

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

-SEDE DI FORLÌ-

CORSO DI LAUREA IN

INGEGNERIA MECCANICA

***IL FUTURO DEL MOTORE DIESEL NELL'ERA DELLE NORMATIVE
AMBIENTALI: LIMITI, ADATTAMENTI E NUOVE PROSPETTIVE***

Elaborato finale di laurea

In: Macchine

Candidato:

Toni Davide

Relatore:

Prof. Enrico Corti

Sessione Luglio 2026

Anno Accademico 2025/2026

Sommario

Introduzione.....	pag. 4
1. Classificazione macchine.....	pag. 5
1.1 Architettura MCI e sua classificazione generale.....	pag. 6
1.2 Parametri e grandezze principali MCI.....	pag. 12
2. Sovralimentazione nei motori Diesel.....	pag. 15
2.1 Tipologie di turbo sovralimentazione.....	pag. 18
2.1.1 Raffreddamento della carica.....	pag. 19
2.1.2 Legame sovralimentazione-sovraccarichi e inquinanti.....	pag. 20
2.1.3 Risposta al transitorio di un motore sovralimentato.....	pag. 21
2.1.4 Accorgimenti sul turbocompressore.....	pag. 24
2.2 Altre tipologie di sovralimentazione.....	pag. 25
3. Inquinanti nel motore Diesel.....	pag. 28
3.1 Sistemi di abbattimento degli inquinanti nei gas di scarico.....	pag. 30
4. Iniezione del motore Diesel.....	pag. 34
4.1 Sistema iniettore pompa.....	pag. 35
4.2 Sistema Common Rail.....	pag. 37
5. Combustione nel motore Diesel.....	pag. 40
6. Moti dell'aria all'interno dei cilindri.....	pag. 43
7. Motore Diesel a due tempi.....	pag. 46
8. Evoluzione motore Diesel: motore a precamera, iniezione indiretta, Common-Rail.....	pag. 47
9. Diesel negli ultimi anni: normative.....	pag. 49
10. Futuro motore Diesel: Combustibili naturali.....	pag. 51
11. Futuro motore Diesel: Gasolio-elettrico.....	pag. 53
12. Il motore Diesel tra declino automobilistico e indispensabilità industriale.....	pag. 55
13. Conclusioni.....	pag. 57
Indice delle immagini	pag. 58

Bibliografia e sitografia.....	pag. 60
Ringraziamenti.....	pag. 62

Introduzione

Il presente elaborato è volto all'analisi e all'evoluzione del motore Diesel.

Ormai è noto che con le sempre più stringenti normative anti-inquinamento promulgate dalle amministrazioni locali e dai governi nazionali ed europei, il motore a combustione interna, quindi anche il motore ad accensione spontanea, è stato progressivamente accantonato nel corso degli ultimi anni, prediligendo alimentazioni ad emissioni zero, come la trazione elettrica.

Rimane ora da domandarsi se il motore Diesel, dopo poco più di 130 anni dalla sua invenzione, debba essere abbandonato completamente e soppiantato dalle più recenti motorizzazioni.

Il fine primario della presente tesi, è proprio quello di analizzare i settori dove questo tipo di motore è, al giorno d'oggi, ampiamente utilizzato e difficilmente potrà essere rimpiazzato da altre motorizzazioni vista la robustezza, l'affidabilità che possiede, l'efficienza superiore al motore benzina e la sua capacità di elargire elevate coppie a bassi regimi.

Queste caratteristiche rendono tale motore insostituibile in molti campi; primo fra tutti quello del trasporto di persone e merci (autobus, camion ecc.), poi il settore agrario (trattori), quello relativo al movimento terra (ruspe, escavatori, pale, rulli ecc.), l'ambito navale e molti altri ancora.

Prima però di vedere dettagliatamente questi settori e l'indispensabilità che il motore Diesel vanta, dovremmo porre lo sguardo sulla struttura di un motore a combustione interna, sulla differenza tra ciclo Otto e quello Diesel e sui principali aspetti di quest'ultimo motore: la sovralimentazione, la gestione della combustione e dell'iniezione di carburante, i moti della carica all'interno della camera, inoltre si analizzeranno i principali inquinanti e climalteranti che detto motore emana e le soluzioni sempre più accurate ed efficienti che si sono sviluppate nel corso degli ultimi decenni per abbattere le emissioni e ridurre l'impatto ambientale.

Dopodiché vedremo l'evoluzione del motore Diesel, le varie tecnologie che si sono sviluppate per renderlo sempre più efficiente: ad iniziare dalla combustione a pre-camera, per passare all'iniezione indiretta e giungere, infine, al sistema Common-Rail, sistema adottato da praticamente tutti i produttori, che consente di avere una combustione più efficace con meno consumi e minor emissione di inquinanti.

Inoltre, si parlerà anche dei combustibili naturali con cui si può alimentare il motore Diesel per ridurre ulteriormente i nocivi e delle motorizzazioni ibride (gasolio-elettrico).

In conclusione, si mostrerà che per altri anni, questo tipo di motore rimarrà presente in parecchi settori grazie alla sua scarsa intercambiabilità, infatti anche laddove il motore Diesel è stato sostituito da motorizzazioni elettriche, sono sorti problemi relativi agli alti costi di manutenzione, di sostituzione delle batterie di ricarica, di limitata autonomia e molti altri ancora.

1. Classificazione macchine

In meccanica, le macchine si classificano secondo diverse modalità:

- macchine motrici: macchine in cui il fluido compie lavoro sulla macchina, tale lavoro, detto motore, si considera, per convenzione, positivo. Le macchine motrici trasformano l'energia del fluido in energia meccanica. Esempi di tale tipologia di macchine sono i motori a combustione interna e le turbine;
- macchine operatrici: macchine che compiono lavoro sul fluido, tale lavoro, detto operatore, si considera, per convenzione, negativo. Le macchine operatrici trasferiscono l'energia meccanica disponibile all'albero al fluido, incrementando l'energia sia essa potenziale, cinetica, di pressione. I principali esempi di macchine operatrici sono le pompe e i compressori.

Altro modo di classificazione:

- macchine volumetriche: sono caratterizzate da camere a volume variabile e da una interazione pressoché statica tra fluido ed elemento mobile (rotore), appartengono a tale categoria i motori a combustione interna, i compressori e le pompe volumetriche;
- macchine dinamiche (turbomacchine): il moto della macchina è di tipo stazionario rotatorio e lo scambio energetico tra fluido ed elementi mobili avviene per variazione della quantità di moto e/o dell'energia cinetica del fluido. Turbine idrauliche, a vapore e a gas, pompe centrifughe, compressori assiali sono tutti esempi di turbomacchine [1].

Nella presente ci occuperemo di Motori a Combustione Interna (MCI), essi sono macchine motrici e volumetriche; infatti effettuano la conversione dell'energia termica in energia meccanica (lavoro), disponibile all'albero motore, descrivendo un ciclo termodinamico chiuso in un volume variabile nel tempo in modo periodico.

1.1 Architettura MCI e sua classificazione generale

Per descrivere la struttura e i principali organi di un motore a combustione interna, ci serviamo di un esploso dello stesso (Fig.1.1):

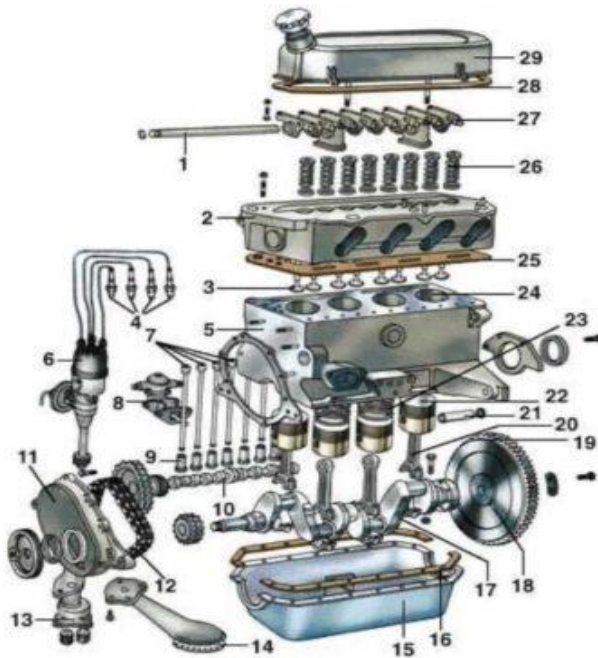


Fig.1.1 Esploso motore termico [2]

L'elemento fondamentale è il blocco motore (basamento) (5), in esso sono ricavati i cilindri (24), all'interno dei quali scorrono i pistoni (stantuffi) (22) di moto rettilineo alternato tra il Punto Morto Superiore(PMS) e il Punto Morto Inferiore (PMI), rispettivamente la posizione in cui il volume occupato dai gas è minimo e massimo; inoltre per realizzare una tenuta ermetica della camera di combustione, i pistoni presentano anelli di tenuta e un raschiaolio, esso assolve il compito di portare l'olio nello spinotto e garantirne una corretta lubrificazione.

Al di sopra del basamento, si ha la testata (2), essa oltre a chiudere superiormente i cilindri, presenta opportune cave dove sono alloggiati le valvole di aspirazione e di scarico (26), le molle che garantiscono la chiusura delle valvole e i bilancieri (27), essi collegati tramite opportune aste (7) all'albero a camme (10), assicurano l'apertura delle valvole.

Bisogna sottolineare che talune volte l'albero a camme è disposto nella testata superiore, in tale caso, grazie alla sua geometria, apre le valvole, senza necessità di aste e bilancieri. L'albero a camme è portato in movimento grazie ad una cinghia o catena (12) collegata all'albero motore; per permettere a ciascuna valvola di aprirsi una volta per ciclo, è necessario che l'albero a camme abbia una velocità dimezzata rispetto all'albero principale.

I pistoni sono collegati tramite lo spinotto (21) alla biella (20), essa a sua volta è collegata all'albero motore (collo d'oca) (17), questi ultimi due elementi, trasformano il moto rettilineo, proprio del pistone, in moto rotatorio continuo.

Nella parte inferiore si ha la coppa dell'olio (15), un contenitore sagomato opportunamente, dove si deposita l'olio di lubrificazione, quest'ultimo viene aspirato tramite il pescante (14) da una pompa volumetrica (13) e mandato tramite opportuni canali ai vari organi in moto; l'albero della pompa è messo in rotazione da una cinghia o catena collegata all'albero motore. Su quest'ultimo viene calettato il volano (19), un disco che assolve il compito di accumulare energia meccanica durante la fase utile e rilasciarla nelle altre fasi per regolarizzare il moto del motore. L'albero principale è vincolato a ruotare in opportune sedi, detti supporti di banco [3].

Le classificazioni di un motore a combustione interna possono essere molteplici, di seguito se ne enumerano le principali:

Durata del ciclo descritto:

- Motore due tempi (2T): Ciclo completo in due corse del pistone, rotazione dell'albero motore di 180° ;
- Motore quattro tempi (4T): Ciclo completo in quattro corse del pistone, rotazione dell'albero motore di 360° .

Il loro funzionamento viene dettagliatamente descritto nel seguito.

Modo di avviare la combustione:

- Motori ad accensione spontanea: Venne brevettato e costruito dall'ingegnere tedesco Rudolf Diesel nel 1897. In questa categoria di motore, al termine della fase di compressione, il cilindro contiene aria ad elevata temperatura e pressione, iniettando il combustibile nebulizzato direttamente in camera di combustione tramite gli iniettori, la miscela si auto accende, innescando la combustione.

Per descrivere le principali fasi caratterizzanti tale motore, ci serviamo del diagramma P-V (Fig.1.2).

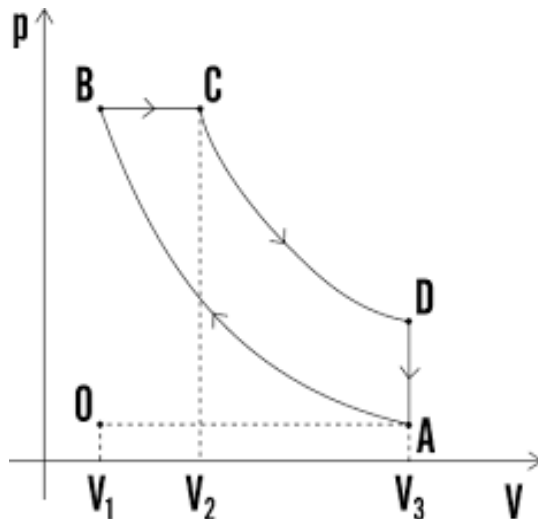


Fig.1.2 Fasi motore ad accensione spontanea [3']

- 1) Aspirazione: il pistone si abbassa verso il PMI e l'aria, passando prima attraverso opportuno filtro, viene aspirata. Nel ciclo ideale, questa fase viene descritta da una trasformazione isobara O-A ($P=\text{cost.}$);
- 2) Compressione: il pistone movimentandosi verso il PMS, comprime l'aria, raggiungendo pressione molto cospicue (35-60 bar) e temperature altrettanto elevate (500-600 °C). Questa fase è rappresentata da una trasformazione adiabatica A-B (flusso di calore verso l'esterno è nullo);
- 3) Combustione: a questo punto viene iniettato ad elevatissima pressione (nei moderni common rail fino a 2500 bar), il gasolio tramite opportuni iniettori; la miscela aria-gasolio si auto accende e ha inizio la combustione. Tale fase è descritta da una trasformazione isobara B-C, in seguito si avrà l'espansione: il pistone viene spinto verso il basso, generando lavoro meccanico, questa fase è quella utile, in cui si genera potenza, come lo era per il motore ad accensione comandata. L'espansione segue una trasformazione adiabatica C-D;
- 4) Scarico: una volta che il pistone giunge al PMI, risale verso l'alto, contemporaneamente viene aperta la valvola di scarico, in modo da consentire la fuoriuscita dei gas di scarico, spinti proprio dallo stantuffo. Quest'ultima fase è rappresentata da una trasformazione isocora D-A ($V=\text{cost.}$) [3].

Quanto descritto in precedenza si riferisce ad un caso ideale, nella realtà bisogna tener presente di alcune considerazioni che allontanano il ciclo Diesel dal caso teorico. Innanzitutto si è supposto che la macchina sia adiabatica, ciò non è proprio così, siccome ci sono perdite di calore alle pareti e inoltre è presente un sistema di raffreddamento che asporta calore, quindi le fasi di compressione ed espansione sono politropiche. Altra considerazione importante da evidenziare, è il fatto che la valvola di scarico viene aperta prima che il pistone, durante la fase di espansione, giunga al PMI, comportando una drastica diminuzione di pressione; ciò perché per azionare la valvola si impiega un determinato tempo finito.

In più in questo caso abbiamo il fatto che la combustione non verrà a pressione costante, ma a pressione variabile, come si evince facilmente dal diagramma reale (Fig.1.3) [3].

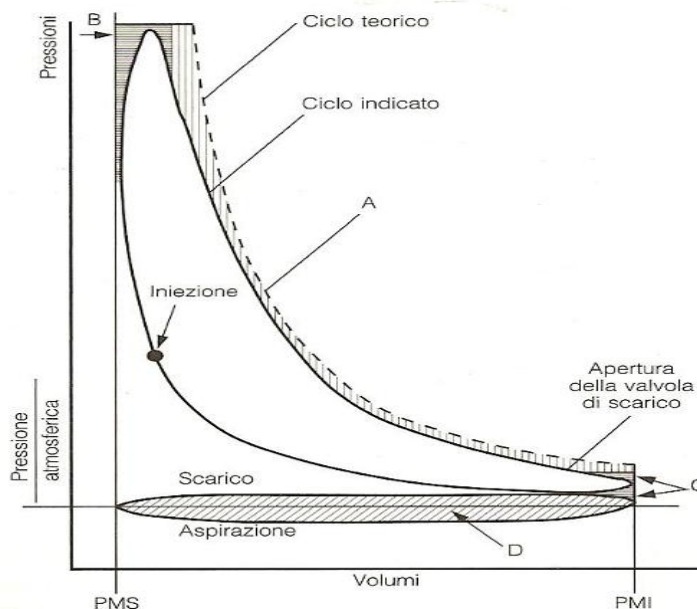


Fig.1.3 Ciclo Diesel reale [4]

- Motori ad accensione comandata: Venne brevettato nel 1862 dall'ingegnere francese Beau de Rochas, costruito per la prima volta nel 1876 dall'ingegnere tedesco Otto. In tale motore, la miscela aria-combustibile

viene accesa al termine della fase di compressione, tramite una scintilla che scocca tra due elettrodi della candela, tale scintilla innesca il processo di combustione all'interno del cilindro.

Le principali fasi (Fig.1.4) descritte dal ciclo Otto sono:

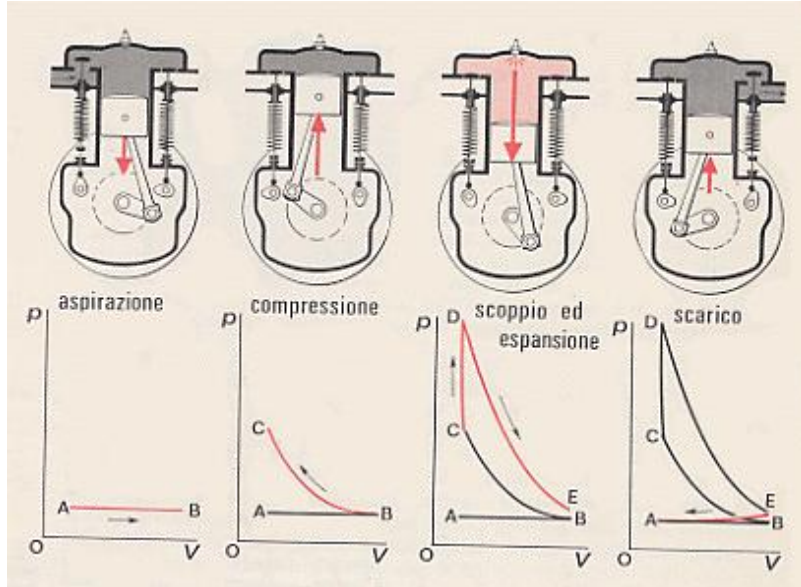


Fig.1.4 Fasi ciclo Otto ideale [5]

1) Aspirazione: la valvola di aspirazione viene aperta grazie all'albero a camme, il pistone scendendo verso il PMI, crea una depressione nel cilindro che richiamerà la miscela fresca aria-combustibile, il rapporto di tale miscela è regolato tramite la valvola a farfalla.

Questa fase è rappresentata, nel diagramma P-V, come una trasformazione isobara ($P=\text{cost.}$) (A-B).

2) Compressione: una volta che il pistone giunge al PMI, la valvola di aspirazione viene chiusa, grazie al richiamo di una molla opportunamente tarata, a questo punto lo stantuffo sale verso il PMS e comprime la miscela nella camera di scoppio.

Tale fase è descritta da una trasformazione adiabatica (flusso di calore verso l'esterno è nullo) (B-C).

3) Scoppio ed espansione: a questo punto in camera, la miscela si trova ad elevata temperatura e pressione, viene fatta scoccare una scintilla tra due elettrodi di una candela, essa permette l'accensione della miscela, in camera di combustione si raggiungono temperature dell'ordine dei 2000°C , il pistone è spinto verso il PMI, la combustione si propaga per tutto il cilindro con una velocità del fronte di fiamma che dipende da molteplici fattori, tra i quali temperatura e pressione in camera, rapporto di miscela, rapporto equivalente etc., in generale si aggira intorno ai 15 m/s. Questa fase è chiamata anche fase utile, poiché è quella che produce lavoro meccanico, mentre tutte le altre fasi non producono alcuna potenza, il pistone viene

trascinato passivamente dall'energia meccanica accumulata dal volano in questa fase.

Nel diagramma di Clapeyron, detta fase viene descritta come una isocora ($V=\text{cost.}$) per quanto riguarda lo scoppio (C-D), e con una adiabatica, per quanto concerne l'espansione (D-E).

4) Scarico: a questo punto il pistone giunto al PMI risale verso il PMS, la valvola di scarico si apre e permette ai gas esausti di uscire. Tale trasformazione è un isocora (E-B) [3].

Vale la pena evidenziare che il ciclo appena descritto, si riferisce ad un caso ideale, infatti si sono presunte alcune ipotesi semplificative, molte delle quali sono le medesime che abbiamo riscontrato per il motore Diesel: innanzitutto si è supposto che la macchina sia adiabatica, in realtà, come si è già visto non è così, in quanto sono presenti perdite di calore alle pareti, così come sono presenti perdite di massa attraverso le fasce elastiche, dopodiché si registra anche il tal caso una perdita di lavoro in espansione dovuto all'apertura anticipata della valvola di scarico, altra considerazione che porta uno scostamento dal caso ideale è il lavoro di pompaggio, lavoro operatore che andrà sottrarsi a quello motore del ciclo.

Inoltre nel ciclo teorico la combustione è supposta a volume costante quindi istantanea; nel ciclo reale invece richiede un certo tempo, se infatti l'accensione avesse luogo in corrispondenza del PMS, la combustione procederebbe durante l'allontanamento dello stantuffo dal PMS e il calore della pressione sarebbe inferiore al previsto con conseguente perdita di lavoro utile. Conviene perciò anticipare l'accensione in modo che la combustione possa avvenire, in massima parte, quando lo stantuffo si trova in prossimità del PMS. Ciò produce una perdita di lavoro utile (area B), ma questa perdita risulta di entità assai minore di quella che si avrebbe senza anticipo dell'accensione.

Tenendo in considerazione quanto detto sopra, il ciclo Otto si modifica secondo la Fig.1.5.

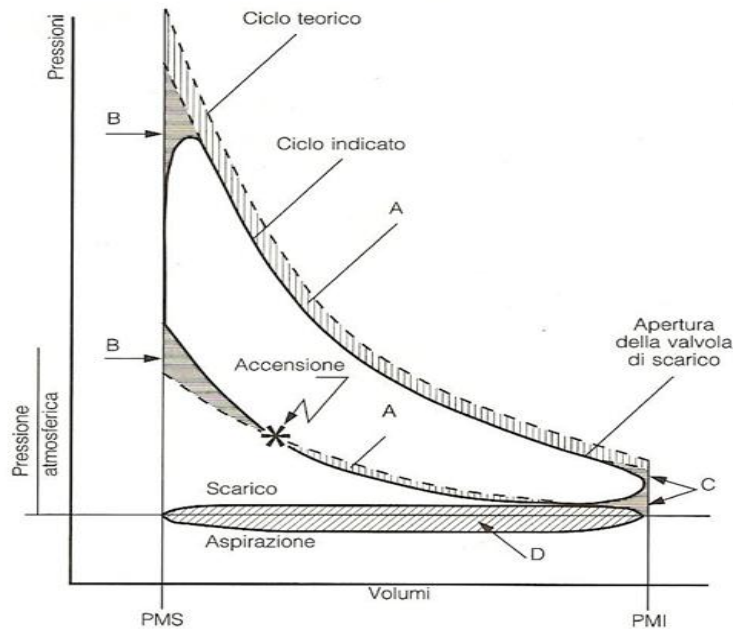


Fig.1.5 Ciclo Otto reale [6]

1.2 Parametri e grandezze principali MCI

D: Alesaggio (diametro cilindro) [mm];

r: Raggio di manovella [mm];

s: Corsa (distanza assiale tra PMS e PMI) (Eq.1.1);

$$s=2*r \text{ [mm]}$$

Eq.1.1

n: Numero di giri al minuto [giri/min] oppure RPM (Revolutions Per Minute);

V_0 : Volume camera di combustione (volume occupato dal pistone quando esso si trova al PMS);

V_c : Cilindrata unitaria (volume spazzato dal pistone in una corsa) (Eq.1.2);

$$V_c = \frac{\pi * D^2 * s}{2} \text{ [cm}^3\text{]}$$

Eq.1.2

$V_{c \text{ tot.}}$: Cilindrata totale (Eq.1.3);

$$V_{c \text{ tot.}} = V_c * z$$

Eq.1.3

dove z: numero di cilindri

rc: Rapporto volumetrico di compressione (rapporto tra volume del cilindro al PMS e volume del cilindro al PMI) (Eq.1.4);

$$rc = \frac{V_0 + V_c}{V_0} \text{ [-]}$$

Eq.1.4

L_i : Lavoro indicato (lavoro che il fluido cede all'albero, rappresenta l'area del diagramma P-V) (Eq.1.5);

$$L_i = \oint p \cdot dV \text{ [J]}$$

Eq.1.5

L_0 : Lavoro all'albero (lavoro rilevabile all'albero motore tramite banco prova, esso coincide con il lavoro indicato a meno delle perdite per attrito e degli organi ausiliari); [J]

L_{th} : Lavoro teorico/ termodinamico (rappresenta l'area del diagramma a cui si fa riferimento); [J]

η_0 : Rendimento organico/ meccanico (Eq.1.6);

$$\eta_0 = L_0 / L_i \text{ [-]}$$

Eq.1.6

η_i : Rendimento indicato (tiene conto della non idealità del fluido e della macchina) (Eq.1.7);

$$\eta_i = L_i / L_{th} \text{ [-]}$$

Eq.1.7

η_{th} : Rendimento termodinamico (Eq.1.8);

$$\eta_{th} = L_{th} / Q_1 \text{ [-]}$$

Eq.1.8

dove: Q_1 = Calore introdotto ad ogni ciclo di funzionamento [kJ]

η_c : Rendimento di combustione (tiene conto che la combustione non è completa, né perfetta) (Eq.1.9);

$$\eta_c = Q_1 / Q_{1max} \text{ [-]}$$

Eq.1.9

dove: Q_{1max} : Massa di combustibile che può potenzialmente partecipare alla combustione ad ogni ciclo di funzionamento [kJ]

η_{tot} : Rendimento totale (produttoria dei rendimenti) (Eq.1.10);

$$\eta_{tot} = \eta_0 \cdot \eta_i \cdot \eta_{th} \cdot \eta_c \text{ [-]}$$

Eq.1.10

λ_v : Fattore di carica (rappresenta quanto "efficientemente" si riempie il cilindro, non è considerato un termine di rendimento per il fatto che esso può essere superiore all'unità (fino anche a 2,5), per esempio nel caso di motori sovralimentati o sfruttando effetti dinamici delle onde che si instaurano all'interno dei condotti di aspirazione);

P_0 : Potenza all'albero (potenza misurabile all'albero principale) (Eq.1.11);

$$P_0 = \rho_f \cdot V_c \cdot \lambda_v \cdot K_i \cdot \eta_{tot} \cdot 2n \cdot \tau \text{ [kW]}$$

Eq.1.11

dove: ρ_f : Densità del fluido [kg/m³];

τ : Numero di corse per ciclo;

$2n \cdot \tau$: Durata del ciclo [s]

(AFR)_{ST}: Air Fuel Ratio (rapporto aria-combustibile in condizioni di stechiometria, ossia nessuno dei reagenti è in eccesso da comparire tra i prodotti come reagenti residui in seguito alla trasformazione) (Eq.1.12);

$$(AFR)_{ST} = m_{air} / m_{fuel} [-]$$

Eq.1.12

Tale rapporto dipende dell'idrocarburo utilizzato:

Benzina: 14,60

Gasolio: 14,50

Metano: 17

Idrogeno: 34

λ : Indice d'aria (Eq.1.13);

$$\lambda = AFR / (AFR)_{ST} [-]$$

Eq.1.13

Se: $\lambda = 1$ (condizione di stechiometria);

$\lambda < 1$ (miscela grassa, eccesso di combustibile);

$\lambda > 1$ (miscela magra, eccesso di aria).

H_i : Potere calorifico inferiore (quantità di energia liberata dalla combustione perfetta e completa di un'unità di combustibile, per benzina e gasolio si aggira attorno 43000 kJ/Kg) [kJ/kg];

K_i : Tonalità termica (quantità di calore liberato dalla combustione perfetta e completa di un'unità di fluido aspirato) [kJ/kg];

PME: Pressione media effettiva (capacità del motore di trasformare la pressione dei gas in lavoro meccanico utile) (Eq.1.14);

$$PME = L_0 \cdot V_c \text{ [bar]}$$

Eq.1.14

PMI: Pressione media indicata (misura quanto lavoro i gas sviluppano nel cilindro, prima che si sottraggono le perdite per attrito, pompaggio, etc.) (Eq.1.15);

$$PMI=L_i*V_c \text{ [bar]}$$

Eq.1.15

BSFC o CS: “ Brake Specific Fuel Consumption” o Consumo specifico (Eq.1.16);

$$BSFC=Q_{fuel}*P_0 \text{ [g/kWh o g/CVh]}$$

Eq.1.16

dove: Q_{fuel} : portata massica di combustibile [kg/s].

[7] *Equazioni principali MCI*

2. Sovralimentazione nei motori Diesel

La sovralimentazione consiste nel precomprimere la carica fresca al di fuori del cilindro, con lo scopo di incrementare la massa di aria aspirata ad ogni ciclo e perciò aumentare la potenza a parità di cilindrata.

Questa tecnica, coniata nel 1905 dall'ingegnere svizzero Alfred Buchi, venne adottata inizialmente nei quattro tempi ad accensione comandata in campo aeronautico, per poi essere accolta anche nel campo automobilistico sportivo; mentre si è da subito imposta nei motori Diesel, partendo da unità medio-alte (impianti fissi, settore ferroviario, navale), negli anni '20 del secolo scorso, per poi estendersi, negli anni '50, ai motori stradali. Nei primi anni '60, si assiste all'introduzione di questi sistemi su auto di serie; la prima a montare un turbocompressore fu l'americana Oldsmobile F-85 Jetfire, seguita nel 1974 dalla Porsche 911.

Elemento imprescindibile della sovralimentazione è il compressore, esso può essere portato in rotazione da un motore ausiliario esterno elettrico o termico (sovralimentazione esterna), dallo stesso motore grazie accoppiamenti meccanici (sovralimentazione meccanica) oppure da una turbina azionata dai gas di scarico (turbo sovralimentazione a gas di scarico).

Quest'ultimo sistema di sovralimentazione è sicuramente quello che ha avuto maggior successo, in esso i gas di scarico, trovandosi a fine ciclo ad una pressione superiore rispetto a quella atmosferica, vengono convogliati ad una turbina, essi cedono lavoro a quest'ultima mettendola in rotazione;

nello specifico essa converte il salto entalpico dei gas esausti in energia meccanica disponibile all'albero della turbina, tale lavoro viene prelevato da un compressore, il quale comprime la massa d'aria aspirata, aumentandone la densità e quindi la portata massica.

La turbina e il compressore sono sovente montati sul medesimo albero, costituendo un unico gruppo detto turbocompressore (Fig. 2.1).

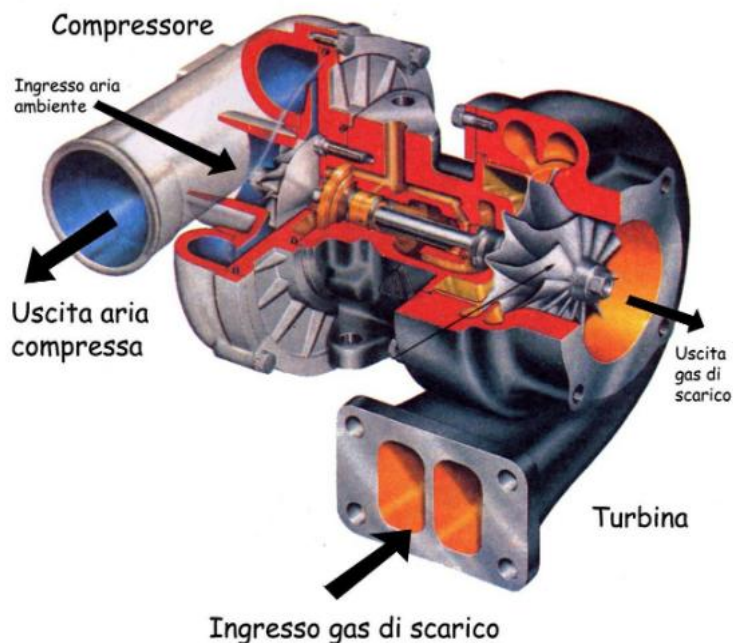


Fig. 2.1 Turbocompressore [8]

Con riferimento alla Fig. 2.2, si vede la differenza tra il ciclo teorico compiuto da un motore Diesel normalmente aspirato (1-2-3-4-5) e un ciclo sovralimentato (1'-2'-3'-4'-5'). Come si evince dal ciclo sovralimentato la pressione di alimentazione non sarà più quella atmosferica, bensì crescerà al valore P_1' , ciò comporta un innalzamento del grafico, con conseguente incremento del lavoro utile sviluppato dal ciclo [3].

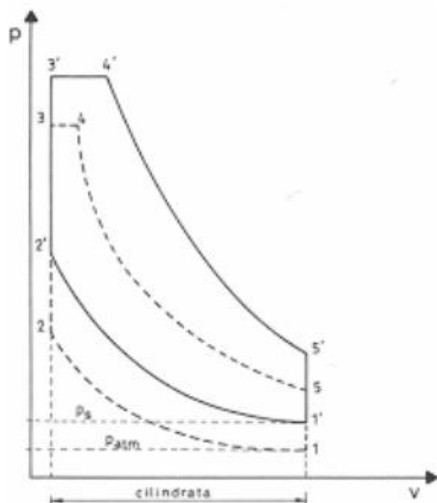
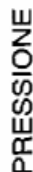


Fig. 2.2 Ciclo teorico aspirato e sovralimentato [9]

La turbo sovralimentazione a gas di scarico può essere considerata come il tentativo di recuperare una parte della perdita di energia dovuta al troncamento dell'espansione del cilindro ad un volume pari a quello iniziale del cilindro.



In fig. 2.3, viene rappresentata proprio tale recupero.

Tuttavia ciò è irrealizzabile poiché lo stantuffo si trova nel punto 2 già al PMI e quindi non può scendere ulteriormente; se però colleghiamo subito a valle della valvola di scarico una turbina, l'espansione 2-4 avviene al suo interno.

Se inoltre la sezione di passaggio della turbina è sufficientemente grande, la pressione nel cilindro può scendere alla pressione atmosferica prima ancora che il pistone si sposti significativamente verso il PMS, non incontrando alcuna contropressione.

Nel caso di motori pluricilindrici, viene interposto tra il motore e la turbina un volume in grado di smorzare le oscillazioni di portata e di pressione dovute allo scarico dei diversi cilindri. In tal caso, la turbina mantiene al suo ingresso una pressione costante P_s per tutto il ciclo.

Perciò appena si apre la valvola di scarico, i gas di scarico usciranno automaticamente dal cilindro trovandosi ad una pressione P_2 maggiore della pressione che si ha nel condotto di scarico P_s , essi compiono la trasformazione 2-3. Dopodiché il pistone salendo verso il PMS comprime i gas di scarico secondo la trasformazione 8-7, vincendo la contropressione P_s .

La massima energia estraibile dai gas di scarico e messa a disposizione nelle turbina è rappresentata dall'area 3'-4'-6-7, si noti che il punto 3' si trovi spostato a destra rispetto al punto 3; i gas si espandono infatti da P_2 a P_5 e quindi acquisendo una energia cinetica pari a 2-3-8, che viene poi dissipata in calore con conseguente aumento di temperatura.

L'area 3-3'-4'-4 rappresenta quindi un parziale recupero dell'area 2-3-8.

L'energia a disposizione della turbina può essere pensata costituita da due parti: area 8-3'-4'-5 + area 5-6-7-8 [3].

2.1 Tipologie di turbo sovralimentazione

La turbo sovralimentazione può essere di diversi tipi:

1) Turbo sovralimentazione a pressione costante: Essa è caratterizzata da un ampio collettore, posto a valle dei cilindri (Fig. 2.4).

Esso assolve il compito di smorzare le oscillazioni di pressione e portata, che potrebbero ostacolare lo svuotamento di altri cilindri. Il volume ottimale di tale collettore dipende da numerosi parametri, tra cui la pressione dei gas a termine del ciclo, la loro portata massica, dall'area della turbina e dalla frequenza con cui si susseguono gli scarichi; orientativamente si adottano valori da 1 a 6 volte la cilindrata totale del motore.

Tale collettore permette di far giungere alla turbina un flusso praticamente stazionario, tuttavia questa configurazione non permette di sfruttare a pieno l'energia cinetica posseduta dai gas di scarico, difatti essa viene degradata in entropia.

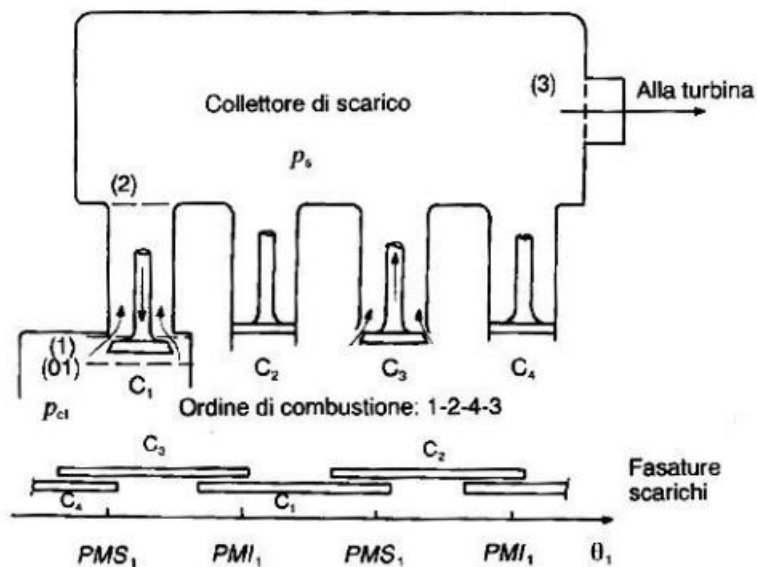


Fig. 2.4 Sistema a pressione costante [11]

2) Turbo sovralimentazione ad impulsi: La turbina riceve dal motore, attraverso piccoli condotti, un flusso più o meno stazionario, in tale disposizione l'energia cinetica dei gas di scarico viene conservata e trasferita alla macchina motrice sotto forma di onde di pressione (Fig. 2.5).

Per ridurre la non stazionarietà del flusso di gas è possibile raggruppare nel medesimo condotto gli scarichi di più cilindri aventi una minima sovrapposizione di fasatura, ciò comporta più ingressi nella turbina con maggior costi di realizzazione.

Il flusso non stazionario della turbina può portare a perdite fluidodinamiche e ad oscillazioni elevate del rendimento.

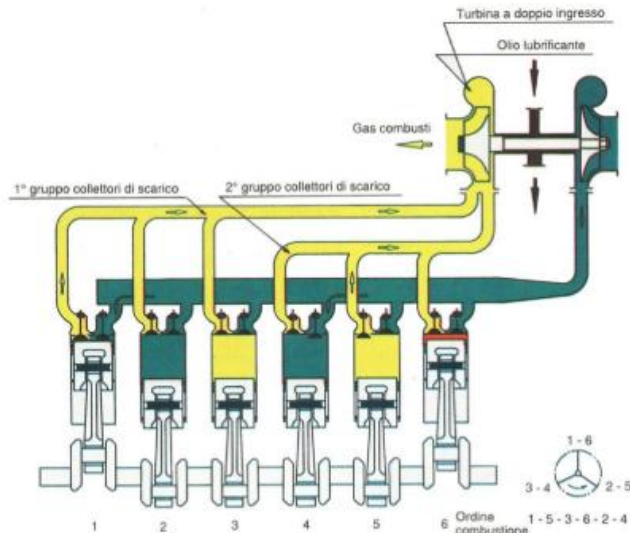


Fig. 2.5 Sistema ad impulsi [12]

3) Motore turbo composito: L'albero del turbocompressore è collegato direttamente a quello del motore, se si considera che l'energia estraibile dai gas di scarico è superiore a quella necessaria per comprimere l'aria di alimentazione, il beneficio che si ottiene è quello di riversare l'eccesso di potenza all'albero motore.

Un limite di tale configurazione risiede nel difficoltoso collegamento tra i due alberi: quello della turbina ruota a velocità 30 volte superiore rispetto a quello dell'albero motore [3].

I primi sistemi di sovralimentazione del motore Diesel erano ad impulsi, dopodiché si optò per i sistemi a pressione costante, in quanto sono maggiormente affidabili ed efficienti, inoltre permettono di ridurre drasticamente la non stazionarietà del flusso.

2.1.1 Raffreddamento della carica

La compressione che avviene all'interno del compressore comporta un inevitabile aumento delle temperature dei gas; tale incremento dipende dal rapporto di compressione, dal rendimento adiabatico del compressore e dalle perdite di calore in esso. Perciò per i motori con rapporto di compressione superiore a 2, il raffreddamento si rende necessario.

I vantaggi che si ottengono con il raffreddamento sono svariati, tra di essi figurano:

- Aumento della portata massica di aria introdotta nel cilindro per ciclo e quindi di potenza che esso è in grado di erogare;

- si riducono le temperature che si raggiungono durante il ciclo, abbassando i carichi termici sui motori e sulle palette della turbina;
- si aumenta il rendimento organico, in quanto aumenta la potenza senza variare sensibilmente la pressione.

Si pensi che in un motore Diesel, una riduzione delle temperature di 10 °C dell'aria, causa un aumento della portata volumetrica di aria del 3%, del rendimento meccanico dello 0,5% e quindi di potenza del 3,5%.

Come refrigerante si può usare l'acqua del circuito di raffreddamento del motore oppure un circuito di raffreddamento separato.

Attualmente però si sono adottate soluzioni di raffreddamento carica-aria esterna, situando lo scambiatore, detto Intercooler, di fronte al motore, adiacente al radiatore dell'impianto di raffreddamento del motore e quindi raffreddato dalla ventilazione naturale derivante dall'avanzamento del veicolo o da un ventilatore trascinato meccanicamente dal motore, oppure negli impianti fissi si è pensato di raffreddare la carica grazie ad un ventilatore mosso da una turbina azionata da una piccola carica compressa [3].

2.1.2 Legame sovralimentazione-sovraccarichi e inquinanti

Bisogna sottolineare il fatto che l'aumento di potenza dovuto alla sovralimentazione comporta un incremento dei carichi, di natura termica e meccanica, sui vari organi.

Per quanto concerne i sovraccarichi meccanici, bisognerà irrobustire i principali componenti del motore, cionondimeno l'aumento di peso e di ingombro è trascurabile rispetto all'aumento di potenza.

Per quanto riguarda, invece, l'aumento delle sollecitazioni di origine termica, bisogna ritenere che a parità di aria-combustibile, la quantità di calore liberata cresce in modo proporzionale all'aria entrante nel cilindro, dunque al grado di sovralimentazione, perciò occorre prevedere un sistema di refrigerazione dell'aria di alimentazione e degli organi maggiormente esposti alle alte temperature (raffreddamento interno del pistone, delle valvole e della testata).

Altro aspetto importante è il legame tra la sovralimentazione e le emissioni inquinanti; un motore sovralimentato opera con rapporti aria-combustibile maggiori rispetto ad uno aspirato, ne deriva una riduzione di ossidi di carbonio, ciò grazie al fatto che la sovralimentazione comporta miscele più magre, quindi ne derivano combustioni più complete, inoltre si registra un calo di incombusti, grazie all'elevata turbolenza che si ha in camera e quindi alla maggior facilità con cui il carburante si lega con l'ossigeno.

Mentre gli ossidi di azoto possono essere ridotti se il sistema di sovralimentazione prevede un circuito di raffreddamento. Il pericolo maggiore, soprattutto in fase di accelerazione, è la formazione di particolato, a causa della lentezza del turbocompressore di accelerare e quindi di avere rapporti AFR troppo bassi.

2.1.3 Risposta al transitorio di un motore sovralimentato

Durante il suo funzionamento, il motore cambia le proprie condizioni di funzionamento:

- Variazione del carico a regime costante;
- accelerazione da un basso regime ad uno più elevato, mantenendo il motore alla massima coppia;
- accelerazione da carico ridotto e basso regime a pieno carico e massima velocità, tale caso richiede al motore la massima variazione di potenza.

Se la sovralimentazione è di tipo meccanico, non avremo ritardi di risposta del gruppo di sovralimentazione, in quanto il compressore, essendo trascinato in movimento dal motore, segue la variazione di giri di quest'ultimo.

Invece, se la sovralimentazione è affidata ad un turbocompressore, il regime di esso dipende dal regime e dal carico del motore.

Quando il motore viene bruscamente accelerato, occorre un certo tempo per riempire i condotti di aspirazione e di scarico ed aumentarne la pressione.

Tale lasso di tempo, in gergo, è chiamato turbo-lag.

Inoltre una parte di energia raccolta dalla turbina deve essere spesa per vincere l'inerzia del turbocompressore ed accelerare i componenti rotanti del gruppo. La pressione di mandata del compressore durante il transitorio sarà più bassa di quella che verrebbe fornita in condizioni stazionarie.

Nel motore Diesel, inoltre, all'aumentare del tempo di risposta da parte del turbocompressore, il motore produce più particolato poiché la portata inviata dal compressore durante il transitorio sarà inferiore rispetto a quella necessaria a bruciare tutto il combustibile.

Si è sviluppata una formula semplificata (Eq.2.1) per calcolare tale transitorio, in particolare si fa riferimento al tempo caratteristico τ ottenuto come rapporto tra l'energia cinetica del turbo e la potenza sviluppabile in turbina:

$$\tau = I_t \cdot \omega_t^2 / Q_t \cdot \eta_c \cdot \eta_t \cdot \Delta h_{is,t} \cdot \beta$$

Eq. 2.1 Equazione turbo-lag [13]

dove:

I_t : Momento d'inerzia del turbocompressore [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$];

ω_t : velocità angolare del gruppo [rad/s];

Q_t : portata massica di gas che entrano in turbina [kg/s];

η_c : rendimento del compressore [-];

η_t : rendimento della turbina [-];

$\Delta h_{is,t}$: salto entalpico isoentropico disponibile in turbina [J/kg];

β : fattore correttivo, tiene conto di effetti secondari, come variazioni di temperatura, perdite meccaniche, o risposta dinamica del sistema [-].

Ovviamente tanto è più piccolo tale transitorio, tanto più velocemente il turbocompressore accelera. Dalla formula soprastante risulta evidente che per avere un transitorio minimo, il gruppo di sovralimentazione dovrà avere un buon rendimento, ci dovrà essere un buon trasferimento di energia dal motore al turbo (alti $\Delta h_{is,t}$), infine risulta necessario un piccolo momento d'inerzia; esso può essere diminuito provvedendo a soluzioni volte ad alleggerire i componenti.

Infine, ad impattare sul transitorio, è il tipo di funzionamento della turbina; con il tipo ad impulsi, non appena accelera il motore, la turbina accelera anch'essa grazie al piccolo volume del sistema di scarico che permette di aumentare i valori di pressione e di temperatura dei gas che giungono al turbo in maniera quasi istantanea. Mentre con il sistema a pressione costante, siccome i collettori di scarico sono più ampi, la pressione dei gas che arrivano alla turbina aumenta più lentamente.

Una soluzione per ovviare alla problematica del turbo-lag, consiste nell'introdurre i turbocompressori a geometria variabile (VGT: "Variable Geometry Turbocharger"), (Fig.2.6), la cui prima applicazione su un'automobile di serie risale al 1987 sulla Fiat Croma. In tali turbine, la girante è circondata da un anello di palette statoriche che sono a incidenza variabile. Il movimento di tali palette statoriche, controllato dalla centralina elettronica e compiuto da un attuatore elettrico o elettropneumatico, consiste nella variazione del loro angolo d'incidenza rispetto alle palette rotanti della girante.

In funzione del regime di rotazione, queste vengono chiuse o aperte per favorire la velocità o la portata dei gas esausti.

Nella fattispecie ai bassi regimi le palette dello statore sono praticamente quasi chiuse così da limitare la portata di gas in ingresso, accelerare e indirizzare il flusso contro le palette. Al crescere del regime di rotazione, cresce anche la portata di gas combusti in arrivo alla turbina, per sfruttare questo fenomeno le sezioni delle palette dello statore vengono ampliate fino alla completa apertura [14].

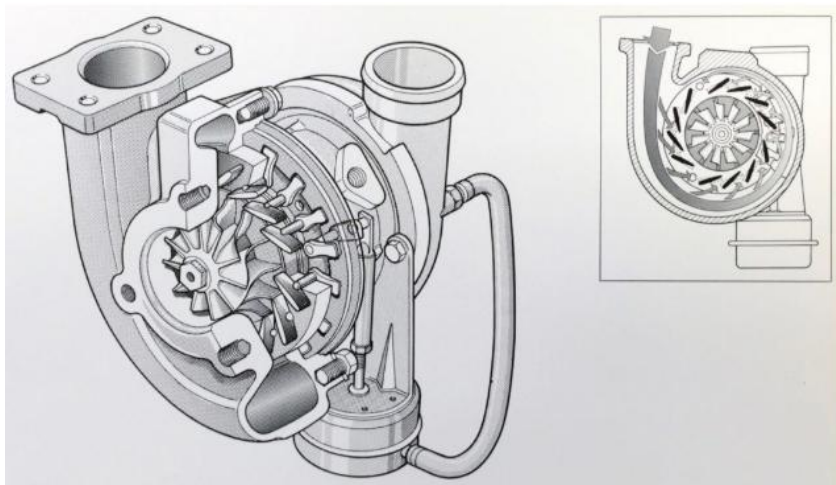


Fig. 2.6 Turbina a geometria variabile [12]

Un'altra soluzione altrettanto diffusa consiste nell'installare più turbine in parallelo tra loro (twin turbo). Tali turbine, di dimensioni inferiori a quelle di una turbina singola equivalente, presentano tempi di risposta inferiori e dunque minor turbo lag, a parità di pressione di sovralimentazione. Questa soluzione è particolarmente conveniente nei motori dotati di più collettori di scarico, come ad esempio i motori dotati di più bancate di cilindri.

Inoltre, è possibile montare turbine in cascata o in serie (multistage), ovvero due turbine di diversa dimensione; quella di minori dimensioni viene fatta lavorare ai bassi regimi e carichi entrando subito a regime grazie al suo esiguo turbo-lag. Quello di maggiori dimensioni e portata viene inserita solo ad alti regimi ed alti carichi in modo da produrre il massimo della sovralimentazione desiderata, ai medi regimi e medi carichi i due turbocompressori possono lavorare simultaneamente e la quota parte di aria che deve essere inviata ad una o all'altra unità viene decisa dalla centralina tramite l'attuazione di una valvola separatrice.

Un'ultima soluzione per ovviare il tanto odiato fenomeno turbo-lag è rappresentata dal sistema Twin Scroll (Fig.2.7).

Come suggerisce il nome, il turbocompressore presenta due ingressi per i gas di scarico con due ugelli: uno più piccolo e più angolato per una risposta più rapida e uno più grande meno angolato per massimizzare le prestazioni. Ciò conferisce alla chiocciola una geometria sdoppiata.

Perciò i gas esausti, uscenti dal motore, dovendo attraversare canali aventi sezione dimezzata rispetto alla versione classica di turbocompressore, si muovono più velocemente, facendo sì che ai bassi regimi, si abbia minor inerzia e quindi minor turbo-lag.

Questo accorgimento viene adottato prevalentemente nei motori 4 cilindri, in cui i cilindri 1-4 e 2-3 sono collegati assieme, come si evince dalla figura sottostante.

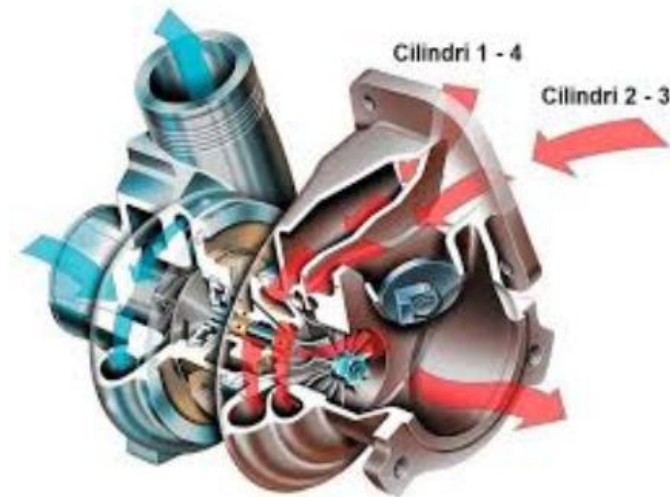


Fig. 2.7 Turbina Twin Scroll [15]

2.1.4 Accorgimenti sul turbocompressore

Per non incorrere nella rottura del motore, non si può superare un determinato rapporto di compressione all'interno dei cilindri e per questo motivo si usano sistemi di sfogo e di deviazione sia dell'aria di aspirazione sia dei gas di scarico, sotto forma di particolari valvole:

Valvola Wastegate, una valvola pneumatica che entra in funzione quando la pressione di sovralimentazione supera un valore critico, in questo caso inizia ad aprirsi permettendo a una parte via via sempre maggiore di gas combusti di bypassare all'esterno della turbina, senza impattare sulle palette della girante stessa, e di rientrare più a valle della turbina direttamente nel sistema di scarico, evitando di far raggiungere alla turbina eccessivi regimi di rotazione. Questo tipo di valvole vengono di norma installate su turbocompressori a geometria fissa cioè su quei turbo che non consentono una regolazione né della portata né della direzione del flusso dei gas di scarico in ingresso alla turbina mentre non vengono installate su turbocompressori a geometria variabile dove la pressione di sovralimentazione viene regolata variando la geometria delle palette dello statore installato sulla turbina.

Valvola pop-off, situata fra il turbocompressore e la valvola a farfalla essa si apre totalmente in fase di rilascio del pedale dell'acceleratore, quando, pur essendo la

valvola a farfalla totalmente chiusa, le giranti del turbo continuano a ruotare per effetto dell'inerzia, facendo sì che il compressore continui a comprimere e a spingere l'aria verso quest'ultima. Quando la pop-off si apre, quest'aria sfiata verso l'esterno o verso un tubo di ritorno. Se quest'aria non venisse sfiatata, andrebbe ad urtare contro la farfalla chiusa e creerebbe un'onda di pressione di ritorno verso la girante del compressore, dando origine al cosiddetto colpo d'ariete, un fenomeno che può essere molto dannoso per le varie componenti del turbocompressore [14]. Questa valvola non è necessaria nel motore Diesel in quanto privo della valvola a farfalla.

2.2 Altre tipologie di sovralimentazione

Sinora ci siamo focalizzati solamente sulla turbo sovralimentazione, tuttavia, come abbiamo detto ad inizio capitolo, esistono altre tipologie di sovralimentazione.

La prima che andremo a descrivere è la sovralimentazione meccanica:

In questo caso, la compressione della carica all'interno del cilindro è affidata, come sempre, ad un compressore, però esso questa volta è trascinato in movimento direttamente dal motore termico, grazie ad una cinghia o catena.

I compressori possono essere di due tipologie principali: volumetrico o centrifugo.

Sicuramente quello che ha avuto maggior fortuna è il compressore volumetrico, esso è caratterizzato da una portata di aria che aumenta proporzionalmente alla velocità di rotazione del motore e da un rapporto di compressione indipendente dai giri dell'albero motore, perciò da una pressione di sovralimentazione che rimane costante per tutto il ciclo di funzionamento.

Il compressore volumetrico presenta il vantaggio di avere una estrema rapidità di risposta all'azionamento a qualsiasi regime e carico del motore, dall'altra parte però ha un difetto non trascurabile che consiste in una quota parte di energia che viene sottratta direttamente al motore per mettere in rotazione il compressore stesso. Inoltre questa parte di energia che viene sottratta al motore è tanto più elevata quanto maggiore è il grado di sovralimentazione per il quale è stato progettato.

I compressori volumetrici sono di diverse tipologie. Quella maggiormente utilizzata è il compressore a lobi o Roots (Fig. 2.8). Esso è munito di due rotori rettilinei, ciascuno dei quali presenta due lobi che ruotano in sincronia tra di essi, grazie ad un comando ad ingranaggi, collegati tramite cinghia o catena.

Questo tipo di compressore ha un rendimento molto basso che causa un eccessivo riscaldamento della carica entrante nel motore.

E' stato utilizzato in passato dalla Lancia con il nome di Volumex e dalla Volkswagen con il nome di G-Lader, il Roots nel corso degli anni è stato ulteriormente migliorato dalla Eaton che ha prodotto delle nuove versioni caratterizzate da lobi non più rettilinei ma avvolti ad elica, nello specifico una prima versione con tre lobi con avvolgimento di 60° e una seconda versione da quattro lobi di ben 160° , capaci di un elevato rendimento e una maggiore silenziosità.

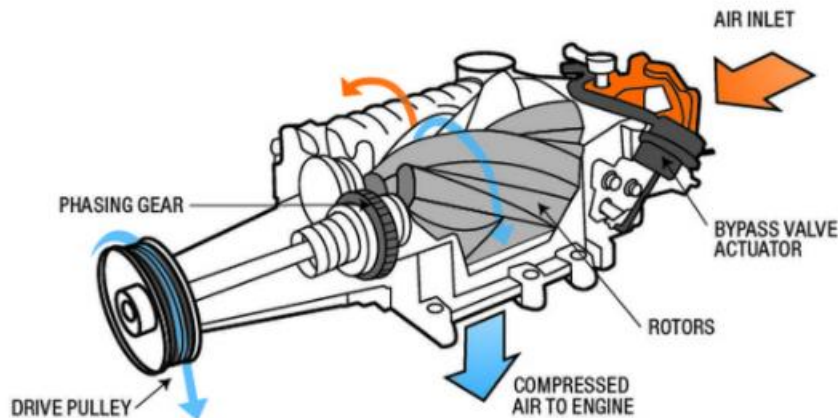


Fig. 2.8 Compressore Roots [16]

Altra tipologia di compressore, è quello centrifugo (Fig. 2.9): Esso dispone di una girante, messa in rotazione dal motore endotermico, nello specifico l'albero motore mette in movimento l'albero, su cui è calettata la girante, grazie ad una cinghia.

Soluzione non molto comune, è quella di far trascinare la girante tramite un motorino elettrico. Il vantaggio in termini di potenza di quest'ultima soluzione è molto ridotto rispetto al turbocompressore; la principale causa sta nel fatto che la girante ruotando vincolata al motore (al contrario della girante del turbo che ruota liberamente) il numero di giri raggiungibile fa sì che non si possa arrivare ad elevate pressioni, tuttavia grazie alla sua semplicità è stato largamente impiegato in passato nel settore aeronautico, veniva installato su aerei caccia della Seconda Guerra Mondiale.

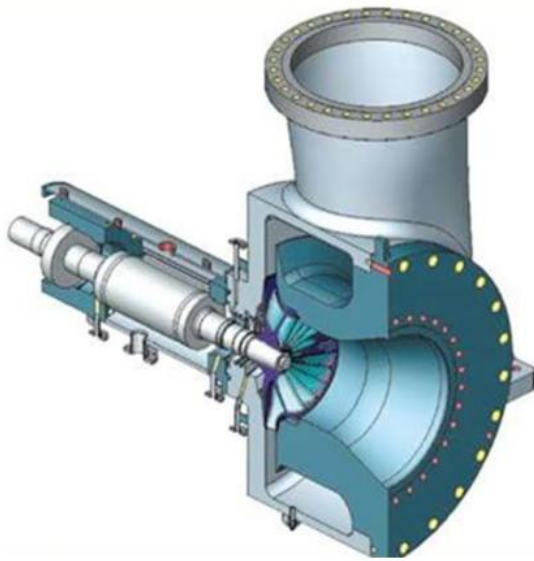


Fig. 2.9 Spaccato di un compressore centrifugo [17]

Oggigiorno, tale compressore è in disuso nel settore dell'autotrazione perché esso, per funzionare, assorbe potenza dall'albero motore, sebbene la potenza sottratta sia molto minore rispetto all'incremento di potenza che riesce a generare, si preferisce la soluzione turbocompressa, in cui il compressore è movimentato dalla turbina, così da non avere alcuna sottrazione di energia dal motore.

Altra tipologia di sovralimentazione è quella chimica, trattasi di un sistema per immettere maggiore ossigeno nei cilindri rispetto a quello che sarebbe normalmente presente con la sola aspirazione. Il sistema viene comunemente indicato con l'acronimo NOS, dal nome dell'azienda statunitense che lo coniò.

Esso si basa sull'immettere protossido di azoto (N_2O) nel collettore di aspirazione, esso contiene il 36% in peso di ossigeno, mentre sappiamo che l'aria presenta solamente il 20% di ossigeno, in questo modo quando il protossido viene a contatto con le alte temperature, libera ossigeno puro, generando un incremento di coppia e potenza molto elevato.

Tuttavia è un sistema poco usato, a causa degli alti costi, problemi legali e rapida usura del motore; trova impiego principalmente nelle competizioni sportive o in gare di accelerazione.

In sintesi, si riportano i principali vantaggi che la sovralimentazione comporta:

- Riduce l'ingombro, il peso e quindi anche il costo per unità di potenza sviluppata dal motore;
- migliora il rendimento, riducendo i consumi specifici;

- in un motore Diesel, migliora il processo di combustione, riducendo il ritardo all'accensione;
- rende il motore meno rumoroso, perché assicura una combustione più graduale, mentre la turbina posta sullo scarico regolarizza le onde di pressione nei collettori;
- contribuisce a rendere gli scarichi meno inquinanti;

Per contro, si elencano anche gli svantaggi che la sovralimentazione può comportare:

- Aumento dei carichi meccanici e termici sui principali organi;
- più lunghi tempi di risposta nei transitori;
- costi maggiori di acquisto e di manutenzione [3].

3. Inquinanti nel motore Diesel

Gli inquinanti in un motore Diesel sono dovuti principalmente alla forte disomogeneità della carica, causata dalla distribuzione del combustibile, in seno alla quantità di aria variabile nel tempo.

Per comodità distinguiamo gli inquinanti in gassosi e non; iniziamo ad analizzare gli inquinanti gassosi:

- **HC:** (Idrocarburi incombusti) in un motore Diesel, la formazione di idrocarburi incombusti avviene in corrispondenza della parte esterna dello spray di iniezione, dove la concentrazione di combustibile è bassa per portare all'autoaccensione e alla propagazione del fronte di fiamma, ergo ci ritroviamo idrocarburi che non hanno partecipato alla combustione allo scarico, altri HC potrebbero formarsi in condizione di pieno carico, quando il motore è costretto a lavorare in ambiente grasso, altri ancora si potrebbero originare dalla incompleta combustione nel nucleo del getto, inoltre una parte di gasolio potrebbe deporsi in corrispondenza delle pareti del cilindro e del pistone, da cui evapora successivamente dato le alte temperature a cui si trovano, se questi vapori di gasolio, soprattutto gli ultimi, non trovano una giusta quantità di ossigeno, non vengono bruciati, inoltre essi aumentano con la PME, poiché una maggiore quantità di combustibile si deposita sulle pareti e nella parte centrale del nucleo, non riuscendo ad ossidarsi data la scarsità di ossigeno.
Bisogna tenere in considerazione che gli incombusti hanno effetti negativi sulla salute umana, essendo cancerogeni.
- **CO:** (Ossido di carbonio) dato che nel motore Diesel, il rapporto aria-combustibile è sempre superiore alla stechiometria, quindi avremo sempre un eccesso di aria, perciò il CO viene ossidato in CO₂; tuttavia in situazioni particolari (avviamento a freddo), la suddetta reazione potrebbe risultare incompleta a causa della rapidità con cui essa si svolge e delle basse temperature, rendendo il CO un inquinante che comunque riveste un ruolo secondario nei Diesel.
Il CO è un vero e proprio veleno, si lega all'emoglobina con una facilità maggiore dell'ossigeno, causando danni spesso irreversibili alla persona.
- **NO_x:** (Ossidi di azoto) l'aria che respiriamo è costituita per il 78% da Azoto in forma molecolare N₂, esso è un gas inerte, non nocivo, però ad elevate temperature esso si dissocia e gli atomi di azoto, unendosi con l'ossigeno danno origine agli NO_x.

Questi ultimi sono i precursori delle piogge acide, inoltre legandosi con gli HC possono dare origine all'ozono, il quale ha un impatto deleterio sull'apparato respiratorio. Gli NO_x si originano nelle zone debolmente magre e nelle zone dove le temperature sono alte, perciò quelle che circondano il getto di combustibile e nella zona centrale dello spray, inoltre si hanno quando il motore lavora a massimo carico, visto l'incremento inevitabile delle temperature.

Mentre il principale inquinante non gassoso è rappresentato dal particolato, esso costituisce il principale contaminante prodotto dal Diesel, tant'è che negli ultimi decenni si sono sviluppate diversi sistemi per abbatterlo.

Il particolato è formato da particelle solide e liquide di natura carboniosa su cui si sono condensati composti organici portate in sospensione dai gas di scarico.

Nei motori ad iniezione diretta, si forma in corrispondenza del nucleo centrale dello spray, dove si ha una miscela grassa; le massime concentrazioni si avranno a 10° - 20° dopo il PMS, per poi diminuire quando il nucleo del getto di gasolio si miscela con l'aria circostante consentendo l'ossidazione di buona parte delle particelle carboniose formatesi. Mentre nei motori ad iniezione indiretta, il quantitativo di particolato prodotto è minore, dato il maggiore tempo di mescolamento gasolio-aria.

Vediamo ora il processo di formazione del particolato:

Ad elevate temperature si ha la decomposizione delle molecole di combustione in prodotti intermedi del tipo acetilene e poliacetilene, questi primi nuclei crescono per adesione superficiale e condensazione di altre specie povere di idrogeno che vengono incorporate nella fase solida, sempre più ricca di carbonio; questi nuclei carboniosi bruciano in presenza di ossigeno, dando luogo a CO e CO_2 , quando le temperature si abbassano, i nuclei carboniosi si coagulano e si aggregano in particelle di più grosse dimensioni, infine le particelle carboniose assorbono composti organici ad alto peso molecolare, quest'ultima fase avviene al di fuori del cilindro.

Generalmente il particolato è ben visibile nei gas di scarico come la classica fumata nera, quest'ultima è più intensa nel caso in cui il motore si trova a lavorare vicino alla stechiometria (condizione di accelerazione o funzionamento a pieno carico), mentre risulta più fioca nel caso di combustione magra. Il particolato ha dimensione di qualche μm ; la dimensione è definita da PM, ad esempio PM10 vuole indicare polveri sottili con diametro nominale inferiore a $10\ \mu\text{m}$, visto la sua grandezza, esso potrebbe essere inalato, comportando conseguenze deleterie all'apparato respiratorio e cardiovascolare [18].

3.1 Sistemi di abbattimento degli inquinanti nei gas di scarico

Per abbattere gli inquinanti sopra descritti, esistono diversi metodi, il primo che andremo a descrivere sarà il ricircolo dei gas di scarico.

Noto con l'acronimo EGR ("Exhaust Gas Recirculation") (Fig.3.1), è un sistema che consiste nel prelevare parte dei gas esausti (5-15 %) dal condotto di scarico e le si inviano all'ambiente di aspirazione, i quali si miscelano con la carica fresca entrante nel cilindro, il flusso è regolato con una apposita valvola (valvola EGR) collegata alla centralina, essa regola l'apertura della valvola, tale apertura avviene a carico parzializzato. Grazie a tale tecnica vengono ridotti gli NO_x , tuttavia si limita fortemente le prestazioni motoristiche.

I gas di scarico riciclati all'aspirazione sostituiscono parte dell'aria entrante, riducendo la quantità di ossigeno e rendendo la combustione più lenta, abbassando le temperature di combustione.

Bisogna tenere presente che all'aumentare della quantità di gas di scarico riciclati, aumenta il particolato; questo perché si riduce la presenza di ossigeno nell'aria aspirata perché i gas di scarico, ormai poveri di ossigeno, si mescolano con l'aria fresca.

Questo porta a una combustione meno ricca di ossigeno, ostacolando l'ossidazione completa delle particelle di carbonio che si generano durante la combustione. Ne consegue che il particolato prodotto non riesce a bruciare del tutto, finendo allo scarico. Inoltre, i gas riciclati, composti in gran parte da CO_2 e vapore acqueo, agiscono come diluenti e rallentano la velocità della combustione, creando piccole zone in cui la miscela è localmente più ricca: proprio queste zone sono le principali responsabili della formazione di particolato.

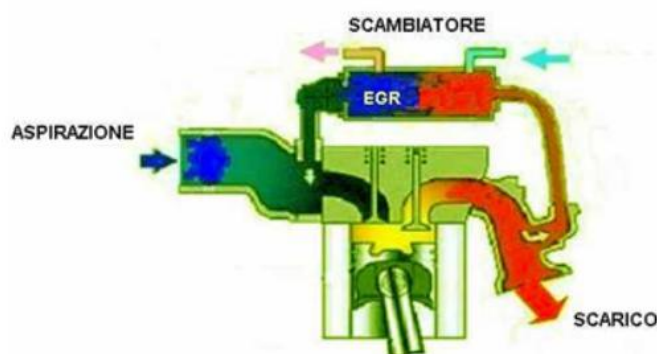


Fig. 3.1 Schema funzionamento EGR [19]

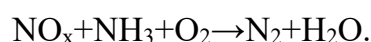
La valvola EGR venne introdotta a partire dagli anni '90 sulle auto Diesel, divenne obbligatoria a partire dal 2001 con la normativa Euro3 sull'inquinamento. Tuttavia esistono ulteriori metodi che hanno lo scopo di diminuire il quantitativo di nocivi agendo a monte del cilindro: innanzitutto si deve scegliere opportunamente l'istante di

avvio iniezione, da cui dipende lo sviluppo di temperatura e pressione nel cilindro, uso di pressioni di iniezione del gasolio più alte, consentendo una maggiore polverizzazione del combustibile e quindi diminuendo il rischio di formazione di HC e particolato, inoltre si effettuano più iniezioni, riducendo gli NO_x grazie a picchi di temperatura più basse, avendo una combustione più completa si riduce la formazione di particolato e idrocarburi incombusti, si ottimizza le geometrie dei condotti di aspirazione e dei cilindri, consentendo una turbolenza della carica fresca e quindi una miscelazione con il gasolio più efficiente, infine servendosi di gasolio con caratteristiche migliori, privo di zolfo, evito il problema di andare ad inibire i catalizzatori posti a valle dello scarico.

Le più stringenti normative anti-inquinamento (normativa Euro 6) hanno imposto l'introduzione di sistemi di abbattimento dei gas di scarico a valle dello scarico, poiché solamente con il ricircolo dei gas esausti e con le tecniche di trattamento a monte del cilindro non si riusciva a rimanere entro il range concesso dalla normativa.

A tal scopo è stato sviluppato un sistema utile ad abbattere gli ossidi di azoto, esso si chiama SCR ("Selective Catalytic Reduction"), essa consiste nell'iniettare una soluzione di urea in acqua demineralizzata (nota in commercio con il nome di Ad blue) a monte del convertitore catalitico in misura del 2-5% della portata del combustibile.

La soluzione di urea viene introdotta nei gas di scarico, decomponendosi in CO₂ e NH₃ (ammoniaca), quando i gas passano nel convertitore l'ammoniaca reagisce con gli NO_x, secondo la reazione (Eq.3.1):



Eq.3.1 Equazione riduzione catalitica [3]

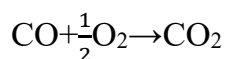
Come si evince, gli ossidi di azoto si sono trasformati in N₂ (azoto) e H₂O (acqua), sostanze assolutamente innocue.

Il convertitore è costituito da una struttura a nido d'ape ceramica, i cui canali hanno un rivestimento di ossidi di metalli nobili (vanadio, tungsteno e titanio), capace di far avvenire a temperature relativamente basse la reazione sopra citata.

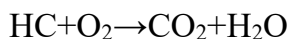
Altro modo per abbattere gli ossidi di azoto, è il sistema LNT (“Lean No_x Trap”), trattasi di un catalizzatore costituito da ossidi di bario e di potassio, che hanno lo scopo di trattenere gli NO_x; quando il catalizzatore si satura, la centralina arricchisce la miscela, in modo da liberare gli NO_x intrappolati, essi trovandosi in un’atmosfera ricca di CO e HC, reagiscono e si trasformano in azoto, acqua e anidride carbonica, rigenerando così il catalizzatore.

Questo sistema è stato usato soprattutto sui Diesel Euro 5 e in alcuni Euro 6 di piccola cilindrata, mentre i veicoli più grandi e pesanti montano quasi sempre SCR.

Invece per abbattere gli HC e il CO, si è introdotto un catalizzatore, detto DOC (“Diesel Oxidation Catalyst”), esso è costituito da un monolite a nido d’ape ceramico, al suo interno le pareti sono rivestite da metalli nobili, quali Platino (Pt) e Palladio (Pd), essi provocano l’ossidazione di CO in CO₂ e quella di HC in H₂O, secondo le reazioni (Eq. 3.2 e Eq.3.3):

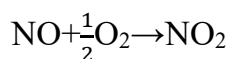


Eq.3.2 Equazione ossidazione CO [3]



Eq.3.3 Equazione ossidazione HC [3]

In realtà tale sistema permette anche l’ossidazione di NO (Eq.3.4):



Eq.3.4 Equazione ossidazione NO [3]

l’NO₂ prodotto risulta benefico per il filtro antiparticolato (di cui se ne illustrerà il funzionamento di seguito), poiché permette di ossidare il particolato intrappolato nel filtro a temperature più basse.

Esso per permettere una riduzione significativa degli inquinanti deve raggiungere una temperatura minima (light-off) [3], altrimenti le reazioni sopra indicate non avvengono, questa temperatura è di 200-250°C, quindi il catalizzatore non riesce a svolgere il suo compito quando il motore lavora a freddo. Inoltre se nel carburante è presente zolfo, esso potrebbe danneggiare il DOC, creando ossidi di zolfo che vanno ad intasare il catalizzatore e peggiorare le emissioni.

A questo punto, si analizzano i sistemi per abbattere l'inquinante più consistente nei motori Diesel: il particolato.

Vista l'evoluzione di sistemi anti-inquinamento, per ridurre la produzione di particolato, si potrebbe agire sull'ottimizzazione della geometria dei condotti di aspirazione e della camera di combustione per favorire i moti turbolenti e conseguentemente avere una miscelazione più omogenea tra combustibile e comburente, si potrebbe usare un combustibile con caratteristiche migliori, prevedendo una drastica riduzione del tenore di zolfo presente al suo interno. Questi sistemi agiscono a monte; tuttavia il migliore sistema per diminuire lo scarico in atmosfera di particolato, è quello di agire a valle dei cilindri, in tal senso è stato introdotto un filtro che intrappola il particolato; questo filtro è più comunemente noto come DPF ("Diesel Particulate Filter") o FAP ("Filtro Antiparticolato").

Solitamente il FAP (Fig. 3.2) è costituito da un corpo ceramico (carburo di silicio) con all'interno elementi cilindrici monolitici che formano canali disposti assialmente e chiusi all'estremità, costringendo i gas di scarico ad attraversare le pareti porose dei canali che trattengono le particelle di particolato [3].

Periodicamente (tipicamente ogni 10 h di funzionamento) il filtro viene rigenerato, ossidando le particelle carboniose accumulate; per far ciò alcuni sistemi si basano sull'aumento delle temperature dei gas di scarico, per realizzare ciò si inseriscono dei bruciatori o delle resistenze elettriche oppure si strozza il condotto di scarico, aumentando inevitabilmente la temperatura dei gas; altri sistemi abbassano la temperatura minima di inizio combustione.

Il DPF è stato introdotto con la normativa Euro 4 nel 2009, ma alcune case automobilistiche, come il gruppo Peugeot-Citroen, lo iniziarono a montare già a partire dal 2000.

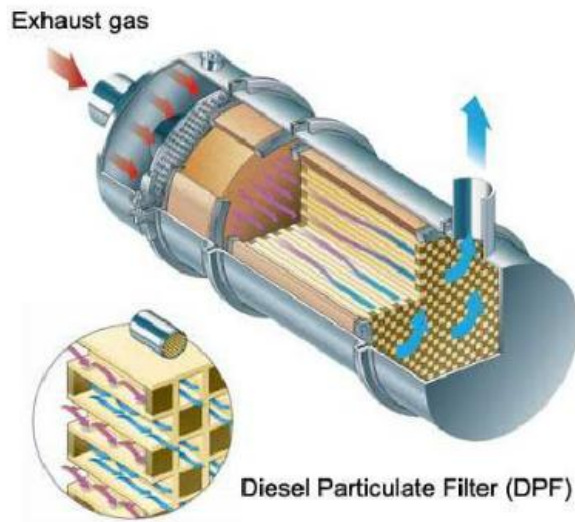


Fig. 3.2 Filtro antiparticolato [20]

E' stato sviluppato un sistema chiamato CRT ("Continuously Regenerating Trap"), che unisce il DOC con il FAP, esso è stato progettato per ridurre drasticamente il particolato e per garantire una rigenerazione naturale del filtro, senza dover ricorrere troppo spesso a rigenerazioni forzate.

4. Iniezione del motore Diesel

Il motore Diesel impiega come combustibile il gasolio, esso è molto volatile e pertanto deve essere iniettato direttamente nella camera di combustione (motore ad iniezione diretta), mescolandosi con l'aria.

Qui nasce la prima problematica dei motori Diesel; il gasolio non riesce a miscelarsi con l'aria, cosa che invece avviene nei motori benzina ad iniezione indiretta, in cui il combustibile viene iniettato nel collettore di aspirazione e perciò ha tutto il tempo per mescolarsi con l'ossigeno prima della combustione.

Vediamo il percorso compiuto dal combustibile prima di essere iniettato nel cilindro e partecipare alla combustione:

Il gasolio dal serbatoio viene aspirato da una pompa volumetrica e portato all'unità di iniezione, non prima però di aver attraversato diversi sistemi di filtraggio; infatti poiché il sistema di iniezione ha giochi e accoppiamenti dell'ordine di μm , sono indispensabili filtri per evitare l'otturazione dei canali; di solito essi sono tre: il primo blocca le particelle di impurità più grosse, fino a qualche centesimo di mm e raccoglie l'acqua presente nel gasolio, il secondo filtra quelle più piccole, fino a pochi μm , mentre il terzo viene situato a valle della pompa per eliminare le impurità sfuggite ai primi due.

L'eccesso di combustibile che giunge all'unità di iniezione per raffreddare quest'ultimo e per sopperire alle perdite di carico viene riportato al serbatoio.

Esistono due organi principali del sistema di iniezione, una pompa volumetrica che mette il combustibile in pressione e fornisce il flusso necessario di combustibile e un iniettore che permette l'introduzione del gasolio nel cilindro, molto spesso gli organi di collegamento tra i suddetti elementi sono eliminati, realizzando un gruppo iniettore-pompa.

4.1 Sistema iniettore pompa

Esistono diverse soluzioni del gruppo iniettore-pompa:

si può prevedere una pompa per ogni cilindro, con l'iniettore che si apre automaticamente all'arrivo del combustibile in pressione;

altra soluzione è costituita da una pompa singola che invia il combustibile ai diversi iniettori grazie ad un distributore;

la pompa fornisce una portata superiore a quella desiderata dai cilindri all'accumulatore, da esso il combustibile viene inviato nei diversi iniettori, essi vengono aperti tramite l'azione di una camma che lavora in sinergia con il motore; talune volte lo spillo dell'iniettore, la cui apertura determina l'introduzione del gasolio in camera, funge da pompante (sistema Cummins) [21].

I sistemi ora descritti si servono di sistemi meccanici, idraulici che consentono l'apertura degli iniettori, l'introduzione di combustibile nel cilindro. Tuttavia negli ultimi decenni si sono sviluppati sistemi elettronici che consentono di effettuare l'iniezione di gasolio, tenendo presente di moltissimi parametri rilevati dalla centralina (unità di controllo), in questo modo è possibile gestire le iniezioni, rendendole più efficienti e con minor consumi.

La corrente circola all'interno di un solenoide che avvolge lo spillo, generando un campo magnetico indotto che provoca l'alzata dello stesso e l'apertura dell'ugello.

Gli iniettori sono formati da due elementi fondamentali:

- il pulverizzatore, corpo munito di canali ove scorre il gasolio e dallo spillo, premuto contro la sua sede da una molla che controlla l'iniezione;
- il porta pulverizzatore, serve a fissare tramite raccordi filettati il pulverizzatore alla testa del motore [21].

La pressione del combustibile provoca il sollevamento dello spillo, vincendo la risultante elastica esercitata dalla molla, quando tale pressione viene meno, la molla solleva lo spillo bloccando l'afflusso di combustibile nella camera di combustione.

Quando il combustibile attraversa il piccolo foro dell'iniettore, di diametro di 2-3 decimi di mm, a pressioni comprese tra i 30 e i 130 MPa, si nebulizza, ossia si suddivide in particelle piccolissime di diametro variabile, facendo assumere al getto una forma conica, mano a mano che esse si muovono nell'aria, si deformano a causa delle forze aerodinamiche e dalla tensione superficiale del liquido, dividendosi in tal modo in goccioline sempre più piccole, l'atomizzazione delle particelle è legata all'insorgere di oscillazioni sulla superficie del getto uscente dall'ugello che vengono amplificate dall'azione delle forze aerodinamiche. Quando l'ampiezza delle oscillazioni supera un certo valore critico dal getto, si separano legamenti liquidi e gocce (atomizzazione primaria o "breakup" primario). Le gocce formatesi dopo la disintegrazione del nucleo liquido sono sottoposte all'azione combinata di forze di diversa natura che provocano una distribuzione di pressione non uniforme sulla loro superficie. Questo porta alla deformazione della goccia e alla separazione di gocce più piccole (breakup secondario).

Più il diametro medio delle particelle è piccolo (polverizzazione fine), più rapido ed efficace è il processo di formazione della miscela.

La polverizzazione è determinata dai seguenti fattori:

- pressione di iniezione, il cui aumento produce un aumento dell'intensità delle azioni aerodinamiche, migliorando la nebulizzazione del gasolio;
- proprietà del combustibile in termini di tensione superficiale e viscosità; un aumento di quest'ultima rende la polverizzazione meno intensa;
- caratteristiche geometriche dell'iniettore;
- condizioni termodinamiche e fluidodinamiche all'interno del cilindro in termini di intensità di turbolenza e presenza di moti secondari che hanno un effetto fondamentale sull'interazione liquido-gas.

Le altre due caratteristiche salienti dello spray sono: diffusione e penetrazione.

La diffusione indica la lunghezza del getto misurata a partire dall'ugello di iniezione; essa dipende dalla velocità iniziale del getto e dal diametro ed è fortemente influenzata dalla struttura del getto e dall'interazione aria-spray.

La penetrazione è l'angolo di semiapertura del cono tangente al getto in corrispondenza dell'ugello [21].

4.2 Sistema Common Rail

Il più grande avanzamento tecnologico per i motori Diesel riguardante l'iniezione è sicuramente rappresentato dal sistema Common Rail, lanciato verso metà degli anni '80 da Fiat, ceduto poi nel 1994 alla Bosch che lo immise sul mercato nel 1997, installandolo per la prima volta sull'Alfa Romeo 156.

Vediamo il suo funzionamento, facendo riferimento allo schema semplificato di Fig.4.1.

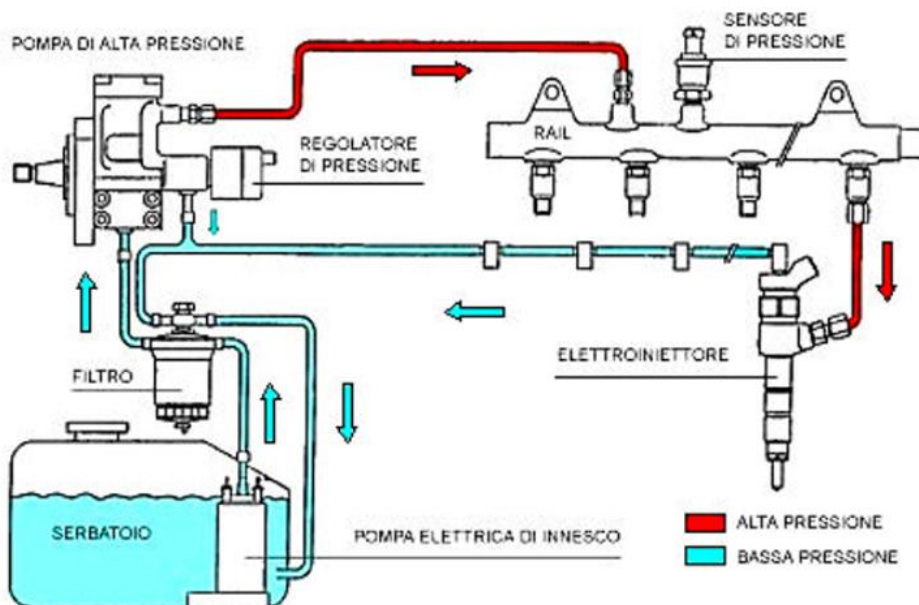


Fig.4.1: Schema sistema Common Rail [22]

Una pompa a bassa pressione porta il gasolio dal serbatoio ad una pompa ad alta pressione, vincendo la quota geodetica e le perdite idrauliche che originano nei condotti, il gasolio, come nel caso degli iniettori-pompa, viene filtrato opportunamente.

Il carburante giunge ad una pompa ad alta pressione (Radialjet), essa porta il gasolio alla pressione di iniezione in camera (1300-1600 bar); tale pompa è alternativa, costituita da tre stantuffi disposti radialmente a 120° rispetto all'asse di rotazione dell'albero della pompa, il moto alternato dei pistoni è assicurato da un eccentrico calettato sull'albero della pompa, a sua volta portato in rotazione dal motore termico, tramite cinghia. La pompa non deve essere in fase con il motore, essa svolge solamente il compito di mantenere in pressione il gasolio, mentre la fasatura e la durata dell'iniezione sono demandati alla centralina. A prevedere la lubrificazione e al raffreddamento di tale pompa è il gasolio stesso, mentre per la regolazione della pressione in mandata è prevista una elettrovalvola comandata dalla ECU (centralina). Il gasolio precedentemente pompato dalla Radialjet, giunge ad un collettore di accumulo (rail), che ha lo scopo di smorzare le oscillazioni di pressione presenti all'interno del combustibile dovute sia alle tre mandate consecutive, che si susseguono durante ogni giro della pompa Radialjet, sia alle aperture periodiche degli iniettori. Sul rail è montato un sensore di pressione il cui compito è quello di fornire un segnale di retroazione al circuito di regolazione della pressione. Più precisamente, il valore misurato da tale sensore viene comparato con il valore nominale previsto e memorizzato nella centralina elettronica. Se il valore misurato ed il valore previsto differiscono, allora viene aperto o chiuso un foro nel regolatore di pressione della pompa di alta pressione. Nel caso di apertura di tale luce, il combustibile in eccesso viene rinviato al serbatoio tramite un apposito condotto di ricircolo. Inoltre può venire anche montata una termocoppia per la misura della temperatura del gasolio nel rail, che potrebbe arrivare anche a 100 °C viste le elevate pressioni, tuttavia soprattutto nell'avviamento a freddo, il gasolio deve essere preriscaldato per permettere una combustione efficace, per assolvere tale compito, sono state introdotte le candele, questi elementi in materiale ceramico raggiungono in pochi secondi alte temperature. Infine il combustibile entra nell'elettroiniettore, esso è costituito da due parti principali: il polverizzatore, composto dall'ugello e dal complesso asta di pressione-spina. L'ugello viene alimentato dal gasolio in pressione quando il complesso asta di pressione-spina è in posizione sollevata.

Il sollevamento di quest'ultima viene realizzato mediante uno squilibrio di forze contrapposte persistenti su tale complesso; l'elettrovalvola ha il compito di controllare la pressione presente nel volume di controllo e quindi di determinare l'istante in cui l'attuatore permette l'inizio della introduzione e la durata della introduzione stessa.

La pressione nel volume di controllo viene determinata dall'apertura e dalla chiusura di un foro da parte di un otturatore a sfera comandato da un solenoide, tramite un ago pilota. In condizioni di riposo l'elettromagnete è diseccitato e l'ago pilota è tenuto in posizione di chiusura da una molla.

Eccitando l'elettromagnete si provoca l'alzata dell'ago pilota, consentendo all'otturatore a sfera di scoprire la luce del foro determinando l'introduzione del gasolio presente nel volume di controllo nel cilindro. Inoltre il gasolio che fluisce all'interno dell'iniettore assolve anche il compito di lubrificante degli organi in moto.

La centralina riceve segnali da diversi sensori: sensore di giri, di fase, di temperatura liquido refrigerante, di velocità, di pressione atmosferica, di sovrappressione, di temperatura dell'aria aspirata, del combustibile, di pressione del gasolio, potenziometro per la posizione dell'acceleratore, misuratore portata d'aria aspirata.

In base ai valori rilevati dai sensori e utilizzando le mappature interne alla sua memoria, la centralina decide la strategia di intervento e di correzione dei tempi di iniezione.

Una nuova centralina elettronica, denominata MULTIJET permette una gestione ancor più flessibile delle modalità di comando dell'iniezione, aumentando il numero di iniezioni effettuabili nell'ambito di un ciclo motore (alcuni motori hanno sviluppato fino ad otto iniezione per ciclo di funzionamento) rispetto al sistema precedentemente in produzione, denominato UNIJET, il quale effettuava una singola iniezione per ciclo. Nel MULTIJET avremo una iniezione pilota effettuata con elevato anticipo rispetto all'iniezione principale, permette di ridurre drasticamente il rumore di combustione, e produce un incremento della coppia ai bassi regimi; una pre-iniezione; effettuata con bassissimi valori di anticipo rispetto all'iniezione principale, permette di contenere le emissioni di inquinanti; una iniezione main, essa costituisce un'iniezione principale la cui durata può essere gestita indipendentemente dalla pressione di iniezione; un'iniezione after; con questo termine si indica un'iniezione effettuata subito dopo l'iniezione principale, con analoghe finalità a quelle della pre-iniezione e infine una post-iniezione, trattasi di un'ulteriore iniezione effettuata nelle ultime fasi della combustione allo scopo di aumentare le temperature di scarico, permettendo la rigenerazione della trappola per il particolato.

La quantità di carburante immessa con il Multijet è analoga a quella immessa con l'Unijet, ma la combustione nel primo caso è più completa e graduale, con conseguente riduzione della rumorosità, dei consumi e dell'immissione della CO_2 [21]. Il sistema Multijet è nato nel 1999 grazie agli studi pionieristici condotti da Fiat, ma la sua prima applicazione su un'auto avvenne nel 2002 sull'Alfa Romeo 156.

Tale sistema è stato adottato da molti marchi, oltre a Fiat, tra i quali Lancia, Opel, Suzuki, Citroen, Peugeot, Jeep e altri con sigle differenti.

5. Combustione nel motore Diesel

Come si è già visto, in un motore ad accensione spontanea, a fine compressione in camera di combustione, grazie all'elevato rapporto di compressione (12-24), si raggiungono temperature dell'ordine dei 500-600 °C e pressioni dai 3-4 MPa, per motori aspirati, fino ai 6 MPa, per motori sovralimentati. Il combustibile viene iniettato sotto forma di spray poco prima che lo stantuffo raggiunga il PMS, miscelandosi con l'aria, dando origine ad una miscela disomogenea che grazie all'ambiente in cui si trova si auto accende, si raggiungono temperature prossime a 2000 °C e pressioni fino a 14 MPa.

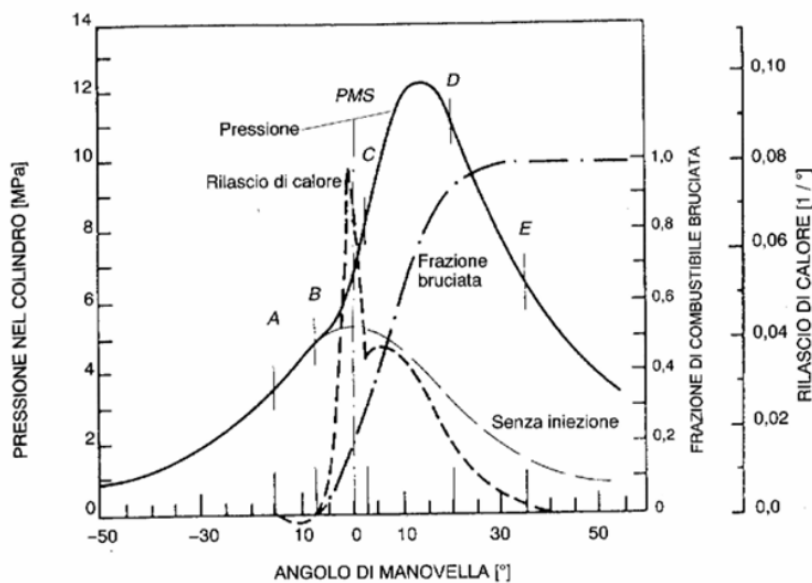


Fig. 5.1: Fasi combustione [23]

Si nota in Fig.5.1, l'andamento della pressione in caso di mancata iniezione di combustibile (linea tratteggiata), quindi senza combustione; si vede che la pressione aumenta fino a PMS, dopodiché essa diminuisce seguendo un andamento parabolico.

Mentre in caso di iniezione e conseguente combustione, l'andamento della pressione è diverso; per descriverlo, suddividiamo il processo di combustione (linea continua) in 4 fasi:

A-B: Ritardo d'accensione: Questa fase ha inizio con l'introduzione nella camera di combustione del gasolio e termina con l'inizio della combustione, ossia quando si registra una discontinuità tra la linea tratteggiata e quella continua dell'1%. Si distinguono due tipi di ritardo: ritardo fisico (disgregazione del getto di combustibile e formazione di goccioline, riscaldamento di queste ultime ed evaporazione, diffusione nell'aria fino a formare una miscela in grado di accendersi) e ritardo chimico (decomposizione degli idrocarburi, loro attacco da parte dell'ossigeno con formazione di perossidi, avvio di reazioni chimiche a catena che portano all'accensione del gasolio). A influenzare il ritardo fisico, intervengono la finezza della polverizzazione del getto (pressione di iniezione e geometria dell'iniettore), le condizioni del moto della carica (geometria della camera, regimi di rotazione); mentre il ritardo chimico dipende dalle dimensioni e dalla geometria delle molecole del combustibile.

Per calcolare il ritardo all'accensione, sono presenti in letteratura diverse formulazioni, ricavate da prove empiriche, che quindi presentano un certo grado di errore rispetto ai rilievi sperimentali. La relazione più famosa è quella di Arrhenius (Eq.5.1):

$$\tau = C \cdot P^n \cdot e^{E_a/R \cdot T}$$

Eq.5.1 Equazione di Arrhenius [3]

ove con C si indica una costante che tiene in considerazione il grado di turbolenza che si ha in camera, con P la pressione, con E_a l'energia di attivazione, ossia quella energia sopra la quale si ha la rottura dei legami intermolecolari dei reagenti, con R la costante dei gas e infine e infine con T la temperatura assoluta in Kelvin.

Come si vede dalla Fig. 4.1, la pressione aumenta, a causa della compressione del pistone, mentre il rilascio di calore è negativo, a causa dell'energia spesa per evaporare il gasolio.

B-C: Combustione premiscelata: le goccioline di combustibile più piccole sono trascinate dalla corrente d'aria in zone dove si trovano circondate da un quantitativo d'aria molto grande, come si vede dalla Fig. 5.2, esse sono presto riscaldate e vaporizzate; in tale zona, prima dell'auto-accensione, i vapori di combustibile e l'aria siano premiscelati non in modo omogeneo, pertanto si formeranno nuclei di accensione, i quali propagano un piccolo fronte di fiamma una volta partita la combustione.

Questa fase conferisce al motore “ruvidità” nel funzionamento, con forti sollecitazioni meccaniche, rumorosità ed forti emissione di inquinanti, in particolare di ossidi di azoto, viste le elevate temperature.

Per ovviare a tale problematica, si è ricorso all’aumento del numero di iniezioni per ciclo, in tal modo da introdurre meno combustibile per ogni iniezione, inoltre le prime iniezioni aumentano la temperatura del cilindro, riducendo il tempo di autoaccensione per le future iniezioni. In tal caso, la pressione e il rilascio di energia termica aumentano significativamente, quest’ultimo raggiunge il suo massimo.

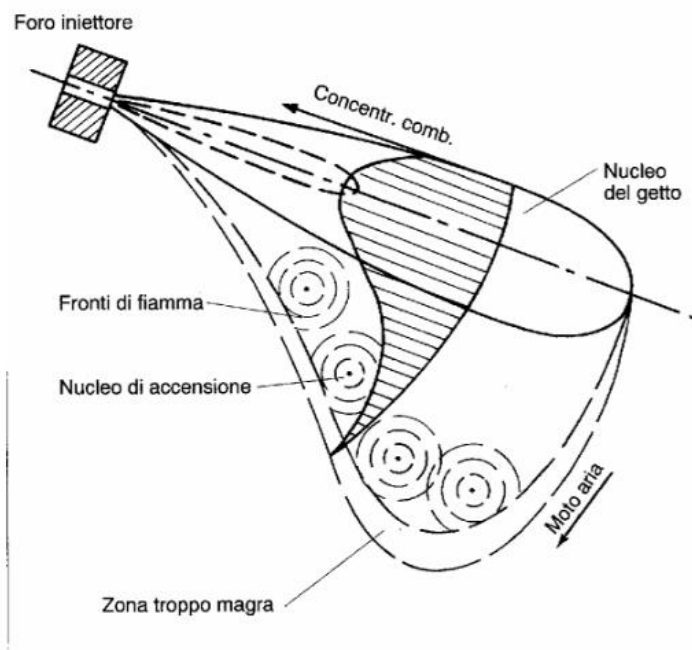


Fig. 5.2: Getto di combustibile gasolio [24]

C-D: Combustione diffusiva: la fiamma quindi si propaga, grazie a fenomeni diffusivi, verso il nucleo dello spray, dove si hanno gocce di dimensioni maggiori, queste ultime evaporano velocemente.

D-E: Completamento della combustione: anche se la combustione è terminata, gli ultimi vapori di combustibile continuano ad ossidarsi fino a tarda espansione, in tale fase avviene anche l’ossidazione parziale del particolato.

Uno dei maggiori problemi del motore Diesel, è rappresentato dal ritardo all’accensione; se esso risulta troppo lungo, buona parte di gasolio viene introdotta prima che la combustione avvenga, con conseguenti picchi di pressione una volta che essa si avvia.

Il ritardo all'accensione dipende non solo, come è intuibile, dalle condizioni di funzionamento del motore, ma anche dalle proprietà chimiche e fisiche. Si è coniata una misura dell'accendibilità del combustibile: il numero di Cetano [3].

Per determinarlo, si effettuano prove sperimentali su un motore ricerca monocilindrico con rapporto di compressione variabile, ciò è reso possibile grazie allo spostamento verticale della testa. Tale motore assume il nome di CFR ("Cooperative Fuel Research") [3], dal nome del comitato che ha normalizzato tale prova. Questo motore presenta l'albero motore collegato ad un motore elettrico rotante a velocità costante, si alimenta con una miscela costituita da Cetano (esso è più facilmente vulnerabile dall'ossigeno, perciò presenta per convenzione un valore di accendibilità pari a 100) ed Eptametilnonano (esso è maggiormente resistente all'ossidazione, pertanto è stato attribuito un valore alla sua accendibilità pari a 15).

Il numero di Cetano sarà dato dalla somma della percentuale di Cetano presente nella miscela e dal 15 % di Eptametilnonano, tale indice solitamente assume valori intorno a 50-52 per un motore Diesel.

La prova consiste nell'andare ad alimentare il motore CFR con il combustibile in esame, variando il rapporto di compressione fino ad avere un ritardo di accensione di 13° a 900 rpm rispetto al PMS. Fissato ora tale rapporto di compressione, si ripete la procedura con diverse miscele di Cetano ed Eptametilnonano, fino ad avere lo stesso valore di ritardo all'accensione; la miscela che eguaglia i rapporti di compressione definisce il numero di Cetano.

6. Moti dell'aria all'interno dei cilindri

All'interno dei cilindri, il flusso è turbolento e caratterizzato da vortici di dimensioni variabili, in tale ambiente si generano fluttuazioni di velocità, temperatura, densità, pressione e concentrazione. Queste fluttuazioni hanno influenza sulle reazioni, sul rilascio del calore e sulla struttura della fiamma.

Oltre alla turbolenza, il moto all'interno del cilindro di un motore a combustione interna è caratterizzato dalla presenza di moti secondari organizzati di tipo rotatorio; per imprimere all'aria entrante nella camera di combustione tali moti, si sono sviluppate diverse tecniche:

- Si adotta uno schermo sulla parete della circonferenza delle valvole di aspirazione, in modo da imporre al flusso una direzione preferenziale;
- si sono realizzati dei condotti di aspirazione orientati, tali da conferire al getto uscente dalla valvola un flusso orientato verso la parete del cilindro, che impone all'aria un moto rotatorio di swirl;
- si potrebbe pensare di costruire condotti di aspirazione elicoidali in modo da imprimere al flusso entrante un moto rotatorio.

Le soluzioni descritte servono ad originare un moto rotatorio organizzato dell'aria su un piano circonferenziale perpendicolare all'asse del cilindro: moto di Swirl (Fig. 6.1) [21].

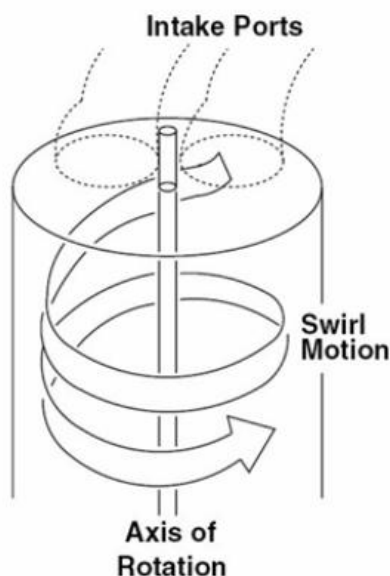


Fig. 6.1 Moto di Swirl [25]

Inoltre esistono altre tipologie di moti.

Il moto Tumble (Fig. 6.2) è un moto rotatorio organizzato su un piano passante per l'asse del cilindro che si forma durante la fase di aspirazione ed è intensificato durante la fase di

compressione, è diretta conseguenza dell'interazione del flusso d'aria con le pareti del cilindro, perciò non sono previste particolari strutture per originarlo, tuttavia disegnando il gruppo condotto/valvole di aspirazione in maniera da aumentare la componente di velocità perpendicolare all'asse e dirigendo il flusso sotto la valvola di scarico si intensifica tale moto. Con esso si andrà ad aumentare il mescolamento della carica, favorendo e accelerando la combustione.

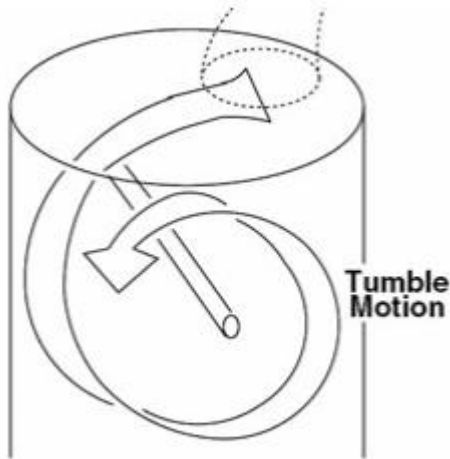


Fig. 6.2 Moto Tumble [26]

Infine il moto di Squish (Fig. 6.3) indica il moto rotatorio organizzato della carica su un piano contenente l'asse del cilindro. Tale moto si genera a fine compressione per interazione fra il flusso d'aria e le pareti del cilindro, nei motori ad accensione spontanea viene ottenuto tramite incavatura ricavata nel cielo del pistone (Fig. 6.4).

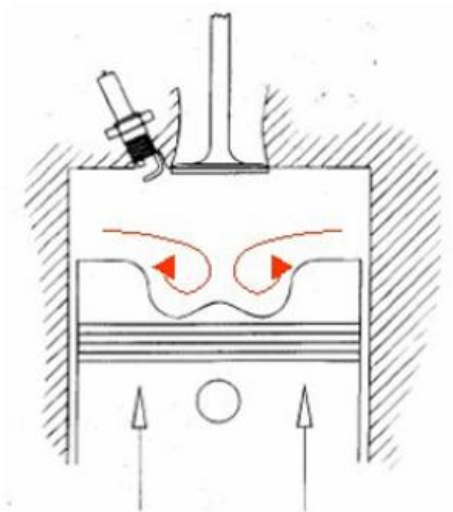


Fig. 6.3 Moto di Squish Diesel [27]



Fig. 6.4 Incavatura cielo pistone motore [28]

Nei motori Diesel, nell'ultima fase della compressione, quando cioè comincia l'iniezione del combustibile, il campo di moto è prodotto dall'interazione fra il moto di Swirl e il moto di Squish. In generale, il risultato globale prodotto dalla turbolenza e dai moti di Swirl e di Squish è quello di ridurre la penetrazione e favorire la polverizzazione, l'evaporazione e il miscelamento aria-combustibile.

I moti appena menzionati sono stati scoperti negli anni '80-'90 del secolo scorso e sono ancora in continuo studio. Prima di allora, per rendere la miscelazione più completa furono sviluppati dei sistemi di travaso che "lavano" le pareti del cilindro con aria fresca e creano un moto all'interno di esso, favorendo il legame aria-combustibile polverizzato; successivamente venne modificata la geometria della camera di combustione e delle valvole per permettere al carburante di miscelarsi con maggior facilità con l'aria [21].

7. Motore Diesel a due tempi

Sinora si è descritto il motore Diesel a quattro tempi (4T), tuttavia nelle applicazioni nautiche, per la propulsione navale, in alcune applicazioni stazionarie, ad esempio per la produzione di energia elettrica, o in passato nel movimento terra o nei trasporti pesanti, vengono impiegati motori Diesel a due tempi (2T), questo a causa del loro rapporto peso-potenza superiore rispetto ai motori a 4T, che li rende più leggeri e potenti.

Il ciclo di funzionamento è rappresentato in Fig. 7.1 ed è caratterizzato dalle seguenti fasi:

Il pistone, scendendo verso il PMI scopre le luci di scarico, consentendo una prima evacuazione dei gas di scarico, poi la luce di aspirazione, attraverso la quale viene immessa, grazie alla pompa di lavaggio, aria pura in leggera pressione (0,2-0,3 bar); l'aria fresca andrà a lavare le pareti del cilindro, costringendo i gas esausti ad essere evacuati.

Lo stantuffo sale poi verso il PMS (1-2), comprimendo l'aria nella camera di combustione adiabaticamente a pressione compresa tra i 32 e i 36 bar, poco prima che il pistone giunga il punto morto superiore, il pulverizzatore inietta gasolio, il quale entra a contatto con l'aria calda, si auto accende (2-3) mantenendo costante la pressione, il pistone viene quindi spinto verso il basso, grazie alla combustione, secondo un processo adiabatico (3-3'). La fase di espansione termina appena viene scoperta dal pistone la luce di scarico (in 3'), causando una rapida diminuzione di pressione nel cilindro, dopodiché viene aperta la luce di aspirazione (in 4'), permettendo all'aria di entrare e di reiterare il ciclo.

Ovviamente quanto descritto riguarda il ciclo teorico, nel ciclo reale la fase di espansione e compressione non avvengono senza scambio di calore con l'esterno, bensì seguono trasformazioni politropiche, anche la combustione non avviene a pressione costante, inoltre dal lavoro prodotto si deve detrarre quello speso per azionare la pompa di lavaggio.

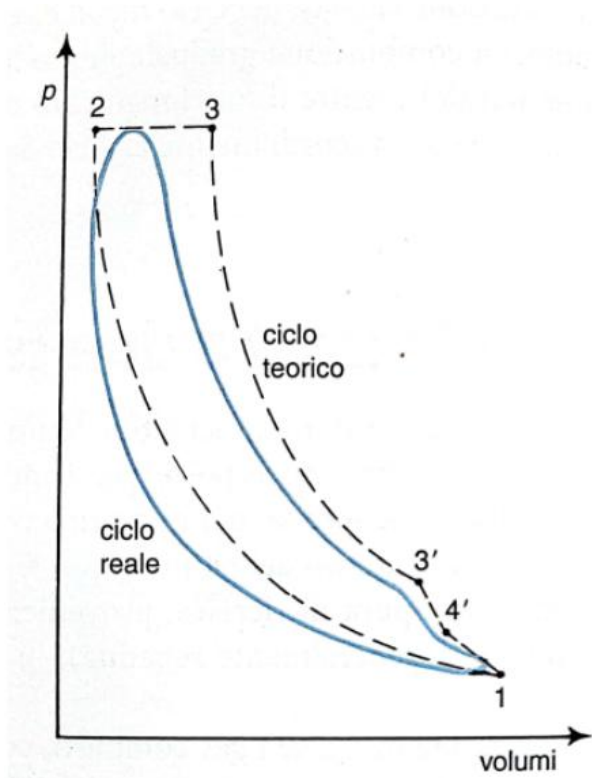


Fig. 7.1 Ciclo teorico e reale motore Diesel 2T [29]

La fase di lavaggio è molto più efficace rispetto agli omologhi motori a benzina, in quanto durante l'immissione, si ha un eccessivo quantitativo d'aria.

Per aumentare l'effetto lavaggio, è stata sviluppata una tecnica, applicata in particolare nei motori marini, che prevede l'introduzione di una valvola a stantuffo posta nella testata e azionata da un albero a camme, essa scorre in una camera cilindrica, le cui pareti presentano una serie di luci di scarico. Quando il pistone è al PMI, la valvola si alza e scopre le luci di scarico consentendo un primo deflusso dei gas esausti, dopodiché lo stantuffo apre le luci di aspirazione dalle quali entra nel cilindro aria pura che spazza via i gas di scarico rimanenti.

Il sistema ora descritto risulta complesso, visto la presenza di un albero a camme; tuttavia per renderlo più semplice si è pensato di sostituire le valvole comandate con valvole automatiche, la cui apertura è resa possibile grazie alla differenza di pressione tra i due ambienti che separa [30].

8. Evoluzione motore Diesel: motore a precamera, iniezione indiretta, Common-Rail

Il motore Diesel deve il nome al suo inventore: Rudolf Diesel, ingegnere tedesco che nel 1892 depositò a Berlino il brevetto del motore che avrebbe cambiato la storia della

motoristica; nel 1897 costruì il primo prototipo del motore, presentato poi nel 1900 all'Expo di Parigi.

Questo motore venne introdotto in un primo momento nel settore agricolo, navale e industriale, solo più tardi venne adottato dal settore automobilistico.

Venne adottato inizialmente dall'azienda tedesca MAN (oggi nota per la produzione di veicoli industriali) per l'alimentazione della centrale elettrica di Kiev.

Dopodiché venne introdotto nel settore sottomarino e navale: dapprima viene montato su piccoli velieri e battelli, per poi, nel 1912, essere introdotto in navi di grandi dimensioni, che compivano traversate transoceaniche.

Nel medesimo anno venne costruito il primo treno a trazione con motore Diesel.

Oramai tale motore vantava di una grande stima da parte del mercato, tant'è che nel 1928 venne montato sui primi aerei, conquistando anche il campo dell'aeronautica.

Vista la grande affidabilità dei suddetti motori, nel 1936 venne installato su la prima vettura: Mercedes-Benz 260D, mentre per quanto riguarda il settore automobilistico italiano, si dovette attendere fino a metà degli anni '50 per vedere montato il motore Diesel su un autovettura di serie: la Fiat 1400.

Inutile affermare che il motore Diesel ha subito, nel corso degli anni, una notevole evoluzione, adottando soluzioni e tecniche sempre più performanti, volte ad abbattere i consumi e le emissioni inquinanti.

Tuttavia il ritardo con cui il motore Diesel conquistò il settore automobilistico fu dovuto al fatto che esso durante il funzionamento emetteva un livello di rumore e di vibrazioni meccaniche, molto maggiore rispetto ad un motore benzina, di pari cilindrata e potenza. Questo rumore era dovuto al ritardo di accensione che contraddistingue questo motore; per ovviare questa problematica è stato sviluppato il motore a precamera o ad iniezione indiretta.

Essa era caratterizzata da un vano cilindrico o sferico ricavato nella testata del motore, su un lato è collocato l'iniettore, su un altro lato è presente un condotto che comunica con il cilindro, inoltre si ha una candele, per il riscaldamento del gasolio in fase di avviamento a freddo.

Immettendo gasolio a monte della camera di combustione, esso riesce a miscelarsi con l'aria in maniera più omogenea e quindi andrà a limitare il ritardo di accensione, limitando i picchi di pressione, i quali riducono gli stress sui componenti meccanici e quindi la rumorosità.

Di contro questi motori limitavano il rendimento termodinamico, in quanto la precamera aumenta le perdite di calore a parete, per tale motivo essi sono stati abbandonati e soppiantati dai motori ad iniezione diretta comandando l'iniezione con una centralina.

L'iniezione diretta era già nota, ma applicata solamente su autocarri e motori navali di grandi dimensioni; ad inizio degli anni '50, Fiat condusse studi pionieristici per l'introduzione dell'iniezione diretta nei motori Diesel su autovetture, detti studi sfociarono nel 1956, nella presentazione della Fiat Croma, prima auto a montare un motore Diesel ad iniezione diretta.

Rimaneva, però, il problema degli elevati consumi e seppur la rumorosità era diminuita rispetto ai motori a precamera, restava comunque un difetto da risolvere.

Negli anni '90 venne inventato dal fisico italiano Mario Ricco il sistema di iniezione "Common Rail", introdotto nel 1997 nel settore automobilistico, con Alfa Romeo 157, questa soluzione portò oltre a ridimensionare i consumi e le emissioni inquinanti, a limitare la rumorosità sino ad ora tipica dei Diesel.

Oggigiorno, tutti i motori Diesel per trazione, impiegano il Common Rail, l'ultima casa automobilistica ad adottarlo fu Volkswagen, essa rimase fedele agli iniettori-pompa fino al 2009 quando dovette abbandonarli a causa dell'impossibilità di adeguare il sistema ad iniettore-pompa alle normative anti-inquinamento Euro 5.

9. Diesel negli ultimi anni: normative

Oggigiorno, in seguito alle normative anti-inquinamento sempre più stringenti e allo scandalo Volkswagen, il Diesel è stato limitato e alcune case automobilistiche lo hanno completamente abbandonato, privilegiando combustibili alternativi.

Nel 2023 è stata ratificata una normativa da parte del parlamento europeo (Regolamento UE 2019/631) [31], che prevede il divieto alla vendita di autovetture con motore Diesel o benzina a partire dal 2035, con l'obiettivo di diminuire drasticamente le emissioni inquinanti, pertanto moltissime case produttrici di vetture stanno sviluppando nuovi sistemi di trazione, come l'elettrico o l'ibrido.

Inoltre il 1° Ottobre 2025, doveva entrare in vigore in Lombardia, Veneto, Emilia-Romagna e Piemonte il divieto di circolazione dei mezzi Euro 5 nei centri urbani con più di 30000 abitanti; tuttavia è stata posticipata l'entrata in vigore di un anno (1° Ottobre 2026), e riguarda le città con un numero di abitanti superiore ai 100000 e solamente nei mesi autunnali e invernali, dove si registrano maggiori quantità di inquinanti nell'aria [32].

Inoltre in moltissime città italiane, attualmente sono previsti blocchi della circolazione per veicoli meno recenti, come Diesel Euro 4 o precedenti o benzina fino a Euro 2, in caso di allerta smog, possono essere estese fino all' Euro 5.

Vediamo ora meglio gli standard europei sulle emissioni inquinanti.

Si tratta di una sigla “ Euro” seguita da un numero arabo (per veicoli comuni) o da un numero romano (per veicoli industriali); questi numeri sono stati introdotti in modo progressivo dall'UE, con caratteristiche sempre più restrittive che riguardano le emissioni dei veicoli, misurate in g/kWh (per veicoli industriali) o in g/km (per altri veicoli).

Attualmente si hanno 6 classi di emissioni inquinanti, nel novembre 2026 entrerà in vigore la normativa Euro 7. L'insieme di veicoli omologati prima del 1992 vengono più comunemente chiamati “ Pre-Euro” o “ Euro 0”.

Nella tabella sottostante (Tab. 1) sono riportate le varie classi, con il relativo anno in cui sono entrate in vigore e il quantitativo massimo di inquinante che il motore può emettere. Tra gli inquinanti figurano il monossido di carbonio, gli ossidi di azoto, gli idrocarburi incombusti e il particolato; mentre non si palesa l'anidride carbonica CO₂, poiché quest'ultima non è considerata un inquinante, bensì un climalterante.

Tuttavia la sua emissione viene regolamentata, siccome è la principale responsabile dell'effetto serra.

Classe	Data di approvazione	Data di immatricolazione	CO	NOx	HC+NOx	PM
Diesel						
Euro 1	giugno 1992	gennaio 1993	2,72	-	0,97	0,14
Euro 2	gennaio 1996	gennaio 1997	1	-	0,7	0,08
Euro 3	gennaio 2000	gennaio 2001	0,66	0,5	0,56	0,05
Euro 4	gennaio 2005	gennaio 2006	0,5	0,25	0,3	0,025
Euro 5	settembre 2009	gennaio 2011	0,5	0,18	0,23	0,005
Euro 6	settembre 2014	settembre 2015	0,5	0,08	0,17	0,0045
Euro 7	luglio 2025	novembre 2026	0,5	0,08	0,17	0,0045

Tab. 1 Standard europei sulle emissioni di autoveicoli [33]

Per accertare il rispetto dei suddetti limiti, si effettuano prove del motore. In origine, si effettuava il “ New European Driving Cycle” (NEDC) [34], esso era costituito dalla ripetizione di quattro cicli urbani a una velocità massima di 50 km/h e uno extraurbano alla velocità massima di 120 km/h. La durata complessiva del ciclo era di mezz’ora circa. Il ciclo era effettuato con vettura a motore inizialmente a temperatura ambiente. I punti di cambiata erano predefiniti per vetture con cambio manuale, liberi per quelle con cambio automatico. Questa prova è stata abbandonata nel 2017 poiché era considerata poco realistica e poco rappresentativa della guida reale, al suo posto è subentrata la prova WLTP (“Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure”), in tale prova vengono applicati tre diversi cicli, a seconda della classe del veicolo definita dal rapporto peso/potenza (PWr):

- Classe 1: veicoli a bassa potenza con $PWr \leq 22$
- Classe 2: veicoli con $22 < PWr \leq 34$
- Classe 3: veicoli ad alta potenza con $PWr > 34$

Le auto più comuni hanno oggi rapporti di potenza di 40-100 kW/t, quindi appartengono alla classe 3; furgoni e autobus possono anche appartenere alla classe 2.

In ogni classe, ci sono diversi test di guida progettati per rappresentare il funzionamento di veicoli reali su strade urbane, extraurbane e autostrade; vengono riprodotte le condizioni di guida (resistenza al movimento, cambio marcia, peso totale della vettura (incluso equipaggiamenti opzionali, merci e passeggeri), qualità del carburante, pressione degli pneumatici).

10. Futuro motore Diesel: Combustibili naturali

Sicuramente, visto le diverse normative per diminuire le emissioni inquinanti, molte case automobilistiche, negli ultimi anni, si sono prefisse l'obiettivo di progettare vetture con motori a emissioni zero, o comunque meno inquinanti.

Una soluzione alternativa al motore elettrico, che non prevede quindi modifiche significative del motore è rappresentata da combustibili naturali, essi sono l'e-fuel e il biofuel.

Per quanto riguarda l'e-fuel, esso si ottiene con il processo di elettrolisi dell'acqua, in cui si fa attraversare l'acqua da una corrente elettrica, così facendo l'idrogeno si scinde dall'ossigeno, concentrandosi attorno al catodo; contemporaneamente si cattura dall'aria che passa attraverso filtri anidride carbonica. In seguito alla miscelazione di idrogeno e anidride carbonica e altre sostanze catalizzanti, si ottiene l'e-metanolo, dal quale tramite processi successivi si ricava l'e-kerosene, con il quale si alimentano gli aerei e l'e-fuel idoneo per i motori delle autovetture. Questo combustibile richiede molta acqua per essere prodotto, si stima circa due litri di acqua per ogni litro di combustibile prodotto, tuttavia si è pensato di utilizzare l'acqua del mare, desalinizzandola, così da non sprecare acqua potabile. Inoltre l'e-fuel necessita di molta energia elettrica per essere realizzato, se però si pensa di ricavare quest'ultima da fonti rinnovabili, l'impatto ambientale sarebbe pari a zero, dato che inoltre i motori alimentati con questo combustibile non emettono particolato.

Le aziende che hanno investito in questo nuovo combustibile sono ancora poche, tra di loro figurano la Mazda e la Porsche, quest'ultima ha realizzato un impianto di produzione di detto combustibile in Patagonia, dove è possibile sfruttare i forti e costanti venti che vi soffiano per produrre energia elettrica.

Un altro combustibile naturale è il biofuel o biodiesel, viene prodotto da materie prime di scarto come oli esausti, oli vegetali (colza, girasole) e grassi animali [35].

Viene prodotto dalla transesterificazione dei prodotti sopra indicati, questa reazione prevede la rottura dei trigliceridi (la base degli oli) per ottenere esteri alchilici a catena lunga e glicerina [36].

La percentuale di miscela di biodiesel è indicata da un fattore "B": B100 rappresenta biodiesel puro, mentre miscele come B20 contengono il 20% di biodiesel, mentre il resto è gasolio tradizionale.

Solitamente non viene mai utilizzato puro, ma sempre miscelato con il Diesel classico, i motori con sistema common rail hanno limiti rigorosi di B5 o B20.

Tali miscele sono impiegate dagli ultimi decenni nel settore ferroviario e nel settore dell'automotive; pioniera di questo nuovo combustibile fu la Chrysler che nel 2005 lanciò i motori Liberty CRD funzionanti con miscela di biodiesel al 5%. Il gruppo Volkswagen ha reso molti suoi motori compatibili con le miscele B5 e B100 di biofuel.

Altri campi di impiego del biodiesel sono il riscaldamento domestico, infatti esso può venire utilizzato per alimentare caldaie, oppure viene impiegato per produrre corrente elettrica da generatori, soprattutto in quelle aree densamente affollate di persone.

La produzione di biodiesel è aumentata nel corso dell'ultimo decennio in modo significativo, anche grazie a politiche promosse dai vari stati che prevedono la miscelazione del gasolio con biofuel. Nel 2006 la produzione mondiale di biodiesel era di 5-6 milioni di tonnellate, di cui 4,9 milioni prodotte in Europa e la restante parte negli USA. Nel 2008 la produzione europea era di 7,8 milioni di tonnellate. A partire dal 2018, l'Indonesia è il principale stato produttore di biodiesel a base di olio di palma, con una produzione annua di 3,5 milioni di tonnellate, di cui 1 milione viene esportato all'estero.

Bisogna evidenziare che l'aumento dell'uso di biodiesel comporta una riduzione importante di gas serra. Secondo l'Agenzia per la Protezione Ambientale, il biodiesel ricavato dall'olio di soia comporta, in media, una riduzione del 57% delle emissioni di gas serra rispetto al gasolio derivato dal petrolio, mentre il biodiesel prodotto da grassi di scarto comporta una riduzione fino all'86%.

Tuttavia molte associazioni ambientaliste criticano la coltivazione di piante utilizzate per la produzione di biodiesel, ad esempio palme da olio, soia e canna da zucchero, poiché hanno comportato il disboscamento delle foreste pluviali, aggravando il cambiamento climatico e distruggendo molti ecosistemi. Inoltre, i biocarburanti contribuiscono alla fame nel mondo, poiché i terreni coltivabili non vengono più utilizzati per la coltivazione di alimenti. Tale problema si potrebbe risolvere con il biodiesel algale, che utilizza terreni non adatti all'agricoltura, infatti esso viene prodotto dagli oli estratti dalle alghe. Oltre a ridurre l'effetto serra, esso riduce le emissioni di particolato fino al 50%.

Altro combustibile naturale è l'HVO ("Hydrotreated Vegetable Oil"), olio vegetale idrotrattato. Esso viene prodotto mediante idrotrattamento, un processo che converte trigliceridi da oli esausti, grassi animali e altri scarti vegetali in idrocarburi stabili e adatti all'uso nei motori Diesel. La sua produzione avviene in due fasi: Saturazione con idrogeno: le materie prime sono trattate con idrogeno ad alte temperature (oltre i 300°C) per eliminare ossigeno e legami insaturi, aumentando così la stabilità delle molecole.

Conversione chimica: con la seconda fase, la struttura chimica viene modificata per ottenere idrocarburi alifatici, perfetti per motori Diesel. Questo processo crea un prodotto stabile, sicuro e a bassa emissione di inquinanti.

La produzione dell'HVO e il suo utilizzo nei motori riducono complessivamente le emissioni di CO₂ fino al 90% rispetto al Diesel fossile, con un'importante diminuzione del particolato nei gas di scarico e di NO_x. Inoltre l'HVO vanta una maggiore stabilità all'ossidazione, un punto di infiammabilità più alto e prestazioni migliori alle basse temperature, riducendo i costi di manutenzione e prolungando la durata dei motori Diesel.

Nonostante quasi la totalità dei motori Diesel siano tecnicamente compatibili con tale carburante senza apportare modifiche al motore, non tutti i veicoli sono autorizzati ad usarlo; solo alcuni motori Euro 5 e quasi tutti gli Euro 6 sono stati omologati dai costruttori per funzionare con l'HVO.

In Italia, il biodiesel viene utilizzato come combustibile puro per impianti di riscaldamento domestico, mentre per il settore dell'autotrazione è meno impiegato, difatti è disponibile solo in alcuni distributori di carburanti e miscelato al 7% con il gasolio classico.

Inoltre, va evidenziato che l'Italia è quarta produttrice europea di biodiesel [37], con 1,7 milioni di tonnellate annue di produzione, con l'obiettivo di raggiungere una capacità produttiva entro il 2030 di 5 milioni di tonnellate.

11. Futuro motore Diesel: Gasolio-elettrico

Rimane da domandarsi se il motore Diesel possa avere ancora un suo futuro, viste le normative anti-inquinamento sempre più stringenti e limitative.

Sicuramente nell'ambito dell'autotrazione, tale motore è in forte declino, viste le politiche intraprese da molte case automobilistiche di conversione degli impianti per la produzione di vetture elettriche e dalle norme anti-inquinamento che entreranno in vigore nel breve termine.

A conferma di quanto detto, basti osservare i numeri delle vendite delle auto con motore ad accensione spontanea: a Febbraio di quest'anno le immatricolazioni delle auto Diesel sono calate del 38,5% rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente, arrivando a 13574 unità contro le 22088 del 2024 [38], anche il settore dell'usato non è risparmiato da tale diminuzione di vendite, registrando un significativo calo rispetto agli anni precedenti.

Anche a livello europeo, il decremento di vendite non è da meno: si registra infatti una riduzione del 47% dal 2011; se in quell'anno le vendite di vetture Diesel costituivano il 55% delle vendite totali di automobili, oggi giorno solo l'8,8% [38].

Un argine a questo decadimento delle vetture con motore ad accensione spontanea, è rappresentato dalle auto ibride, auto la cui trazione è affidata alla combinazione di un motore elettrico e di uno termico, per esempio a gasolio. Esistono diversi sistemi ibridi:

Mild-Hybrid (MHEV: Veicolo Ibrido Elettrico Leggero) in cui il motore elettrico assiste quello termico, specialmente durante le accelerazioni e le partenze, o in condizione di marcia particolari come il viaggio in autostrada a velocità costante. Tuttavia il motore elettrico non sarebbe in grado di movimentare l'auto da solo, esso ha lo scopo di ridurre le emissioni e migliorare l'efficienza; è possibile risparmiare un buon 10% di carburante grazie all'azione sinergica dei due motori. Esistono due versioni di questo motore: BSG ("Belt driven Starter Generator"), ossia il motore elettrico è collegato tramite una cinghia all'albero principale del motore termico, oppure ISG ("Integrated Starter Generator"), in tal caso il motore elettrico è inserito all'interno del cambio. Questi motori presentano una potenza di 10-20kW a 100-200V

Altra tipologia di sistema ibrido, è rappresentata dal Full-Hybrid (HEV: Veicolo Elettrico Ibrido), in cui l'auto può viaggiare solamente con il motore elettrico, per brevi tratti e solitamente a basse velocità; tale motore elettrico (presenta una potenza che può arrivare fino a 50kW a 200-300V) viene alimentato da una batteria che si ricarica autonomamente in decelerazione o grazie al motore Diesel, il quale si attiva quando viene richiesta maggior potenza. Questo sistema consente di risparmiare fino al 30% di carburante, inoltre presenta un'autonomia superiore rispetto ai motori elettrici e termici.

Infine si ha il Plug-in Hybrid (PHEV: Veicolo Elettrico Ibrido Plug-in), esse presentano una batteria più capiente rispetto alle versioni viste poc'anzi, che può essere ricaricata esternamente grazie ad una presa di corrente, consentendo di viaggiare per più tempo in modalità solo elettrico (fino anche a 60 km).

In tutti i casi, il sistema ibrido recupera buona parte dell'energia cinetica (85-90%) in frenata e in decelerazione per ricaricare la batteria, trasformando il motore elettrico in generatore di corrente elettrica (frenata rigenerativa).

Inoltre, tutti i sistemi di ibridazione attuali, sia che siano Plug-in o Full Hybrid, sono ibridi in parallelo. Vale a dire che i due motori forniscono moto alle ruote motrici, lavorando insieme oppure alternandosi.

Un'altra soluzione, che deriva direttamente dai veicoli elettrici, consiste nel disporre in serie il motore elettrico e quello termico, da qui il nome ibrido in serie, quest'ultimo motore fornisce energia al motore elettrico, svolgendo la funzione di generatore di corrente; sarà proprio il motore elettrico il responsabile della trazione.

Oltretutto, esiste un sistema di ibridazione, chiamato "Micro-Hybrid"; esso non presenta un vero e proprio motore elettrico destinato alla trazione, bensì delle soluzioni atte a migliorare l'efficienza, diminuire i consumi e quindi le emissioni.

Tutte le vetture caratterizzate dal sistema Start & Stop sono classificate come Micro-Hybrid. Questa soluzione consente di spegnere il motore durante la sua fase di arresto, risparmiando il 5-10% di gasolio. Ad introdurre sul mercato lo Start & Stop è stato il gruppo PSA, con la Citroën C3 nel 2004. Questo sistema, va evidenziato, presenta non pochi svantaggi; innanzitutto si assisterà ad un'usura più rapida di tutti gli organi, in particolare del motorino d'avviamento e della batteria, dopodiché il motore è soggetto a maggior sollecitazioni meccaniche e termiche a causa delle ripetute accensioni e spegnimenti.

Un'ulteriore soluzione che consente a un'auto di essere considerata micro ibrida è quella dell'utilizzo del sistema di gestione della carica della batteria da parte dell'alternatore; nello specifico l'alternatore viene attivato esclusivamente quando lo stato di carica della batteria scende sotto un determinato livello, in modo da non prelevare dal motore energia inutilmente quando la batteria è carica.

Il mercato delle auto ibride ha avuto maggiore successo con il motore a benzina, mentre il Diesel elettrificato costituisce solo il 4,3% delle vendite totali; percentuale ancora più bassa per le plug-in hybrid che coprono solamente lo 0,3% del mercato, ciò è dovuto agli alti costi di tale motorizzazione. Ciononostante anche il mercato delle auto gasolio-elettriche ha visto un incremento notevole, passando da 81173 del 2023 a 88242 nel 2024 [38].

12. Il motore Diesel tra declino automobilistico e indispensabilità industriale

Ritornando alla domanda che ci siamo posti precedentemente, ossia se il motore Diesel possa avere nei prossimi decenni ancora un ruolo importante nell'autotrazione; a vedere dai dati relativi al calo di vendite di vetture che montano proprio questo tipo di motore e viste le norme sempre più stringenti sull'inquinamento; la risposta pare non essere positiva.

Tuttavia in alcuni settori questo motore riveste un ruolo essenziale e insostituibile, vista la sua robustezza, affidabilità e considerando la maggior efficienza e la maggior coppia erogata a bassi numero di giri.

Si consideri, per esempio, il settore industriale, in cui macchine per movimento terra, per trivellazione e per spostamento e sollevamento di materiali montano proprio potenti motori Diesel; è il caso di escavatori, bulldozer, scraper, gru, rulli compressori e pale; in tale ambito è necessario, difatti, avere alte coppie a bassi numeri di giri, efficienza e affidabilità elevata, inoltre il gasolio è molto più sicuro rispetto la benzina, in quanto meno infiammabile.

Altro settore in cui viene adottato il motore a gasolio è quello agricolo: trattori, mietitrebbie, macchine per la semina e il raccolto, macchine per il trasporto e la distribuzione di concimi e mangime sono tutti caratterizzati da potenti e robusti motori Diesel per le medesime ragioni espresse poc'anzi.

I motori Diesel trovano impiego e non potranno in alcun modo essere sostituiti laddove vengono utilizzati per produrre energia elettrica in condizioni emergenziali, infatti molti ospedali, industrie ma anche in alcuni ambiti residenziali, in caso di blackout vengono azionati motori a gasolio che fungono da generatori di corrente, essi sono progettati per funzionare a regime costante anche per lunghe ore. Trovano impiego anche per azionare motopompe per sistemi antincendio, di irrigazione e di pompaggio liquidi in caso di mancanza di elettricità.

Inoltre, come abbiamo già detto il motore con alimentazione a gasolio è più sicuro, in quanto meno infiammabile, rispetto ad un analogo motore alimentato a benzina; difatti il punto di infiammabilità della benzina è compreso tra i -40°C e i -12°C , mentre quello del gasolio è tra i 55°C e i 65°C , quindi essendo più alto, è più difficile che esso si auto accende in ambienti ricchi di sostanze infiammabili ed esplosive.

Inoltre, il gasolio è molto meno volatile della benzina, ciò comporta una minor probabilità di formazione di nubi di vapori altamente infiammabili.

Queste sono le principali ragioni per cui il motore Diesel è prediletto in diversi ambienti caratterizzati da sostanze infiammabili od esplosive (ambienti ATEX: ATmosphères EXplosibles), come raffinerie, impianti petrolchimici, industrie chimiche, miniere, impianti di biogas, impianti di trattamento rifiuti, depositi di carburanti, ambienti di verniciatura ecc..

Ci si potrebbe domandare se il motore elettrico non risulti maggiormente sicuro, rispetto al Diesel, considerando l'assenza di combustione, di carburanti e di gas di scarico caldi. Tuttavia è opportuno considerare che, durante il funzionamento, il motore elettrico potrebbe dare luogo a scintille dovute allo strisciamento delle spazzole od a cortocircuiti; in aggiunta, le batterie che alimentano detti motori, in caso di guasto, di sovraccarichi di corrente potrebbero surriscaldarsi, superando il punto di infiammabilità di vapori presenti nell'ambiente, oppure potrebbero rilasciare gas infiammabili come idrogeno o vapori organici, costituendo un serio pericolo.

In definitiva, il motore ad accensione spontanea rimane quello più sicuro in ambienti ricchi di sostanze altamente infiammabili e quindi pericolose per l'incolumità di persone; tuttavia è comunque necessario adottare tutte le misure atte a prevenire incidenti, talvolta irreversibili.

D'altro canto, va evidenziato il fatto che il gasolio presenta un punto di solidificazione abbastanza elevato, appena sotto gli 0°C , questo a causa dell'aggregazione dei cristalli della paraffina, una miscela di idrocarburi presente al suo interno.

Ciò costituisce un problema non da sottovalutare, soprattutto in quei casi in cui il motore è esposto ai climi rigidi; infatti è sufficiente che il 3% delle paraffine presenti al suo interno cristallizzino per far sorgere problematiche legate all'otturazione di filtri e degli iniettori.

Per ovviare a tale criticità, si è pensato di aggiungere degli additivi antigelo che prevengono il congelamento, spostando la temperatura di solidificazione più in basso ($-10/-12^{\circ}\text{C}$) e favorendo la formazione di cristalli di paraffina di dimensioni più piccole, le quali non costituiscono un problema di intasamento. In zone in cui si potrebbero raggiungere temperatura ancora minori, è disponibile il gasolio artico che solidifica a $-20/-30^{\circ}\text{C}$.

Prima dell'invenzione di tali additivi, si aggiungeva al gasolio un piccolo quantitativo di benzina, essa presentando un punto di solidificazione intorno ai -45°C , non permetteva al carburante presente nel serbatoio di congelare.

Altre applicazioni riguardano i trasporti: trasporti di persone, quindi autobus, tram, i quali montano motori Diesel caratterizzati da cilindrata fino a 13 litri, potenze fino a 500 CV e fino a 2500 N*m di coppia motrice, trasporti marittimi, cioè navi da crociera, traghetti, portacontainer e imbarcazioni in generale, montano tutti potenti motorizzazioni Diesel, che spaziano da motori 4 tempi da 1500 a 5000 cm³ per barche di piccole dimensioni e yacht, motori fino a 60 L per pescherecci, motovedette, traghetti e rimorchiatori, per navi mercantili e portacontainer si raggiungono invece cilindrata di 25000 L e potenza all'albero fino a 80000 CV con affidabili motori 2 tempi.

Un caso emblematico è rappresentato dal motore Diesel due tempi a bassa velocità, 14 cilindri, montato dalla portacontainer Emma Maersk, che presenta una potenza all'albero di 109000 CV; potenza giustificata dal fatto che la nave riesce a trasportare fino 11000 container e viaggiare ad una velocità massima di 25 nodi.

Altro settore di trasporti è quello ferroviario; qui motori a gasolio fino a 300 L di cilindrata e potenza che arriva a 5000 kW, disposti in linea o in due bancate, azionano un alternatore che produce corrente elettrica alternata che alimenta i motori elettrici di trazione posti sugli assili del treno. Tra l'alternatore e i motori elettrici è presente un inverter che avrà il compito di raddrizzare la corrente e convertirla in corrente continua, laddove siano presenti motori che lavorano con tale alimentazione. Le locomotive utilizzate per la circolazione dei treni passeggeri sono dotate di un alternatore ausiliario. Questo fornisce energia elettrica a corrente alternata per l'illuminazione, il riscaldamento e l'aria condizionata a bordo del treno.

Sicuramente il settore dei trasporti in cui il motore a gasolio riveste un ruolo importante è quello su "gomma", basti pensare che più dell'80% delle merci viaggia su camion; questi ultimi a pieno carico possono raggiungere masse fino a 44 tonnellate, per movimentare ingenti pesi sono necessari motori Diesel potenti che possono superare i 700 CV (una versione di Volvo FH16 Aero presenta 780 CV), con cilindrata dell'ordine dei 13-16 L ripartite su 6 o 8 cilindri con configurazione in linea o a "V", inoltre presentano coppie all'albero che possono arrivare sino a 3000 N*m.

Tutti gli ambiti che abbiamo trattato, vedono macchine montare potenti e affidabili motori Diesel, tuttavia negli ultimi anni sono stati in parte soppiantati da motori elettrici, in particolar modo nel settore del trasporto di persone, spesso essi operano in aree densamente affollate come centri urbani e pertanto è essenziale limitare il più possibile le emissioni inquinanti e climalteranti deleteri per la salute, cosa che può essere fatta grazie a motori ad emissioni zero, come l'elettrico, o motori con alimentazioni alternative, quali metano o GPL.

Questo passaggio all'elettrico è stato sicuramente accelerato dal "Fit for 55", un insieme di proposte legislative promulgate dall'UE nel 2021 che mira a ridurre del 40% le emissioni di CO₂ entro il 2030 e del 90% nel 2040 [39].

Anche il settore dell'autotrasporto ha visto recentemente l'installazione di motori elettrici con coppie molto più elevate rispetto ai tradizionali motori Diesel (5000-10000 N*m), alte potenze (fino a 800 CV) e bassissima rumorosità.

Tuttavia gli alti costi di acquisto, la minor autonomia (300-600 km), i tempi maggiori per la ricarica (fino a 3 ore), l'elevato peso delle batterie (3-5 tonnellate) che andrà a diminuire la massa complessiva della merce trasportata e i alti costi di sostituzione di quest'ultime quando terminano la loro vita utile, inducono molte case costruttrici di mezzi pesanti a prediligere ancora il motore Diesel, almeno per i prossimi decenni.

Tuttavia, va evidenziato come dal 2022 ad oggi, il mercato delle vendite di camion elettrici è aumentato significativamente, registrando un aumento del +40% [40].

Un altro punto a favore del gasolio è sicuramente la rete di distribuzione e rifornimento. Il gasolio può contare su una rete capillare di raffinerie, depositi e stazioni di rifornimento diffuse in aree urbane, rurali, industriali e portuali, permettendo grande autonomia e affidabilità. Al contrario, la rete elettrica, pur in espansione, non garantisce ancora la stessa capillarità e affidabilità, soprattutto in aree remote.

Inoltre, la motorizzazione elettrica ha iniziato a conquistare anche il settore navale. Negli ultimi anni, si sono sviluppati prototipi di imbarcazioni funzionanti con potenti motori elettrici, riducendo così le emissioni inquinanti e salvaguardando l'ambiente marino. Tra gli esempi più significativi figura il traghetto australiano "China Zorrilla", una imponente imbarcazione che può trasportare fino a 2100 passeggeri e 225 veicoli, grazie ai suoi affidabili motori elettrici alimentati da batterie da 40 MWh, primato che ne fa la nave elettrica più grande al mondo. Altro esempio è costituito dalla nave portacontainer, battente bandiera cinese, "Greenwater01", la quale presenta una capacità di carico di 10000 tonnellate, spinta da propulsori elettrici alimentati da batterie da 50MWh.

Va detto che recentemente l'azienda di navigazione norvegese Hurtigruten sta sviluppando una nave da crociera a emissioni zero, la "Sea Zero"; operativa a partire dal 2030 e potrà trasportare fino a 500 passeggeri, grazie a due motori elettrici posizionati a poppa della nave, retrattibili quando non sono necessari, rendendo la nave più aerodinamica, i motori sono alimentati da batterie da 60 MWh, ricaricabili dall'energia proveniente da fonti rinnovabili; infatti la nave dispone di pannelli solari capaci di produrre corrente, oppure da rete elettrica ai porti.

Questi sviluppi dimostrano come la propulsione elettrica stia gradualmente entrando anche nel settore navale, offrendo alternative più sostenibili ai tradizionali motori Diesel.

Parallelamente allo sviluppo di imbarcazioni elettriche, negli ultimi anni sono state progettate anche navi ibride gasolio-elettrico; esse permettono un risparmio di carburante fino al 30% e una conseguente riduzione di emissione di inquinanti, oltre che una minor rumorosità. Tutto ciò è realizzato grazie a sistemi in serie, in cui il motore Diesel aziona il generatore che alimenta i motori elettrici collegati alla trasmissione, o a sistemi in parallelo, nei quali il motore termico e quello elettrico sono collegati all'albero dell'elica: la trazione è affidata solo all'elettrico a basse velocità (manovre portuali), mentre a velocità più alte la trazione avviene grazie all'azione sinergica dei due motori.

13. Conclusioni

La riduzione delle emissioni inquinanti è stato il principale obiettivo dei costruttori di automobili, mezzi industriali ecc. negli ultimi decenni, ciò anche grazie al quadro normativo, europeo e italiano, che mira proprio ad azzerare le emissioni.

Per permettere ciò, parecchie case automobilistiche, hanno cercato di convertire la loro produzione industriale, sviluppando motori meno inquinanti, come per esempio quelli ibridi oppure funzionanti con combustibili naturali, altri produttori, invece, mirano all'abbandono totale del motore termico, a favore della motorizzazione elettrica.

Questo comporta l'accantonamento del motore Diesel, oltretutto esso ha subito una drastica battuta con lo scandalo Dieseldgate, scoppiato nel 2015, fu uno dei più grandi scandali che colpì il mondo dell'autotrazione. Il gruppo Volkswagen aveva installato su milioni di vetture un software che permetteva di falsare i dati relativi alle emissioni, in particolare durante i test, tale software riduceva artificialmente il quantitativo di NO_x prodotto dal motore.

Ciononostante il motore ad accensione spontanea non è stato ancora completamente soppiantato dalle motorizzazioni elettriche.

Ciò grazie molteplici fattori, quello più incisivo sicuramente è il costo, un 25% in più rispetto ai motori endotermici, dopodiché i lunghi tempi di ricarica, l'autonomia inferiore rispetto ai motori termici, la difficoltà di reperimento di colonnine per la ricarica fanno desistere molti acquirenti nell'acquistare una vettura elettrica.

Inoltre, il Diesel è il principale motore impiegato per la trazione di mezzi industriali, quali camion, bus o tram, riveste un ruolo fondamentale nel settore navale, agricolo, industriale, viene impiegato in applicazioni stazionarie per generare energia elettrica; quindi ha un ruolo non facilmente intercambiabile con altre motorizzazioni.

Oltretutto le svariate normative anti-inquinamento hanno costretto, come abbiamo visto, i costruttori ad adottare sistemi di post trattamento dei gas di scarico, per abbattere significativamente le emissioni di inquinanti.

Inoltre si sono assunte soluzioni per avere una combustione più efficiente e completa, ciò contribuisce ulteriormente a diminuire le emissioni inquinanti, tra i quali figurano l'iniezione ad elevata pressione, più iniezioni per ciclo (Multijet), l'EGR, la sovralimentazione, condotti per imprimere turbolenza all'aria entrante nel cilindro.

Tutte queste migliorie, introdotte nel corso degli anni, hanno reso il motore Diesel meno inquinante; se in più aggiungiamo che molti motori possono essere alimentati, come abbiamo visto, con carburanti naturali, le emissioni si riducono ulteriormente.

Tuttavia viste le norme dell'UE che puntano alle emissioni zero entro il 2035, tale motore, almeno per il trasporto leggero privato, sarà abbandonato.

In definitiva, il motore Diesel è quindi destinato a ridimensionarsi, ma non a scomparire nell'immediato: continuerà a essere una colonna portante dei settori produttivi e dei trasporti pesanti ancora per diversi decenni, accompagnando la transizione energetica.

Indice delle immagini

- [2] Fig.1.1: Esploso motore termico (www.automotivespace.it, anno 2022), pag.6;
- [3'] Fig.1.2: Fasi motore ad accensione spontanea (www.youmath.it, anno 2023), pag.8;
- [4] Fig.1.3: Ciclo Diesel reale (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag.9;
- [5] Fig.1.4: Fasi ciclo Otto ideale (prof. Angelo Serafino Caruso, Docente di Meccanica, Macchine ed Energia), pag.10;
- [6] Fig. 1.5: Ciclo Otto reale (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag.12;
- [7] Eq.1.1-Eq.1.16: Equazioni principali MCI (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pagg.12-15;
- [8] Fig.2.1: Turbocompressore (Carlo Osnaghi, *Teoria delle Turbomacchine*, anno 2020), pag.16;
- [9] Fig.2.2: Ciclo teorico aspirato e sovralimentato (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag.16;
- [10] Fig.2.3: Ciclo con recupero di lavoro (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag.17;
- [11] Fig.2.4: Sistema a pressione costante (www.autotecnica.org, anno 2018), pag.18;
- [12] Fig.2.5: Sistema ad impulsi (www.autotecnica.org, anno 2018), pag.19;
- [13] Eq.2.1 Equazione turbo-lag (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag.21;
- [12] Fig.2.6: Turbina a geometria variabile (www.autotecnica.org, anno 2018), pag.23;
- [15] Fig. 2.7: Turbina Twin Scroll (Carlo Osnaghi, *Teoria delle Turbomacchine* anno 2020), pag.24;
- [16] Fig.2.8: Compressore Roots (<https://www.autotecnica.org/la-tecnica-della-sovralimentazione>, anno 2018), pag. 26;
- [17] Fig.2.9: Spaccato di un compressore centrifugo (<https://www.autotecnica.org/la-tecnica-della-sovralimentazione>, anno 2018), pag. 27;
- [19] Fig.3.1: Schema funzionamento EGR (www.researchgate.net, anno 2022), pag. 31;
- [3] Eq.3.1: Equazione riduzione catalitica (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag. 32;

- [3] Eq.3.2: Equazione riduzione CO (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag. 32;
- [3] Eq.3.3: Equazione riduzione HC (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag. 33;
- [3] Eq.3.4: Equazione riduzione NO (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag. 33;
- [20] Fig.3.2: Filtro Antiparticolato (<https://www.ijcrt.org/papers/IJCRT2405825.pdf>, anno 2024), pag. 34;
- [22] Fig.4.1: Schema sistema Common Rail (Politecnico di Torino - *Dipartimento di Energetica Corso di Motori Termici per Trazione*, anno 2015), pag. 35;
- [23] Fig.5.1: Fasi combustione (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag. 40;
- [3] Eq.5.1: Equazione di Arrhenius (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag. 41;
- [24] Fig.5.2: Getto di combustibile gasolio (Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996), pag. 42;
- [25] Fig.6.1: Moto di Swirl (Dott. Ing. Stefano Ubertini, *Alimentazione del combustibile e moto della carica*), pag. 44;
- [26] Fig.6.2: Moto Tumble (Dott. Ing. Stefano Ubertini, *Alimentazione del combustibile e moto della carica*), pag. 45;
- [27] Fig.6.3: Moto di Squish Diesel (Dott. Ing. Stefano Ubertini, *Alimentazione del combustibile e moto della carica*), pag. 45;
- [28] Fig.6.4: Incavatura cielo pistone motore (Dott. Ing. Stefano Ubertini, *Alimentazione del combustibile e moto della carica*), pag. 45;
- [29] Fig.7.1: Ciclo teorico e reale motore Diesel 2T (Cipriano Pidotella, Giampietro Ferrari Aggradi e Delia Pidotella, *Corso di meccanica, macchine ed energia*, anno 2022), pag. 47;
- [33] Tab.1: Standard europei sulle emissioni di autoveicoli (Elaborazione da parte dell'autore), pag. 50.

Bibliografia e sitografia

[1] Ettore Funaioli, Alberto Maggiore, Umberto Meneghetti, *Lezioni di Meccanica Applicata alle Macchine*, anno 1991;

[3] Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, edizione Il Capitello, Torino, anno 1996;

[14] Matteo Di Lallo, *La tecnica della sovralimentazione*, anno 2016

<https://www.autotecnica.org/la-tecnica-della-sovralimentazione/>;

[18] Rudi Bressa, *Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla nostra salute*, anno 2021

<https://www.airc.it/cancro/informazioni-tumori/non-solo-cancro/ambiente-e-salute/gli-effetti-dell-inquinamento-atmosferico-sulla-nostra-salute>;

[21] Dott. Ing. Stefano Ubertini, *Alimentazione del combustibile e moto della carica*, anno 2018;

[30] Cipriano Pidatella, Giampietro Ferrari Aggradi e Delia Pidatella, *Corso di meccanica, macchine ed energia*, anno 2022;

[31] Regolamento (UE) 2019/631 del parlamento europeo e del consiglio del 17 aprile 2019 che definisce i livelli di prestazione in materia di emissioni di CO₂ delle autovetture nuove e dei veicoli commerciali leggeri nuovi e che abroga i regolamenti (CE) n. 443/2009 e (UE) n. 510/2011, anno 2019;

[32] Accordo di Bacino Padano, *deliberazione n°6675 giunta regione Lombardia*, anno 2017;

[34] NEDC e WLTP: i due diversi standard a confronto

<https://www.volkswagen-veicolicommerciali.it/it/service/informazioni-importanti-per-i-clienti/wltp/nedc-wltp.html>;

[35] Biodiesel, <https://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>;

[36] Biodiesel production, https://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel_production;

[37] Sara Deganello, *Biocarburanti, Italia quarta in Europa per produzione*, anno 2025

<https://www.ilsole24ore.com/art/biocarburanti-italia-quarta-europa-produzione-AGdcn0MD>;

[38] Fabio Gemelli, [Motor 1](#)

<https://it.motor1.com/news/754277/auto-diesel-morta-vendite-2025/>, anno 2025;

[39] Consiglio dell'Unione Europea

<https://www.consilium.europa.eu/it/policies/fit-for-55/>, anno 2021;

[40] ACEA (European Automobile Manufacturers Association), *Trasport & Enviroment*, anno 2026.

Ringraziamenti

A conclusione di questo elaborato, vorrei ringraziare in primo luogo il Prof. Ing. Enrico Corti che ha svolto il ruolo di relatore della mia tesi, fornendomi consigli e raccomandazioni utili alla stesura della stessa.

Dopodiché vorrei ringraziare tutti coloro che mi sono stati a fianco e mi hanno supportato in questo mio primo percorso universitario. Ad iniziare dalla mia famiglia che mi ha sempre incoraggiato e sostenuto, fornendomi un solido esempio di perseveranza, dedizione e di impegno costante in ciò che fai; fino ad arrivare ai miei amici che mi sono rimasti accanto anche nei momenti più difficili e mi hanno aiutato nello studio.

Rivolgo un ringraziamento particolare ai miei professori delle scuole superiori per avermi motivato a proseguire gli studi universitari, offrendomi consigli preziosi su come affrontarli in modo sereno e costruttivo.