il pulverizzatore è posto nella camera ausiliaria e, allorché inizia l'iniezione del gasolio ed ha quindi inizio la combustione, l'alta pressione che viene a crearsi

fa sì che i gas caldi si riversino ad elevata velocità nella camera principale portando con sé gasolio incombusto che si miscela con l'aria fresca presente e brucia a sua volta

### *1.2.12 - L'alimentazione*

Dal serbatoio il gasolio giunge, dopo esser passato attraverso un filtro, alla pompa di alimentazione; questa generalmente è del tipo a pistoncino e viene quasi sempre azionata meccanicamente per mezzo di un eccentrico dall'albero a camme del motore o da quello della pompa d'iniezione. Il gasolio viene inviato, sotto una pressione di  $1 \div 2$  bar, ad uno o due filtri a cartuccia, installati il più delle volte in posizione piuttosto elevata per poter permettere una facile eliminazione dell'aria eventualmente presente nelle tubazioni (le bolle di aria vengono intrappolate nella parte più alta del circuito). Questi filtri sono in grado di trattenere particelle anche di dimensioni ridottissime; il gasolio che giunge alla pompa d'iniezione deve infatti essere pulitissimo poiché anche la minima impurità potrebbe causare danni agli elementi pompanti, i quali sono molto delicati.

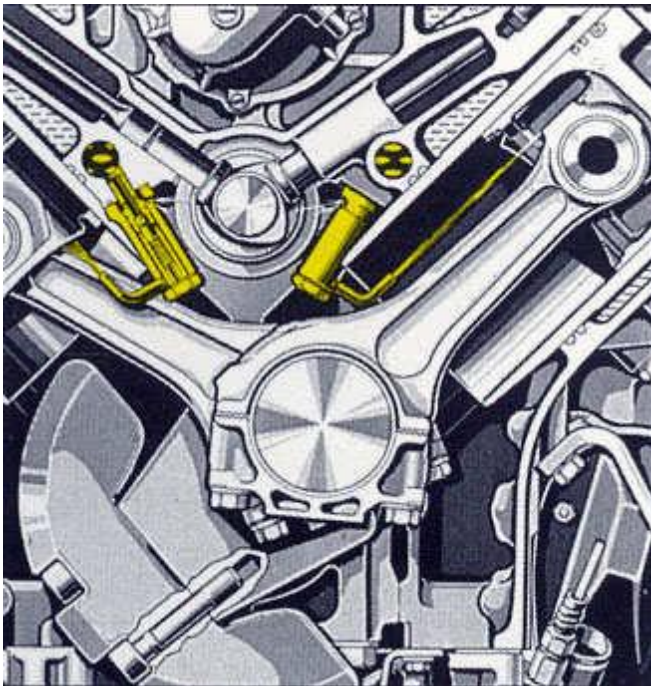
### *1.2.13 - La lubrificazione*

Come è noto quando due corpi a contatto tra loro sono in movimento reciproco, a causa dell'attrito gran parte dell'energia meccanica viene trasformata in calore. Se pressione e velocità sono sufficientemente elevate, in pochi attimi si arriva al grave danneggiamento delle superfici e, nel caso di oggetti metallici, addirittura all'ingranamento e a principi di fusione localizzata. Per evitare tutto ciò si ricorre alla lubrificazione.

Le superfici degli organi mobili del motore vengono separate da un velo di olio di spessore cospicuo, che impedisce il contatto metallico diretto e riduce quindi a valori trascurabili l'usura. L'olio è contenuto nella coppa e viene inviato sotto pressione tramite una pompa generalmente ad ingranaggi ai cuscinetti di banco e di biella, e a quelli che sopportano l'albero a camme. Il circuito di lubrificazione comprende inoltre delle canalizzazioni attraverso le quali l'olio viene inviato a tutti gli organi della distribuzione

(valvole, guide, bilancieri, punterie, eccentrici dell'albero a camme).

Dopo aver adempito alla propria funzione lubrificante (ma non è da trascurare il fatto che una certa quantità di calore viene sottratta tramite l'olio da punti assai sollecitati come cuscinetti e pistoni), l'olio ritorna per gravità nella coppa, ove ha modo di raffreddarsi. E' della massima importanza che il lubrificante che circola nel motore sia assolutamente privo di impurità (in caso contrario molti organi – in maniera particolare i cuscinetti – si usurano rapidamente); per questo motivo il circuito di lubrificazione è dotato anch'esso di un filtro a cartuccia.



In alcuni motori molto sollecitati, come ad esempio tutti quelli sovralimentati mediante turbocompressore, per migliorare il raffreddamento dei pistoni si impiegano dei getti di olio lanciati da appositi ugelli posti alla base delle canne dei cilindri. (vedi figura)

#### *1.2.14 - Il raffreddamento*

Per evitare che si raggiungano temperature troppo elevate (durante la combustione i gas superano i 2000° C e buona parte del calore ottenuto bruciando la miscela aria-gasolio viene assorbita dagli organi del motore) che causerebbero in breve tempo la messa fuori uso di alcuni componenti vitali, è indispensabile dotare il motore di un efficiente circuito di raffreddamento.

Come fluido refrigerante si può impiegare l'acqua (che per mezzo del radiatore cede il calore assorbito all'atmosfera) o, meno comunemente, l'aria.

In quest'ultimo caso, per migliorare lo scambio termico, si aumenta la superficie a contatto con l'aria (che viene "soffiata" per

mezzo di una ventola e di adatti convogliatori) dotando teste e cilindri di una adeguata alettatura. Quando invece si impiega il raffreddamento ad acqua, attorno alle canne dei cilindri e nella zona più sollecitata della testata vengono praticate delle intercapedini e delle canalizzazioni per il passaggio del liquido refrigerante. Questo viene messo in movimento per mezzo di una pompa. Per permettere al motore di raggiungere la temperatura di esercizio nel più breve tempo possibile il circuito è dotato di un termostato il quale fa sì che al di sotto di una certa temperatura l'acqua non circoli attraverso il radiatore. Attualmente tutti i motori Diesel destinati ad essere impiegati sulle autovetture sono raffreddati ad acqua.

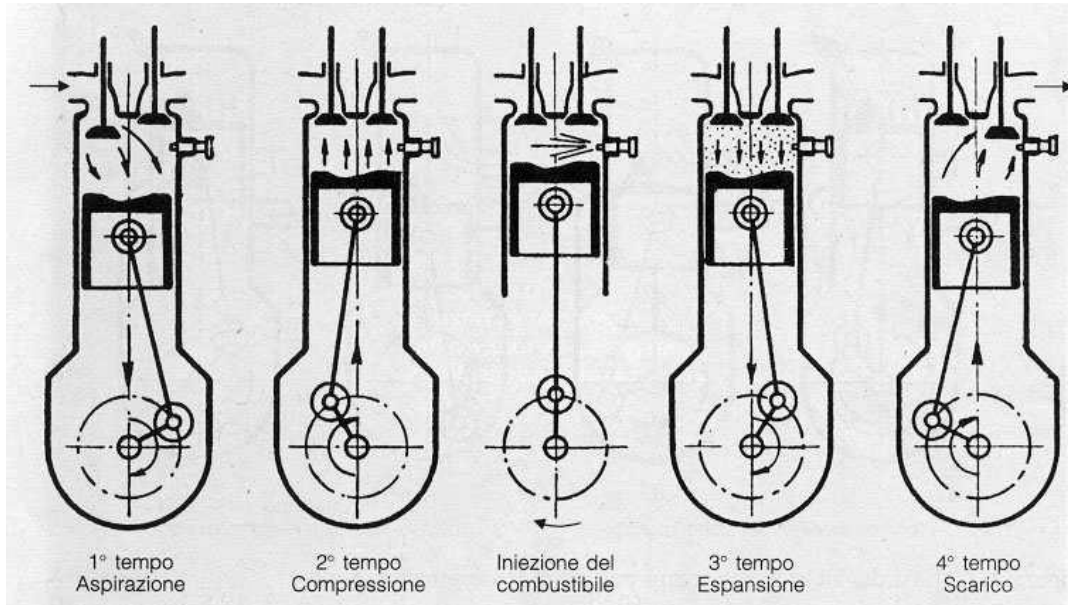
### **1.3 - Funzionamento del ciclo a quattro tempi**

Considerando un solo cilindro, disposto verticalmente, esaminiamo la successione delle varie fasi del ciclo all'interno di esso.

Aspirazione. Il pistone si muove verso il PMI trascinato dall'albero a gomiti e attraverso il condotto e la valvola di aspirazione, che è in posizione di apertura, entra nel cilindro una certa quantità d'aria depurata ad una pressione leggermente inferiore a quella atmosferica.

Compressione. In questa seconda fase il pistone risale verso il PMS con entrambe le valvole (aspirazione e scarico) chiuse, l'aria viene fortemente compressa aumentando così pressione e temperatura del fluido. Ad un certo punto, poco prima del PMS, viene iniettato gasolio finemente polverizzato per mezzo di un iniettore; esso si mescola con l'aria caldissima ed ha così inizio la combustione (la temperatura dell'aria è superiore a quella di accensione del gasolio).

Espansione. Questa è la fase "utile" del ciclo, ovvero quella nella quale l'energia termica prodotta dalla combustione viene trasformata in energia meccanica. La combustione innalza a valori molto elevati la temperatura dei gas all'interno del cilindro e la pressione assai elevata che si genera agisce sul pistone spingendolo bruscamente al PMI.

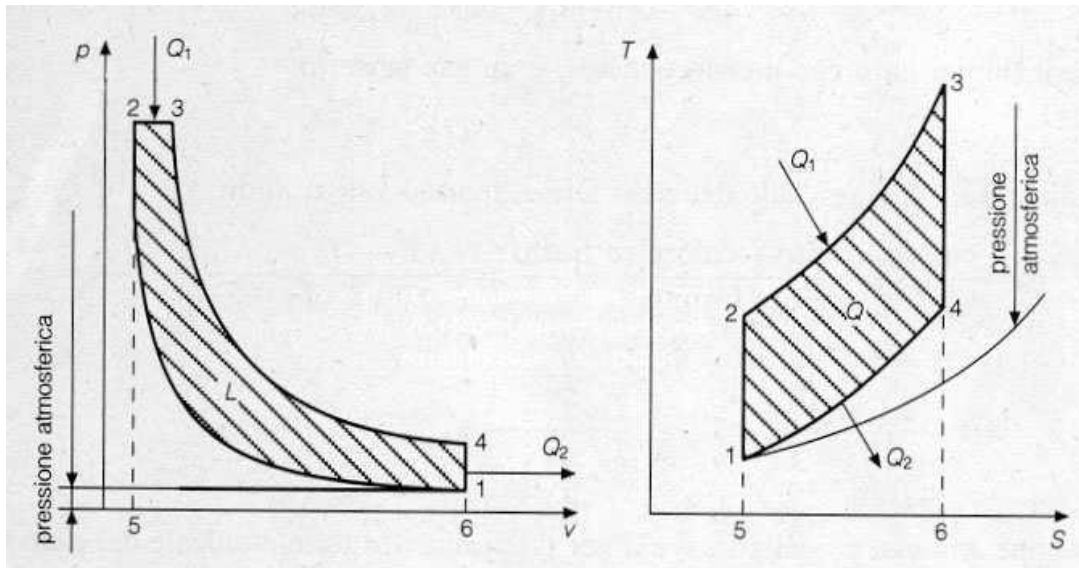


Scarico. Verso la fine della fase di espansione, ancor prima che il pistone raggiunga il PMI, comincia ad aprirsi la valvola di scarico ed i gas combusti si riversano ad elevata velocità nel condotto di scarico. Risalendo poi al PMS il pistone completa la fase di scarico espellendo forzatamente (scarico forzato) i gas residui.

E' a questo punto evidente il motivo per cui il ciclo viene detto a "quattro tempi"; le fasi si compiono infatti in quattro corse del pistone, ovvero in due giri dell'albero a gomiti.

Come appare dalla figura sottostante, il ciclo Diesel ideale è costituito principalmente dalle seguenti trasformazioni termodinamiche:

- 1 – 2 compressione adiabatica;
- 2 – 3 introduzione a pressione costante della quantità di calore  $Q_1$ ;
- 3 – 4 espansione adiabatica;
- 4 – 1 espulsione a pressione costante della quantità di calore  $Q_2$ .



Vediamo ora di descrivere brevemente le quattro fasi fondamentali del ciclo a quattro tempi tenendo sott'occhio il grafico soprastante.

- Aspirazione: l'aria viene aspirata all'interno del cilindro secondo la isobara 5 – 1, la temperatura  $T_1$  del fluido risulta dipendere dalla temperatura dell'aria aspirata e dal peso dei gas combustibili rimasti all'interno del cilindro durante le fasi precedenti.
- Compressione: lo stantuffo risale al PMS comprimendo adiabaticamente l'aria secondo la linea 1 – 2 raggiungendo una pressione  $P_2$  che si aggira intorno ai  $65 \div 85$  bar ed una temperatura  $T_2$  di circa  $600 \div 700^\circ \text{C}$ .
- Combustione espansione: la isobara 2 – 3 rappresenta la combustione del gasolio iniettato nel cilindro. In un primo tempo la pressione rimane costante perché mentre aumenta a causa della combustione diminuisce a causa del movimento discendente dello stantuffo. In un secondo tempo poi, per l'accresciuta velocità dello stantuffo, la pressione decresce rapidamente con l'aumentare del volume generato dallo stantuffo. Per questo motivo si può ritenere che il calore  $Q_1$  venga introdotto alla pressione costante  $P_2$ . I prodotti della combustione poi si espandono adiabaticamente secondo la linea 3 – 4, spingendo verso il basso lo stantuffo, mentre la temperatura discende da  $T_3$  a  $T_4$ .
- Scarico: per diminuire la contropressione allo scarico che frenerebbe il movimento dello stantuffo, la fase di espansione viene interrotta prima che lo stantuffo raggiunga

il PMI aprendo la valvola di scarico con un certo anticipo. Per questo i gas combusti che si trovano nel cilindro alla pressione  $P_4 > P_1$  si scaricano nell'atmosfera spontaneamente. Il salto di pressione  $P_4 - P_1$ , trasformandosi in energia cinetica, imprime ai gas combusti la velocità di uscita. Contemporaneamente la temperatura si abbassa da  $T_4$  a  $T_1$  secondo la linea 4 – 1 a volume costante. Durante questa fase viene sottratto il calore  $Q_2$ . Lo stantuffo poi completa lo scarico secondo la linea 1–5.

Studiando ora più attentamente il suddetto ciclo, il suo rendimento ideale che viene considerato come il rapporto fra la differenza tra calore fornito  $Q_1$  e calore sottratto  $Q_2$  ed il calore fornito  $Q_1$  si può ridurre quindi alla seguente formula generale:

$$\eta_{id} = (Q_1 - Q_2) / (Q_1) = 1 - (Q_2) / (Q_1)$$

Conoscendo inoltre le due trasformazioni nelle quali avviene l'introduzione e l'espulsione di calore  $Q_1$  e  $Q_2$ , che risultano essere rispettivamente una isobara ed una isocora, la quantità di calore si può semplicemente calcolare con le seguenti formule:

$$\begin{array}{ll} \text{isobara } 2 - 3 & Q_1 = c_p (T_3 - T_2) \\ \text{isocora } 4 - 1 & Q_2 = c_v (T_4 - T_1) \end{array}$$

A questo punto la formula del rendimento ideale del ciclo Diesel si può scrivere molto più semplicemente come:

$$\eta_{id} = 1 - [(T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)]$$

Dopo alcuni semplici passaggi algebrici la formula risultante risulta essere:

$$\eta_{id} = 1 - (1 / \rho^{k-1}) [(\tau^k - 1) / (k (\tau - 1))]$$

dove  $\rho$  rappresenta il rapporto di compressione, ovvero il rapporto tra il volume del cilindro  $V_1$  (dato dalla somma tra la cilindrata unitaria ed il volume della camera di combustione) ed il volume della sola camera di combustione  $V_2$  ;

$$\rho = (V_1) / (V_2)$$

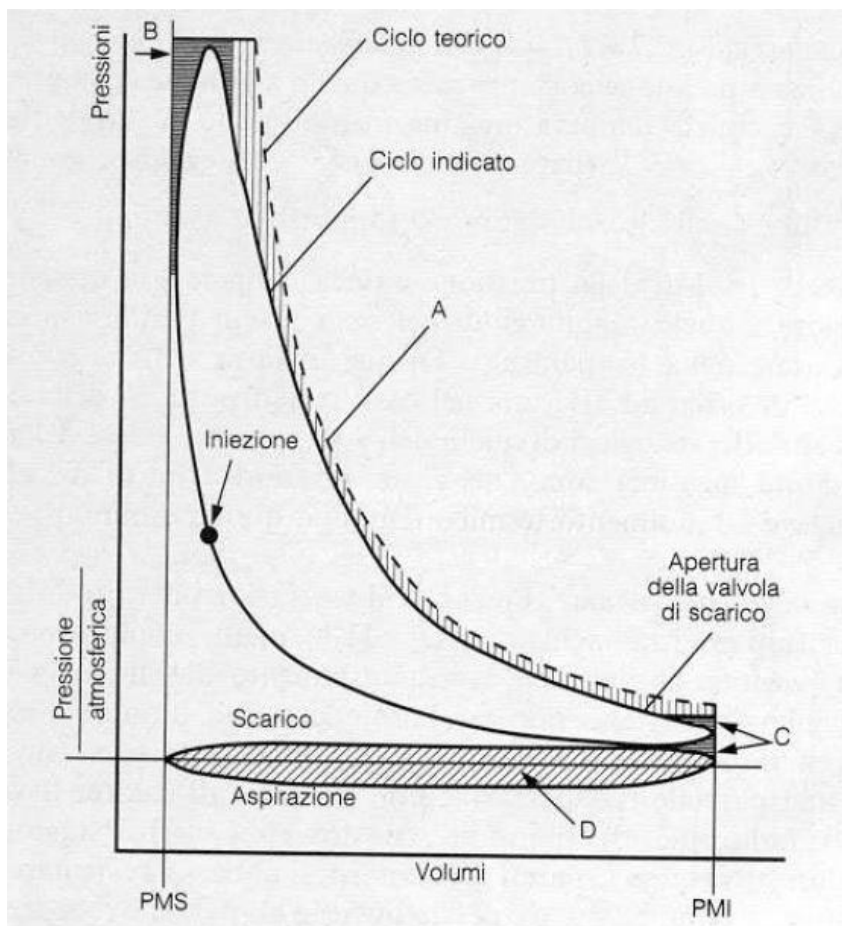
$\tau$  rappresenta il rapporto di combustione, ovvero il rapporto tra i due diversi volumi rispettivamente nei punti 3 e 2 oppure tra le due diverse temperature sempre nei punti 3 e 2, cioè praticamente l'inizio e la fine della combustione;

$$\tau = (V_3) / (V_2) = (T_3 / T_2)$$

ed infine  $K$  rappresenta il rapporto tra il  $c_p$  ed il  $c_v$  di un gas, che nel caso del ciclo Diesel è aria ed il valore di  $K$ , che è tabellato, vale

$$K = (c_p) / (c_v) = 1,4 \text{ (aria)}$$

In realtà il ciclo ideale non avviene mai, in quanto per ottenerlo bisognerebbe supporre istantanea sia la combustione che l'apertura e la chiusura delle valvole, che risultano essere praticamente impossibili. Infatti le valvole si aprono e si chiudono con un certo anticipo o ritardo rispetto ai punti morti, mentre la combustione inizia parecchi gradi prima che lo stantuffo raggiunga il PMS e finisce parecchi gradi dopo. Il ciclo ideale quindi risulta essere leggermente "deformato" se disegnato tenendo conto di questi



fattori, e questo nuovo ciclo che possiamo definire reale prende spesso il nome di ciclo indicato.

Osserviamo ora attentamente il ciclo Diesel reale e confrontiamolo con il ciclo Diesel teorico. Come prima cosa notiamo differenze di forma e nei valori delle pressioni e delle temperature; differenze dovute alla variazione dei calori specifici, alle perdite di calore, al tempo di apertura e chiusura delle valvole, alle perdite di



pompaggio ed infine nella combustione, che non avviene a pressione costante come nel caso del ciclo ideale.

La combustione in realtà avviene infatti in parte a volume costante e in parte a pressione costante. Solo nel caso di motori molto lenti la combustione si sviluppa in modo da avvicinarsi un poco al processo teorico.

Nel motore Diesel la dissociazione dei prodotti della combustione non ha effetto così importante come nel motore ad accensione comandata, in quanto l'eccesso d'aria e la mescolanza dei prodotti della combustione sono tali da ridurre la temperatura massima e perciò anche la dissociazione dei prodotti della combustione.

Le perdite di pompaggio sono inferiori a quelle dei motori ad accensione comandata, in quanto nei motori Diesel non esiste la valvola a farfalla.

Perciò l'area negativa D del ciclo Diesel reale è nettamente minore di quella del ciclo Otto.

#### **1.4 - Rendimenti, calcolo della potenza e bilancio termico**

Parlando dei rendimenti si definisce *rendimento termodinamico* del motore il rapporto tra la quantità di energia termica realmente trasformata in energia meccanica e la quantità di calore ottenibile mediante combustione completa della miscela aria-combustibile presente nei cilindri ad ogni ciclo.

Esso cresce, come abbiamo visto, all'aumentare del rapporto di compressione; di conseguenza risulta assai più elevato nei Diesel che non nei motori ad accensione comandata (si ottengono infatti valori di  $34 \div 40 \%$  contro  $26 \div 32 \%$ ).

Il rapporto tra la potenza che l'albero a gomiti può realmente trasmettere alla frizione e quella generata nei cilindri (ovvero quella teoricamente disponibile) costituisce il *rendimento meccanico* del motore. Esso risulta leggermente inferiore nei Diesel ( $84 \div 88 \%$ ). Ciò che fa perdere la potenza effettivamente generata sono le perdite meccaniche che possono essere divise in quelle dovute ad attrito (fra segmenti e pareti dei cilindri, nei cuscinetti, per azionamento degli organi di distribuzione, della pompa dell'olio, ecc...) e quelle dovute al pompaggio.

Un ultimo rendimento infine è il *rendimento volumetrico*. In realtà esso non può essere considerato un vero e proprio rendimento, infatti viene spesso definito *coefficiente di riempimento*. Rappresenta praticamente il rapporto tra la quantità di aria realmente introdotta nel cilindro ad ogni ciclo e quella che, a pressione atmosferica, occupa un volume corrispondente alla cilindrata del motore. Nelle migliori condizioni esso raggiunge valori di 80 ÷ 85 %. Il coefficiente di riempimento varia con il regime di rotazione dell'albero a gomiti e, dopo aver raggiunto il valore più elevato (ad un regime prossimo a quello di coppia massima) scende fino a valori che possono, al regime di massima potenza, risultare anche molto bassi (65 ÷ 70 %). Ne risulta da questo discorso che il motore utilizza l'energia sviluppata dalla combustione della miscela aria-gasolio in maniera molto redditizia. Circa il 34 ÷ 40 % di essa viene utilizzato (ovvero trasformato in energia meccanica) mentre il rimanente 60 ÷ 65 % viene sprecato. Il rendimento totale (o globale) di un motore può quindi essere espresso come il rapporto tra la potenza effettiva (o erogata) e la potenza ottenibile dalla completa combustione del gasolio, ovvero:

$$\eta_{\text{tot}} = (P_e) / (M_c * k_i)$$

essendo  $M_c$  la portata massica del combustibile e  $k_i$  il potere calorifico inferiore del combustibile.

Il rendimento totale può anche essere visto come il prodotto fra i diversi rendimenti parziali del motore, ovvero:

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{id}} * \eta_i * \eta_m$$

essendo  $\eta_{\text{id}}$  il rendimento ideale del ciclo,  $\eta_i$  il rendimento indicato e  $\eta_m$  il rendimento meccanico.

Passando ora a parlare delle potenze di un motore, bisogna come prima cosa bisogna distinguere principalmente tra tre diverse potenze: la potenza indicata  $P_i$  che si può calcolare partendo dal ciclo indicato; la potenza assorbita dalle resistenze passive  $P_r$  che generalmente si misura facendo trascinare il motore (senza accensione) da un altro motore ausiliario; può anche essere calcolata come differenza tra la potenza indicata e la potenza al freno; la potenza effettiva (o erogata) che si misura mediante un freno e perciò viene anche chiamata potenza al freno.

### **Potenza indicata**

La sua espressione si ricava partendo dalla pressione media indicata  $P_{mi}$  che risulta essere il rapporto fra l'area del ciclo indicato e la cilindrata del motore. Il lavoro indicato  $L_i$  è quindi dato dalla seguente formula:

$$L_i = P_{mi} V z$$

essendo  $V$  la cilindrata unitaria e  $z$  il numero di cilindri.

Dividendo il lavoro indicato  $L_i$  per il tempo occorrente a svilupparlo si ottiene la potenza indicata. Detto  $n$  il numero di giri che il motore compie in un minuto primo, per un motore a 4 tempi il tempo (in secondi) occorrente per compiere un ciclo è

$$120 / n$$

perciò la potenza indicata è:

$$P_i = P_{mi} V z (n / 120)$$

### **Potenza effettiva**

Dalla definizione di rendimento meccanico ricaviamo la potenza effettiva  $P_e$

$$P_e = \eta_m P_i = \eta_m P_{mi} V z (n / 120)$$

e ponendo

$$P_{me} = \eta_m P_{mi}$$
$$P_e = P_{me} V z (n / 120)$$

Come già detto precedentemente, solo una parte dell'energia termica del combustibile bruciato viene trasformata in energia meccanica. La parte rimanente viene dispersa per vie diverse: l'acqua di raffreddamento, per mezzo del radiatore, ne disperde una forte percentuale; i gas di scarico uscendo a elevata temperatura ne asportano una percentuale ancora maggiore; le parti stesse del motore trasmettono il resto per radiazione all'aria ambiente. La quantità di calore equivalente al lavoro compiuto per vincere le resistenze passive è assorbita pure attraverso queste tre vie fondamentali di dispersione. La misurazione delle percentuali del calore perduto si esegue nelle sale prova con metodi abbastanza semplici: in base ai risultati viene registrato il cosiddetto bilancio termico.

# CAPITOLO II

## 2.1 – La sovralimentazione

La combustione è una reazione chimica in cui due sostanze - il combustibile e il comburente - reagiscono tra loro producendo energia (ed elementi di scarto). Può assolvere al grado di combustibile una grande varietà di sostanze ma il comburente è uno solo: l'ossigeno.

Un motore per erogare più potenza rispetto alla media ha bisogno di bruciare più carburante e per farlo richiede più comburente.

La quantità massima d'aria, che un motore atmosferico di una determinata cubatura è capace di aspirare ad ogni ciclo, è fissa.

Di conseguenza anche la potenza massima ottenibile è fissa.

Però, c'è la possibilità, con la pratica della sovralimentazione, di aumentare la quantità di aria che il motore è in grado di aspirare e, di conseguenza, la potenza erogabile.

Ad ogni ciclo viene così immessa all'interno del cilindro una quantità di aria assai maggiore di quella che entrerebbe in caso di normale alimentazione aspirata.

La pressione media effettiva risulta quindi notevolmente più alta e quindi la coppia e la potenza erogata dal motore sono maggiori.

La sovralimentazione offre così la possibilità di incrementare notevolmente le prestazioni del motore senza grossa spesa e senza che vi sia necessità di aumentarne la cilindrata (e quindi le dimensioni ed il peso) o il regime di rotazione.

Si possono distinguere tre tipi di sovralimentazione:

- a) la "sovralimentazione dinamica" ottenuta tramite la particolare progettazione dei collettori d'aspirazione, capaci di sfruttare al meglio l'inerzia della colonna d'aria nei condotti;
- b) la "sovralimentazione meccanica", ottenuta attraverso la compressione dell'aria all'interno del collettore d'aspirazione;
- c) la "sovralimentazione chimica" ottenuta attraverso la miscela dell'aria d'aspirazione con opportune sostanze chimiche.

### *2.1.1 - La sovralimentazione dinamica*

Nella fase d'aspirazione il movimento verso il basso del pistone provoca una diminuzione di pressione a valle del collettore stesso. La colonna d'aria che riempie il condotto dovrebbe, idealmente, mettersi immediatamente in movimento verso la zona a bassa pressione (ossia la camera di combustione) per arrestarsi appena il pistone inizi la sua corsa verso l'alto, verso la compressione.

A causa dell'inerzia la colonna d'aria inizia a muoversi con un certo ritardo e si arresta con altrettanta lentezza, ovvero dopo che il pistone ha già iniziato la risalita. Nella colonna in movimento si creano dei fenomeni pulsatori, delle vere onde di pressione. L'inerzia dei gas e i relativi fenomeni di risonanza, possono essere opportunamente sfruttati, regolando la lunghezza del collettore e la fasatura dell'aspirazione in modo tale che, la chiusura della valvola avvenga molto dopo il punto morto inferiore e coincidendo con l'istante in cui l'onda di pressione viaggia in direzione - ed è in prossimità - della valvola stessa. Così, poco prima dell'inizio della fase di compressione, entra nel cilindro una quantità supplementare di aria, compressa per mezzo dei fenomeni pulsatori creatisi all'interno del collettore, migliorando il rendimento volumetrico sino a renderlo maggiore di 1, il che significa effettuare una vera e propria sovralimentazione.

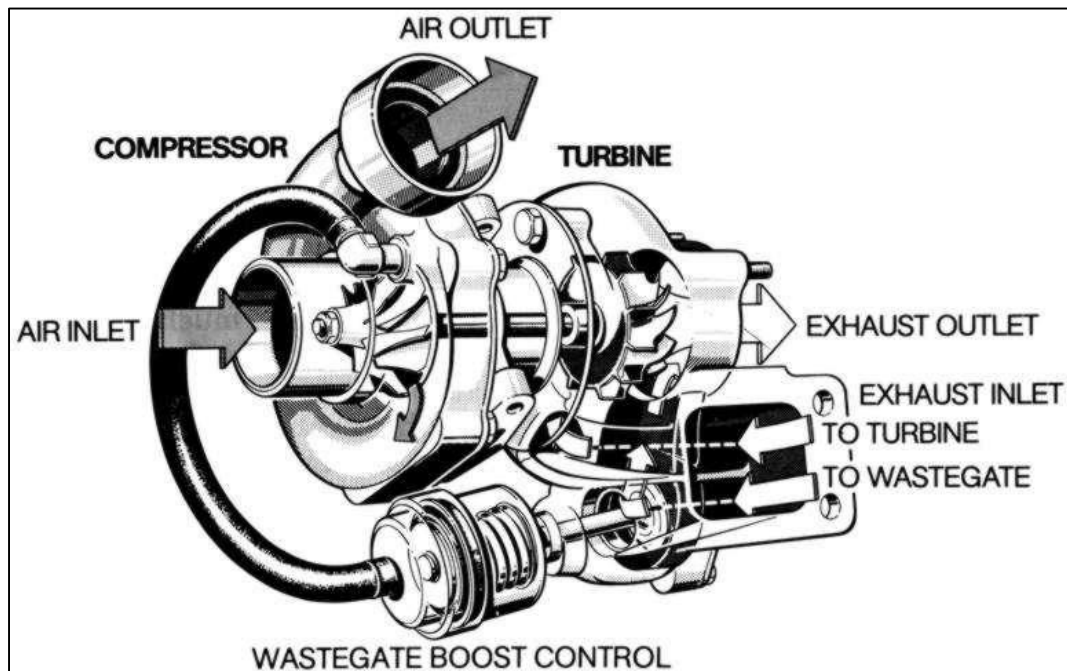
### *2.1.2 - La sovralimentazione meccanica*

Questo tipo di sovralimentazione è ottenuta attraverso la compressione dei gas in aspirazione.

Attualmente ci sono due tipi di compressori per uso automobilistico: il turbocompressore, che sfrutta l'energia dei gas di scarico; il compressore volumetrico, che sfrutta una parte della potenza erogata dal motore.

Il turbocompressore è il tipo più diffuso di sovralimentazione meccanica. E' essenzialmente composto da due chioccioline che racchiudono due giranti a palette, solidamente collegate tra loro tramite un alberino. La prima girante riceve il moto dai gas di scarico e lo trasmette alla seconda girante, la quale impartisce il moto alla colonna d'aria nel collettore d'aspirazione, comprimendola.

A garantire il tutto da eventuali, eccessivi, picchi di pressione c'è una valvola, detta waste-gate, che prevede all'eliminazione dei gas in eccesso.



Il principale nemico della sovralimentazione mediante turbocompressore è l'inerzia. Infatti, i gas di scarico prima di mettere in rotazione la girante devono vincere la l'inerzia di quest'ultima, che è in quiete.

Logicamente, quando la turbina non svolge la sua benefica azione "rinvigorente" (ad esempio, al disotto dei 2500/3000 rpm), il propulsore turbo funziona come un aspirato con ridotto rapporto di compressione. Questo è uno dei motivi per cui il turbocompressore è diventato di gran moda sui motori Diesel, i quali possono permettersi rapporti di compressione più alti rispetto ai benzina e, comunque, offrono più coppia ai bassi regimi.

Per ridurre l'inerzia, tallone d'Achille del turbocompressore, è necessario che, ad impartire il moto al compressore, non sia una sostanza comprimibile (come i gas di scarico) ma qualcosa che permetta di trasmettere il movimento con immediatezza. Di fronte a questo problema, i pionieri dell'automobilismo inventarono un compressore che riceveva il moto direttamente dal propulsore, tramite un collegamento con l'albero motore ottenuto con cinghia o catena. Tale meccanismo prese il nome di compressore volumetrico.

Grazie al rigido collegamento con il motore, il volumetrico entra in azione sin dai regimi più bassi, eliminando ovviamente il turbo-lag e permettendo un notevole incremento della potenza e dell'elasticità di marcia. Anche in questo caso, ci sono delle annotazioni da dover fare: infatti, mentre il turbocompressore non assorbe potenza, in quanto sfrutta l'energia dei gas di scarico (che andrebbe altrimenti dispersa) il volumetrico, per assolvere alle funzioni per cui è installato, sottrae una discreta quantità di potenza dal motore.

### *2.1.3 - La sovralimentazione chimica*

C'è un sistema per aumentare la quantità di ossigeno nella camera di combustione, evitando tutti i rimedi finora descritti.

Ovvero, "creando" il prezioso comburente all'interno della camera di combustione, tramite l'iniezione di protossido d'azoto ( $N_2O$ ). Quando viene immesso, attraverso opportuni diffusori, nel collettore d'aspirazione e, quindi, nella camera di combustione, a causa delle alte temperature le molecole di protossido di azoto reagiscono tra loro a coppie. Nella reazione ad alta temperatura gli atomi rompono i legami molecolari e dalle due molecole di protossido d'azoto nascono due molecole di azoto puro e una molecola di ossigeno puro.

Purtroppo il protossido di azoto attualmente è stivato in bombole da dieci chili l'una, sufficienti a un utilizzo continuativo per meno un quarto d'ora (su un motore di circa due litri di cilindrata). Quindi, pur tralasciando le voci relative ai costi del gas e alla (poca) funzionalità intrinseca del sistema, non è ancora possibile ottenere un motore permanentemente sovralimentato chimicamente e questo ha limitato l'utilizzo dell'iniezione supplementare di protossido al solo campo delle elaborazioni spinte e delle gare di accelerazione.

## CAPITOLO III

### 3.1 – Il turbocompressore

La storia del turbocompressore è la storia di un'invenzione vecchia quasi quanto il motore a combustione interna e l'automobile stessa. Nonostante oggi associamo tale dispositivo ai propulsori per autovettura, le prime applicazioni del turbocompressore (una turbina centripeta ed un compressore centrifugo accoppiati) ha riguardato i motori degli aeroplani, per poi trasferirsi sui motori delle locomotive e delle navi; il debutto sulle automobili è avvenuto, invece, solo dopo qualche decennio.

### 3.2 – Le origini

Il turbocompressore fu inventato dall'ingegnere svizzero Alfred J. Büchi che lavorava nel campo delle turbine a vapore.

Büchi, da buon tecnico, fu attratto e incuriosito dai neonati motori a combustione interna; pensò quindi di sfruttare la grande quantità di energia, altrimenti persa, contenuta nei loro gas di scarico. Detto, fatto, nel 1905 Büchi depositò il brevetto del primo concetto di turbocompressore azionato da gas di scarico, in cui turbina e compressore erano accoppiati meccanicamente.

Nel 1910 fu costruito il primo motore turbocompresso: si trattava di un due tempi della Murray-Willat, azienda costruttrice di motori per aeroplani, che aveva ben compreso le potenzialità dell'innovativa invenzione.

Infatti, i primi velivoli che cominciavano a solcare i cieli durante la Prima Guerra Mondiale, mossi da motori a combustione interna, subivano un notevole calo di potenza ad alta quota, a causa della riduzione della densità dell'aria aspirata, limitandone l'altitudine di volo.

Il turbocompressore compensava la rarefazione dell'aria e sembrava veramente fare al caso della nascente industria aeronautica.

Nel 1918 il Dott. Sanford Moss della General Electric applicò un turbocompressore ad un motore per velivoli, il «V12 Liberty», e lo testò nella località di Pikes Peak, in Colorado, all'altitudine di



14.000 piedi (circa 4.600 m.): a questa quota, i 354 CV sviluppati in condizioni di aspirazione libera, scendevano a soli 230 CV, ma con il turbo la potenza si impennava a 377 CV, dimostrando in maniera inconfutabile come esso potesse eliminare le perdite di potenza fino ad allora riscontrate a causa della riduzione di densità dell'aria.

La gestazione del primo motore Diesel turbocompresso fu più lunga: solo nel 1915 Büchi realizzò il primo prototipo, ma non si rivelò abbastanza efficiente da mantenere una adeguata pressione di sovralimentazione.

Nonostante qualche passo falso ed una certa diffidenza verso questa innovazione, la strada del turbo era spianata. In campo aeronautico era un susseguirsi di record di altitudine con i 33.113 piedi (circa 10.000 m) raggiunti già nel 1920, mentre è del 1925 la prima applicazione di successo su due navi tedesche di un motore Diesel sovralimentato capace di 2.000 CV.

Negli anni Trenta, turbocompressori con turbine assiali verranno utilizzati in marina, nei vagoni ferroviari e in molte applicazioni stazionarie.

Nel 1936 fu fondata da J.C. Garrett la Garrett Corporation, che negli anni a venire si sarebbe affermata come uno dei più grandi e importanti costruttori di turbocompressori.

### **3.3 – Gli sviluppi**

Le guerre portano distruzione, ma è innegabile come la corsa agli armamenti sia un forte traino allo sviluppo tecnologico.

Durante la Seconda Guerra Mondiale i veloci aerei a reazione soppiantarono quelli con motore a pistoni: l'avvento delle turbine a gas portò grandi sviluppi nella tecnologia dei materiali e nella progettazione, con positive ricadute anche nel campo dei turbocompressori.

Nuovi materiali, più resistenti alle alte temperature dei gas di scarico, e nuove tecniche di lavorazione permisero lo sviluppo di turbine radiali, più piccole e leggere di quelle assiali, che meglio si adattavano ai piccoli motori delle automobili.

Fu allora che il turbocompressore scese dal cielo per conquistare la terra. Una conquista che avrebbe prima coinvolto i grandi mezzi da trasporto, poi le automobili.

Come spesso accade nel mondo dell'automobile, le prime applicazioni di un nuovo dispositivo si hanno nelle competizioni. Nel 1952, la prima autovettura equipaggiata con un motore Diesel turbocompresso prodotto dalla Cummins fece la sua comparsa alla 500 Miglia di Indianapolis.

Sebbene abbia ormai più di un secolo, il turbocompressore è ancora oggi oggetto di importanti affinamenti. Gli interventi dei tecnici si concentrano soprattutto sulle palette di turbina e compressore, che rappresentano il cuore di questo dispositivo: un loro corretto disegno è fondamentale per un buon funzionamento del turbocompressore in un ampio campo di utilizzo. Se l'adozione di palette mobili per il compressore è una realtà consolidata da anni (comunemente si parla di «turbocompressore a geometria variabile»), molto più recente e complessa è l'introduzione di questa soluzione sul lato turbina. La criticità risiede nel fatto che le palette della turbina vengono investite dai gas di scarico ad alta temperatura (intorno ai 1000 °C): la prima Casa ad adottare una turbina a geometria variabile è stata Porsche con la «911 Turbo» del 2005, grazie all'adozione di materiali di derivazione aerospaziale.

### **3.4 - Perché il turbocompressore**

Il turbocompressore usa l'energia persa dal gas di scarico per azionare la ruota della turbina che è unita al compressore attraverso un asse. Ad altitudini elevate, l'ossigeno non è sufficiente per bruciare il carburante, il che si traduce in bassa potenza e fumo nero.

Ad elevate altitudini il turbocompressore ruota più velocemente per incrementare l'erogazione di aria al motore e per compensare. Perciò il turbocompressore mantiene la potenza dal motore e produce emissioni pulite.

Montare un turbocompressore ed un refrigeratore dell'aria aumenta ancora di più la potenza del motore.

Un Intercooler rimuove il calore della compressione tra le parti di un compressore mentre un aftercooler riduce la temperatura dell'aria che lascia il compressore.

Distribuire aria fresca significa avere più ossigeno per cilindro (l'aria fredda ha una densità più alta dell'aria calda) perciò più potenza del motore.

In conclusione, i benefici del turbocompressore sono:

- Un'accresciuta emissione della potenza del motore (all'incirca il 50% di aumento)
- Un migliore consumo del carburante (un migliore equilibrio della pressione nel motore)
- Emissioni più pulite
- Compensazione dell'altitudine

# CAPITOLO IV

## 4.1 – Effetto dell'altitudine sui motori

Al variare della quota, quindi, variano le condizioni di pressione, temperatura e densità dell'aria.

Come riferimento standard, esiste un'Atmosfera Tipo Internazionale che fornisce una legge di variazione delle proprietà dell'atmosfera con la quota  $z$ .

### 4.1.1 - Caratteristiche dell'atmosfera

L'atmosfera è una regione gassosa che circonda interamente la Terra. L'aria che la compone, per la porzione che interessa il volo (troposfera e stratosfera, si veda oltre) è una miscela di gas (78% N<sub>2</sub>, 21% O<sub>2</sub>, 1% Ar<sub>2</sub>, etc.) che si comporta con buona approssimazione secondo il modello teorico del gas perfetto. Tale modello implica che le grandezze di stato pressione  $p$ , densità  $\rho$  e temperatura  $\vartheta$  siano legate dalla legge

$$p = R \rho \vartheta$$

dove  $R = 287.05 \text{ m}^2/\text{K s}^2$ .

Mediante tale legge, è possibile, date due grandezze di stato qualsiasi scelte tra ( $p$ ;  $\rho$ ;  $\vartheta$ ), determinare la terza.

### 4.1.2 - Regioni dell'atmosfera

I parametri caratteristici dell'aria circostante un velivolo, come le grandezze di stato citate, la velocità del suono  $a$ , la viscosità  $\mu$  etc. dipendono in modo rilevante dalla quota geometrica  $h$ .

- Dall'osservazione sperimentale degli andamenti medi di tali grandezze con la quota si deduce una classificazione delle diverse porzioni dell'atmosfera: Troposfera: dal livello del suolo ad una quota variabile tra gli 8000m ai poli e i 17000m all'equatore; si tratta di una zona caratterizzata da una progressiva diminuzione della temperatura;

- Stratosfera: dalla tropopausa (il confine superiore della troposfera) ad una quota di circa 20000 m; si tratta di una zona caratterizzata da una temperatura pressoché costante;
- Mesosfera: dalla stratopausa (il confine superiore della stratosfera) ad una quota di circa 90000 m; si tratta di una zona caratterizzata da una temperatura crescente fino alla quota di 50000m e poi decrescente fino a toccare la temperatura minima che si registri nell'atmosfera terrestre;
- Termosfera: dalla mesopausa (il confine superiore della mesosfera) verso lo spazio esterno; si tratta di una zona caratterizzata da una temperatura crescente il cui valore, anche superiore a 200°C, dipende fortemente dall'attività solare.

#### 4.1.3 - Unità di misura

L'unità di misura della pressione, nel Sistema Internazionale, è il pascal (Pa), pari a un newton per metro quadrato.

Tra le varie unità tecniche in uso nella pratica aeronautica vanno citate il millibar (mb), l'atmosfera (atm), il millimetro di mercurio (mm<sub>Hg</sub>) ed il pollice di mercurio (in<sub>Hg</sub>).

Per quanto riguarda la densità, l'unità di misura nel SI è il kilogrammo per metro cubo (kg/m<sup>3</sup>), mentre nella pratica aeronautica si può incontrare il grammo per centimetro cubo (g/cm<sup>3</sup>), la libbra per piede cubico (lb/ft<sup>3</sup>).

Per la temperatura, l'unità di misura nel SI è il kelvin (K). Tra le unità in uso nella pratica aeronautica si trovano il grado centigrado (°C) e il grado Fahrenheit.

#### 4.1.4 - Atmosfera standard internazionale (ISA)

In generale, l'atmosfera terrestre è caratterizzata da parametri (temperatura, pressione, densità, viscosità, umidità, etc.) dipendenti dal tempo e dalla posizione. Data l'importanza di questi parametri per la dinamica dei velivoli, è necessario adottare un modello per l'atmosfera che permetta di confrontare dati e calcoli in modo univoco.

L'Atmosfera Standard Internazionale (International Standard Atmosphere, o ISA), è un modello matematico dell'atmosfera

stabilito per convenzione dall'ICAO (International Civil Aviation Organization) nel 1964 e adottato in tutto il mondo per lo studio dei fenomeni di interesse aeronautico.

Nell'ISA, l'aria è considerata un gas perfetto, privo di umidità, di composizione chimica costante. Si assume che l'atmosfera sia composta da una troposfera che si estende dall'altezza del livello del mare medio, ossia dalla quota  $h_0 = 0$  m, alla quota  $h_S = 11000$  m; da una stratosfera che si estende dall'altezza  $h_S$  della tropopausa alla quota  $h_M = 20000$  m; da una atmosfera esterna (di interesse soltanto per il volo extra-atmosferico).

Inoltre, si assume una variazione ben precisa del gradiente di temperatura  $\lambda$ , definito da

$$\lambda := d\theta/dh$$

in ognuna delle porzioni di interesse:

- nella troposfera il gradiente di temperatura ha un valore costante pari a

$$\lambda_{ISA} = -0.0065 \text{ K/m};$$

- nella stratosfera è nullo.

Nella tabella seguente sono riportati i valori di temperatura, densità e pressione dell'aria relativamente alle varie quote:

quota (m)	Temperatura (K)	Densità (kg / m <sup>3</sup> )	Pressione (Pa)
0	288.16	1.2250	101325
500	284.91	1.1672	95461
1000	281.66	1.1116	89875
1500	278.41	1.0580	84556
2000	275.16	1.0065	79495
2500	271.91	0.9568	74683
3000	268.66	0.9091	70109
3500	265.41	0.8632	65764
4000	262.16	0.8191	61640
4500	258.91	0.7768	57728
5000	255.66	0.7361	54020
5500	252.41	0.6971	50507
6000	249.16	0.6597	47181
6500	245.91	0.6238	44035
7000	242.66	0.5895	41061
7500	239.41	0.5566	38252
8000	236.16	0.5252	35600
8500	232.91	0.4951	33099
9000	229.66	0.4663	30743
9500	226.41	0.4389	28524
10000	223.16	0.4127	26437
10500	219.91	0.3877	24475
11000	216.66	0.3639	22632

## 4.2 - Motore semplice in quota

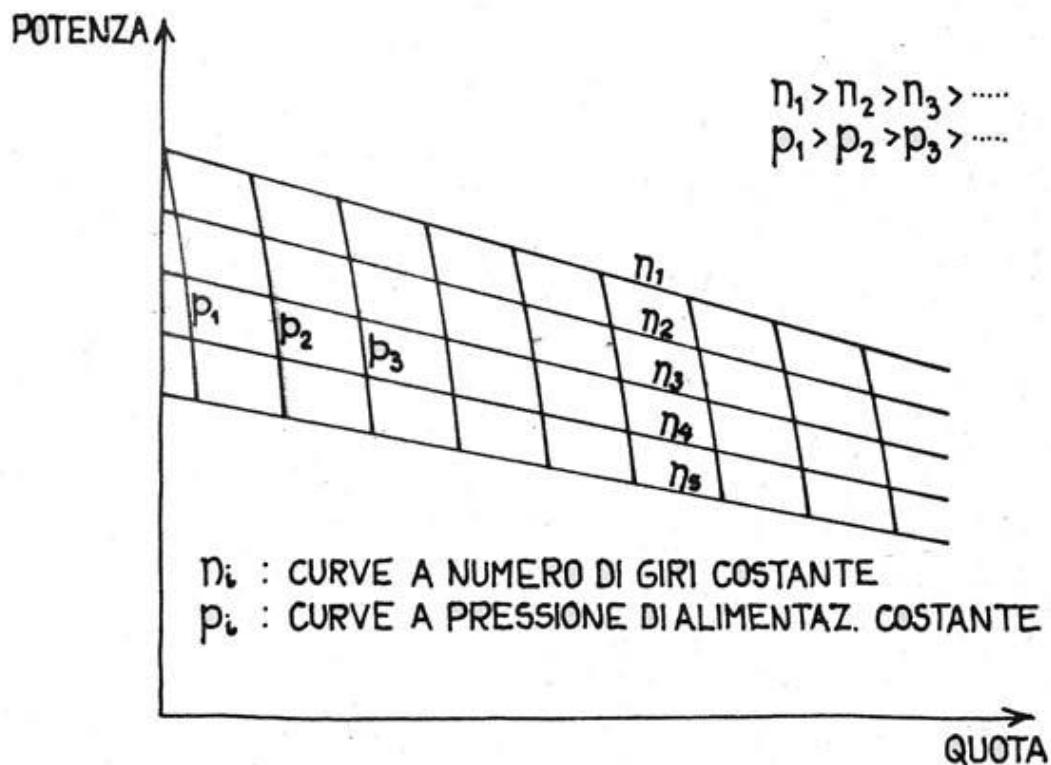
Viene definito motore semplice quello che non è provvisto di mezzi per contrastare la diminuzione di potenza dovuta all'aumento della quota.

Le variazioni di quota si ripercuotono sulle prestazioni e in particolare sulle pressioni medie e sulle potenze.

Per studiare questi effetti si fa riferimento alle grandezze indicate, cioè alla pressione media indicata  $p_{mi}$  ed alla potenza indicata  $P_{ind}$ , definite come:

$$p_{mi} = p_{me} / \eta_0 \quad P_{ind} = P_r / \eta_0$$

Ad ogni modo le curve che esprimono convenzionalmente le prestazioni di un motore semplice al variare della quota sono le *curve di potenza in quota*, che danno la potenza in funzione della quota, al variare del numero di giri, in condizioni di piena ammissione.





### 4.3 - Rimedi alla diminuzione di potenza con la quota

Per fronteggiare la perdita di potenza con la quota, sono stati progettati i *motori adattati*, cioè motori che funzionano in condizioni di progetto quando sono ad una certa quota  $z_a$  che viene detta *quota di adattamento* o di *ristabilimento*.

In questi motori, la pressione di alimentazione massima viene raggiunta alla quota di adattamento, ricorrendo a diverse soluzioni tecniche.

a) Motori alleggeriti

Sono basati sul fatto che all'aumentare della quota diminuiscono le sollecitazioni sul motore e quindi si progetta il motore stesso per resistere alle sollecitazioni della quota di adattamento. A quote inferiori il motore va parzializzato, limitando la pressione di alimentazione con valvole di strozzatura, altrimenti la pressione massima nel cilindro raggiungerebbe valori non tollerabili dalle strutture. Nonostante questa tecnica, non si riesce a conservare il rapporto *peso/potenza*, che va aumentando al crescere di  $z$ .

b) Motori sovralesati

In cui si aumenta la cilindrata tramite l'aumento dell'alesaggio e si parzializza a quote inferiori a quella di progetto.

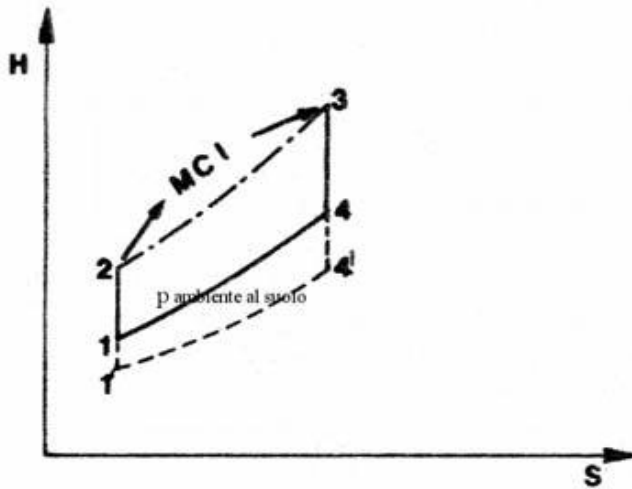
c) Motori surcompressi

In cui si modifica  $r$  per riottenere la potenza che si aveva a terra. Ovviamente questo non si può fare con continuità, però stabilito il nuovo  $r$  si può parzializzare l'aspirazione come per i motori alleggeriti.

d) Motori sovralimentati

I motori sovralimentati sono forniti invece di un compressore nel circuito di alimentazione. L'aria, prima di entrare nel cilindro, passa attraverso un compressore (quasi sempre centrifugo) che può essere calettato all'albero motore oppure mosso autonomamente da una turbina a gas di scarico: nel primo caso si parla di motore sovralimentato meccanicamente (*supercharger*), nel secondo di motore con turbocompressore (*turbocharger*).

Nella sovralimentazione con turbina a gas di scarico, il gruppo di sovralimentazione è meccanicamente indipendente dal motore, quindi non assorbe potenza.



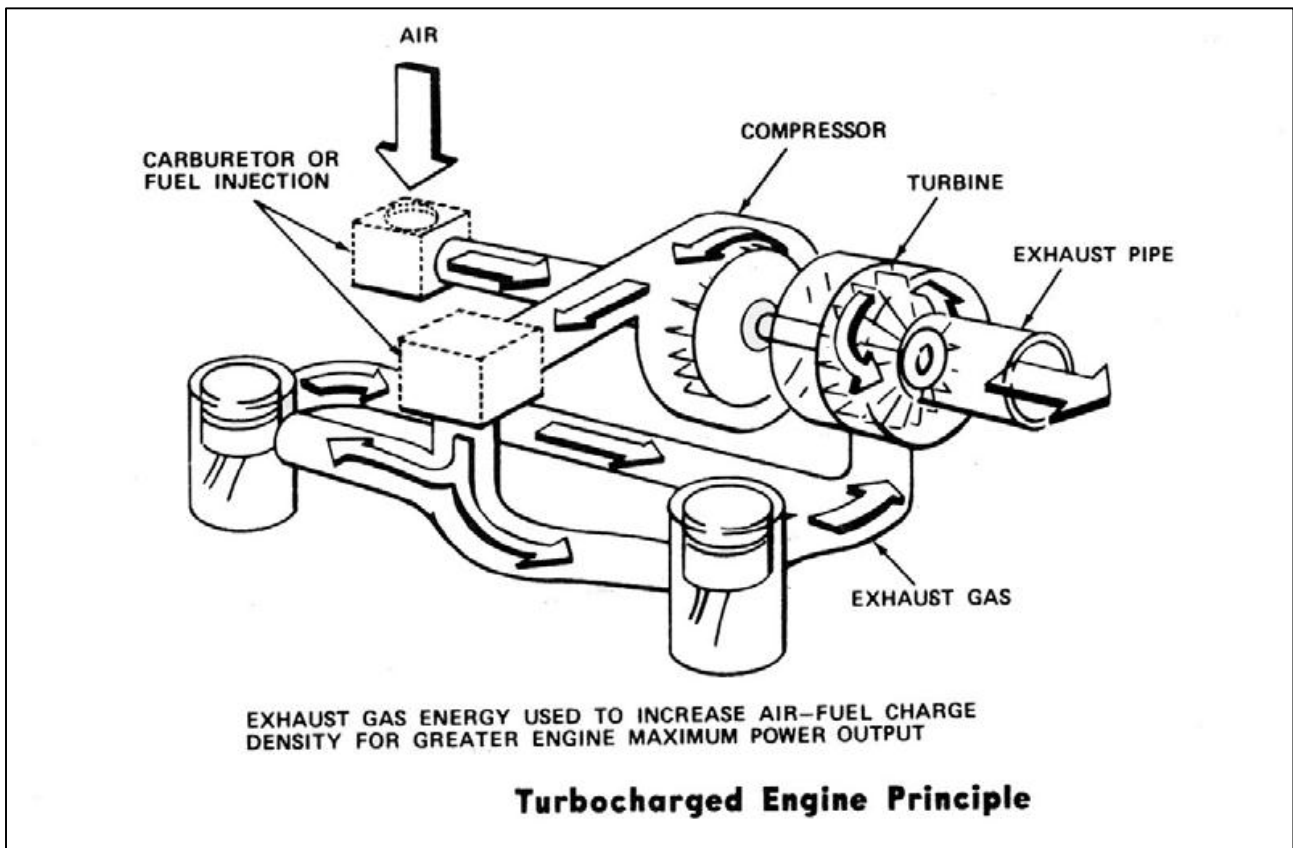
Esso si autosostenta, in quanto il salto entalpico di espansione è maggiore del salto entalpico di compressione. Inoltre praticamente si autoregola,

perché all'aumento della quota di volo corrisponde una diminuzione della pressione ambiente che, a parità di pressione di alimentazione, comporta un aumento del lavoro di compressione, compensato però dal lavoro prodotto dalla turbina.

In pratica, ogni quota di volo può essere vista come una quota di ristabilimento.

Anzi, all'aumentare della quota, il motore migliora, seppur di poco, le sue prestazioni perché:

- Diminuisce la temperatura dell'aria;
- Aumenta il coefficiente  $\beta$  del gruppo T-C (con  $\beta$  definito come la variazione di volume che avviene durante la combustione:  $\beta = V_3/V_2 = T_3/T_2$ );
- Migliora il rendimento del gruppo T-C;



Come già accennato, in questo caso il compressore è mosso da una turbina installata allo scarico del motore.

Il vantaggio è che questo dispositivo non sottrae potenza al motore e viene utilizzata solo energia contenuta nei gas di scarico.

In realtà anche in questo caso si ha una perdita di potenza, dovuta alla leggera contropressione allo scarico causata dalla presenza della turbina.

Il salto di pressione a disposizione della turbina generalmente non è molto alto ed a causa di ciò le velocità di rotazione sono molto alte (anche superiori ai 100000 giri/min).

Queste velocità e le elevate temperature richiedono materiali speciali e possono causare problemi di affidabilità.

Spesso a valle del compressore viene installato uno scambiatore di calore per abbassare la temperatura dell'aria compressa.

Poiché il gruppo T-C è autonomo, il lavoro massiccio estratto dalla turbina, deve equilibrare il lavoro richiesto dal compressore (alla quota di adattamento):

$$L_c = L_t = c_p(T_{in} - T_{out})\eta_t = c_p\eta_t \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

dove:

- $\eta_t$ : rendimento adiabatico della turbina
- $T_{in}$ : temperatura di ingresso in turbina alla quota  $z_a$
- $p_a$ : pressione ambiente alla quota  $z_a$
- $p_s$ : pressione di ingresso in turbina alla quota  $z_a$  (si ricava dal bilancio T-C).

## **CAPITOLO V**

### **5.1 – Obiettivo dello studio**

La stesura di questo elaborato si pone come obiettivo principale quello di offrire uno studio preliminare sulla possibilità di installazione di un gruppo motore turbocompressore all'interno di un motore automobilistico Diesel per poter essere utilizzato al meglio su un aereo ultraleggero.

L'esigenza è scaturita dal fatto che i motori a combustione interna a ciclo Diesel (o anche Otto), destinati ad essere applicati in velivoli perlopiù leggeri, nel volo ad alta quota presentano delle grosse limitazioni dovute alla rarefazione dell'aria.

Per garantire una certa costanza delle prestazioni erogate dal motore, in qualsiasi condizione di pressione e densità dell'aria, si ricorre come già detto in precedenza alla sovralimentazione.

Per la precisione, il motore in questione è il FIAT 1300 jtd.

### **5.2 – Caratteristiche del motore utilizzato**

Le caratteristiche tecniche sono: cilindrata pari a 1248 cm<sup>3</sup>, frazionata in 4 cilindri in linea con un alesaggio di 69,6 mm e una corsa di 82 mm.

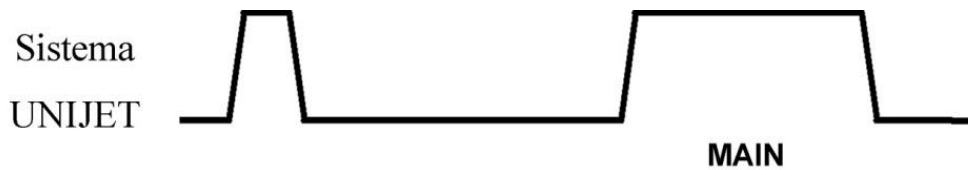
Le valvole sono quattro per cilindro e sono azionate direttamente da un doppio albero a camme in testa.

Il rapporto di compressione è di 18:1, la potenza massima è di 70 CV e la coppia erogata di 170 Nm.

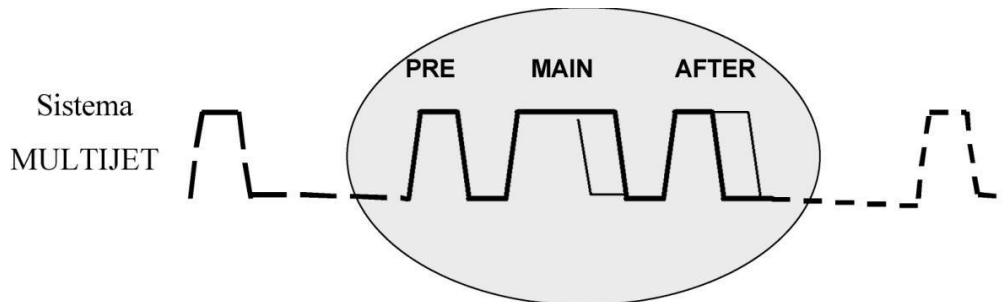
Le dimensioni sono abbastanza ridotte, rispettivamente 460 mm di lunghezza, 500 mm di larghezza e 650 mm di altezza.

Il basamento è in ghisa con sottobasamento in alluminio, testata in alluminio e albero motore e bielle in acciaio.

Il sistema è noto con il nome di Multijet e ha la caratteristica di compiere più iniezioni per ciclo oltre alle due canoniche di un Common Rail (iniezione pilota seguita da iniezione effettiva)



controllate e tarate di volta in volta dalla centralina del motore.



Con questo sistema, le diverse iniezioni che il sistema Common Rail consente di attuare, sono le seguenti:

- iniezione pilota: effettuata con elevato anticipo rispetto all'iniezione principale. Permette di ridurre drasticamente il rumore di combustione;
- pre-iniezione: effettuata con bassissimi valori di anticipo rispetto all'iniezione principale, permette, insieme all'iniezione "after", di modulare l'andamento della combustione, contenendo le emissioni di inquinanti;
- iniezione main: iniezione principale;
- iniezione after: con questo termine si indica un'iniezione effettuata subito dopo l'iniezione principale, con analoghe finalità a quelle della pre-iniezione;
- post-iniezione: ulteriore iniezione, effettuata nelle ultime fasi della combustione, con lo scopo di aumentare le temperature di scarico, permettendo, periodicamente, la rigenerazione della trappola per il particolato. La post-iniezione può inoltre creare un ambiente riducente, necessario per la rigenerazione del catalizzatore DeNOx, per l'abbattimento degli ossidi di azoto.

Questo sistema ha permesso di raggiungere discreti livelli di potenza nell'uso automobilistico abbattendo i consumi.

La riduzione dei consumi è uno dei tanti elementi che hanno portato alla decisione di tentare questa installazione, poiché meno carburante imbarcato implica meno peso.

Dimensioni e peso contenuti, spazi d'ingombro e consumo di carburante limitati e grande affidabilità meccanica fanno sì che questo motore sia particolarmente adatto ad essere montato su velivoli ultraleggeri.

### **5.3 - Ottimizzazione**

Tale motore, nella versione “automobilistica” è già dotato di un gruppo turbocompressore.

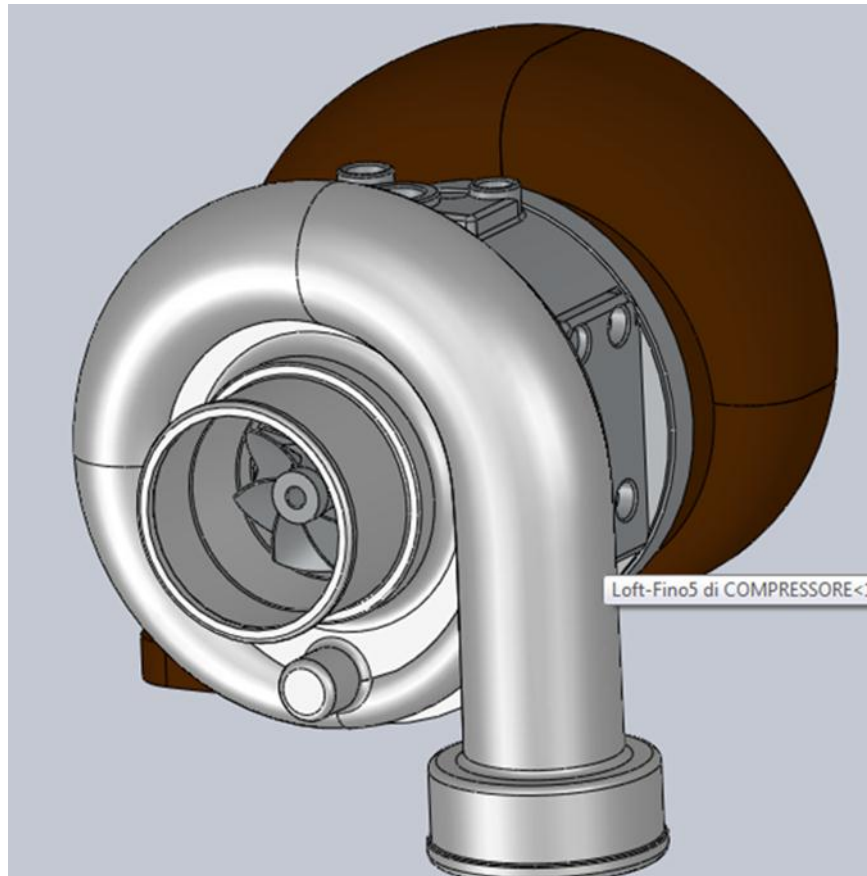
Quest'ultimo verrà affiancato dal gruppo turbogeneratore (di dimensioni maggiori) in modo tale da assicurare una portata d'aria sufficiente al buon funzionamento del motore anche a quote elevate, ovvero quando la turbina più piccola non garantisce la portata necessaria al sostentamento del motore.

Il materiale su cui si basa questo studio è frutto di altri due elaborati finali, indipendenti tra loro.

Uno di essi riguarda uno studio sulle possibilità di installazione di un motore automobilistico a ciclo Diesel opportunamente modificato su un aereo ultraleggero.

L'altro, invece, relativo ad una installazione di un turbogeneratore con camera di combustione alimentata a gasolio, basato su un turbocompressore a geometria variabile; utilizzato in campo aeronautico.

Come punto di partenza per la costruzione del turbogeneratore è stato scelto un turbocompressore di grosse dimensioni solitamente utilizzato nei veicoli nel campo dell'autotrazione pesante.



Dal turbocompressore (a geometria variabile) mediante alcune prove sono stati ricavati i seguenti dati:

<b>Modello</b>	<b>HolsetHY55V</b>
Massa:	21 kg
$P_1$	93000 Pa

\* $P_1$ = pressione aria entrante nel compressore



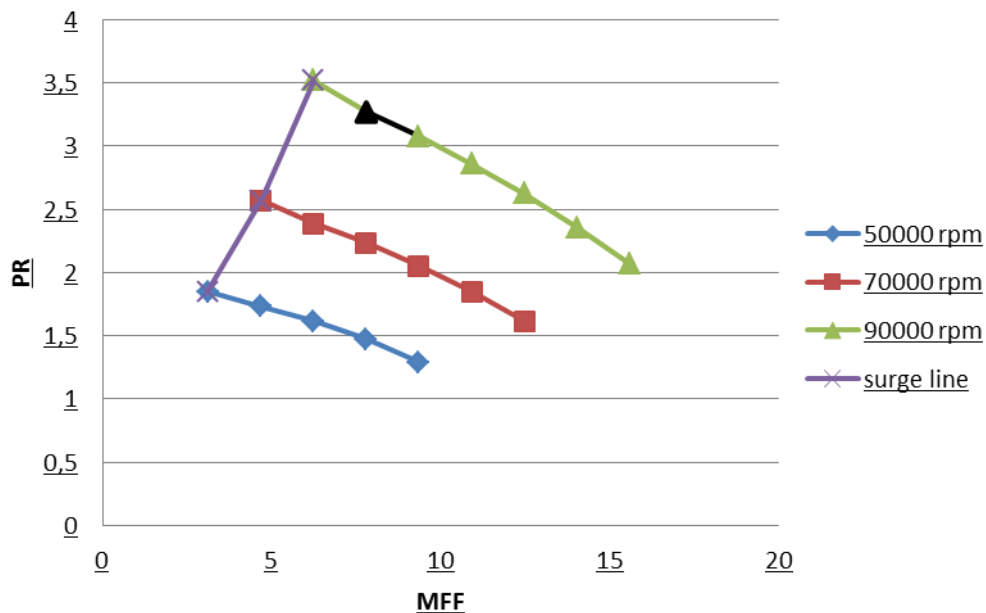
-Nel punto di massimo rendimento:

Portata massica	0,5574 kg/s
$P_2$	276000 Pa

-Nel punto di massima portata massica:

Portata massica	0,8575 kg/s
$P_2$	192000 Pa

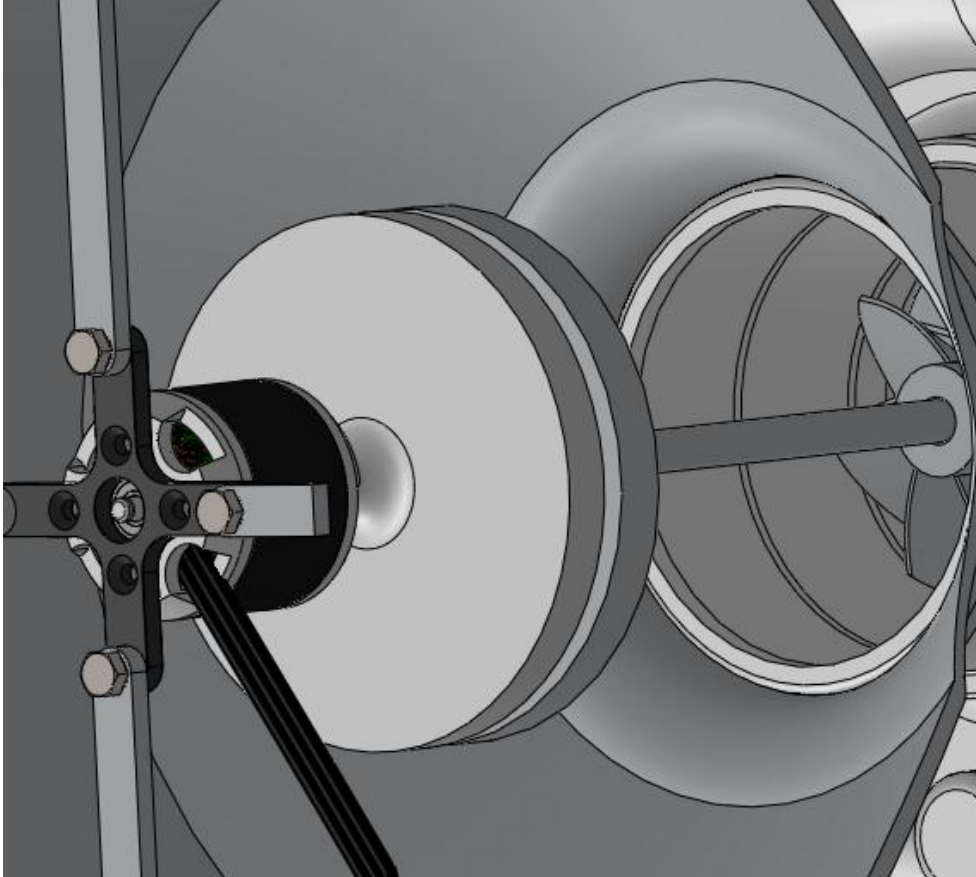
\*  $P_2$  = pressione aria uscente dal compressore



Una caratteristica peculiare di questo progetto è quella di avere una macchina elettrica posizionata lungo l'albero che collega compressore e turbina in modo tale da poter essere utilizzato come motore all'avviamento di tale sistema e, una volta in moto, di essere utilizzato successivamente come generatore.

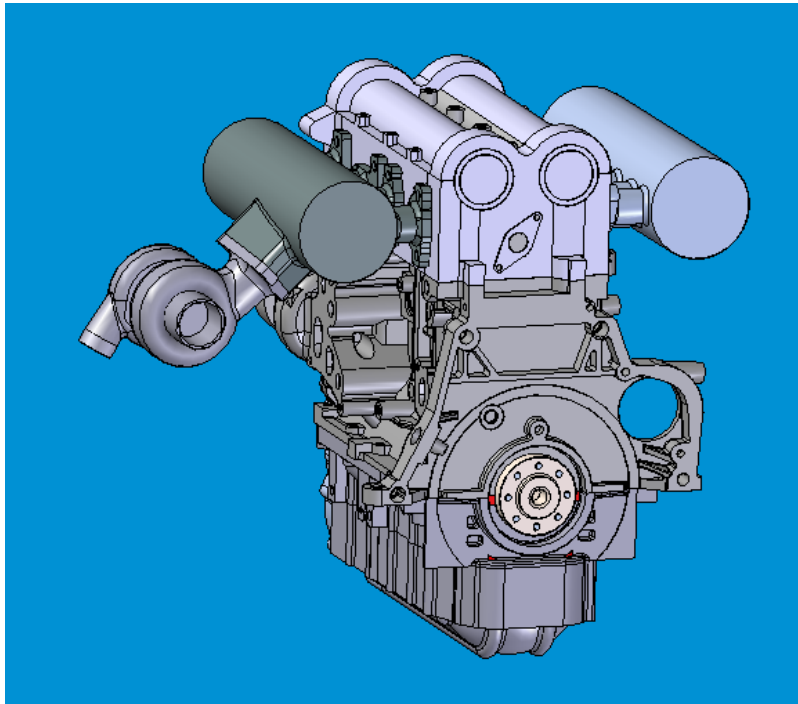
Per generare elettricità dal gruppo turbogas è stato utilizzato un giunto magnetico che permette di trasferire la coppia dall'albero del turbocompressore al motore elettrico asincrono trifase.

Come si evince chiaramente dalla seguente rappresentazione 3D del componente:

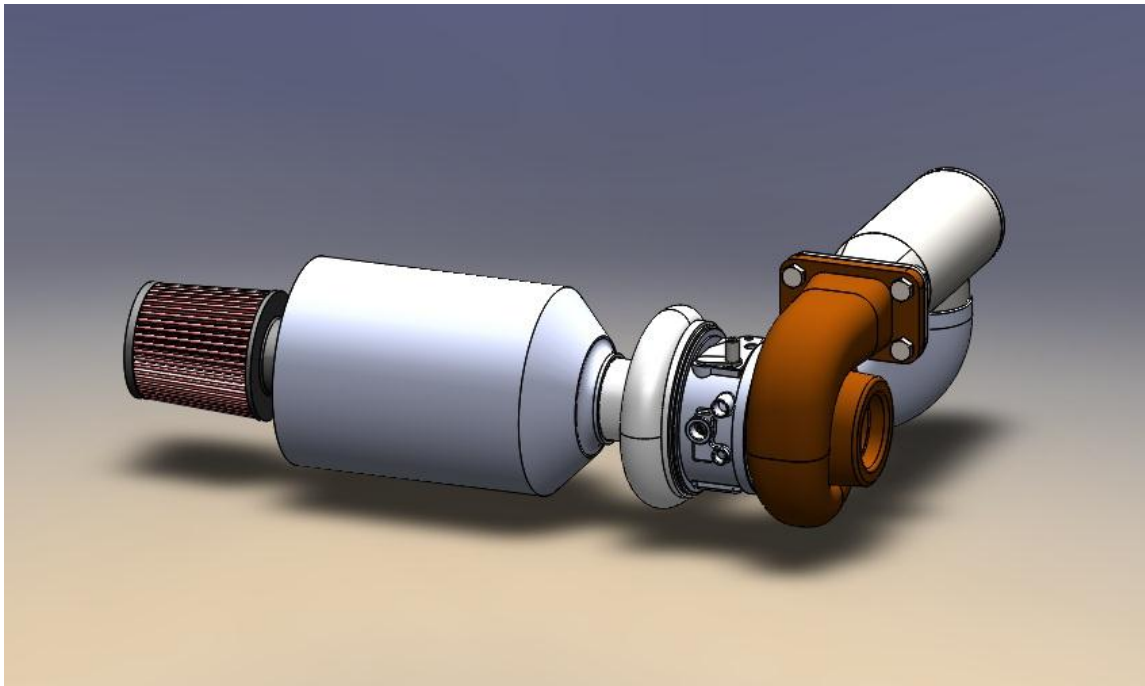


*1 Particolare del motore asincrono, del relativo supporto e del giunto magnetico.*

Di seguito si riporta l'assemblaggio d'insieme del motore in esame ovvero il 1300 multijet con turbocompressore:



L'idea è appunto quello di affiancare a tale motore il gruppo turbogas in modo tale da avere due sistemi che lavorino in parallelo.



*1 Gruppo turbogas completo*

In linea di massima il gruppo turbogas entrerebbe in funzione, in ausilio del motore stesso, solo quando l'aria diventerebbe troppo rarefatta e di conseguenza insufficiente per una corretta combustione, ovvero quando il velivolo si trova a quote elevate.

Ovviamente l'aggiunta di tale unità in più comporta un aumento del peso complessivo che il velivolo dovrà sopportare.

Questo significa una distanza per il decollo maggiore (a parità di potenza erogata dal motore), maggiori consumi in fase di decollo e di crociera e un calo generale delle prestazioni dell'intero velivolo.

Per ovviare a tale inconveniente si è pensato di sfruttare al meglio i sistemi già a disposizione: il gruppo turbogas che, ad esempio, nelle operazioni di decollo non è in funzione, potrebbe essere utilizzato come generatore ausiliario fornendo una potenza elettrica da sommare a quella relativa al motore, molto utile durante il decollo stesso in quanto è la fase nella quale si richiede la massima potenza disponibile.

Una volta che il velivolo si trova in quota sarà la centralina elettronica, opportunamente rimappata, a dover gestire quale gruppo far lavorare in relazione alle varie informazioni ricevute e dalle condizioni in cui si trova il motore (pressione e temperatura dell'aria esterna, numero di giri del motore..)

La centralina elettronica sarà suddivisa in due unità:

- EPU – Electronic Power Unit;
- ECU - Electronic Control Unit.

L'unità di potenza (EPU) è adibita al solo comando degli iniettori. In essa sono contenuti i circuiti di potenza necessari per produrre l'eccitazione dei solenoidi e realizzare il controllo degli iniettori piezoelettrici.

All'unità logica (ECU) è affidato invece il controllo elettronico dell'intero sistema; essa provvede all'elaborazione dei dati e al controllo della EPU.

Gestisce inoltre i comandi in PWM (Pulse With Modulation) per il regolatore di pressione, per l'attuatore dell'EGR e per l'attuatore della turbina del gruppo di sovralimentazione.

Si è tenuto conto, inoltre, della diversa destinazione d'uso del motore: le esigenze in campo aeronautico sono ben diverse da quelle in campo automobilistico.

Il problema del turbolag, ovvero il ritardo di risposta del motore agli input, è molto sentito in campo automobilistico; infatti, durante la marcia, varia in modo quasi continuo la richiesta di potenza.

È per questo che un turbocompressore installato sul motore di un'autovettura non deve essere troppo grande: si adottano infatti modelli relativamente piccoli, che ovviamente hanno una massa e quindi un'inerzia ridotta, al fine di fornire spinta sin dai regimi più bassi.

Nell'uso aeronautico il problema del turbolag non sussiste, perché la marcia di un velivolo è molto più lineare rispetto a quella di un'auto.

## CAPITOLO VI

### 6.1 – Conclusioni

Lo studio svolto in tale ambito ha portato alla stesura di questo elaborato e ha avuto come obiettivo quello di analizzare approfonditamente tutti i dispositivi necessari.

Si è proposta una soluzione per adattarli il tutto in base alle specifiche richieste.

Chiaramente non sono state trattate tutte le problematiche inerenti alla progettazione di un sistema così complesso.

Tale sistema di propulsione, “ibrido”, risulta essere comunque una valida alternativa rispetto ai motori aeronautici medi destinati a velivoli ultraleggeri.

E' evidente che considerando i costi, i consumi e l'affidabilità di un motore automobilistico prodotto in larga serie, l'installazione risulta ampiamente realizzabile e può avere un buon ritorno economico dovuto anche all'utilizzo, nell'installazione, di componenti reperibili in commercio a prezzi ragionevoli, mentre i pezzi non reperibili sono stati modellati con geometrie molto semplici, perciò non sono complessi (e costosi) da realizzare.

### 6.2 – Sviluppi futuri

Nell'immediato, una possibile operazione da attuare, per rendere anche più concreta l'idea, sarebbe quella di analizzare nello specifico le curve di potenza richieste dal motore e quelle fornite dal gruppo turbocompressore in modo tale da individuare un funzionamento ottimale in ogni condizione di utilizzo applicando un'ulteriore modifica di uno o più componenti del sistema.

Andranno svolti calcoli accurati per i dimensionamenti veri e propri e studiati con attenzione anche i materiali da impiegarsi, che devono essere tali da sopportare gli sforzi in esercizio per lunghi periodi, al fine di prolungare gli intervalli previsti per la regolare manutenzione.

## BIBLIOGRAFIA

- Manfè G., Pozza R., Scarato G., *“Disegno meccanico, vol. I-II-III”*, Milano, Principato Editore, 1992;
- Giacosa D., *“Motori Endotermici”*, Milano, Hoepli, 2000;
- Minelli G., *“Motori Endotermici Alternativi”*, Bologna, Pitagora, 1998;
- Loiacono Salvatore, *“La sovralimentazione”*, [www.omniauto.it](http://www.omniauto.it);
- Catalogo “Garrett”, [www.TurboByGarrett.com](http://www.TurboByGarrett.com).