

Specificità dei motori a ciclo Diesel

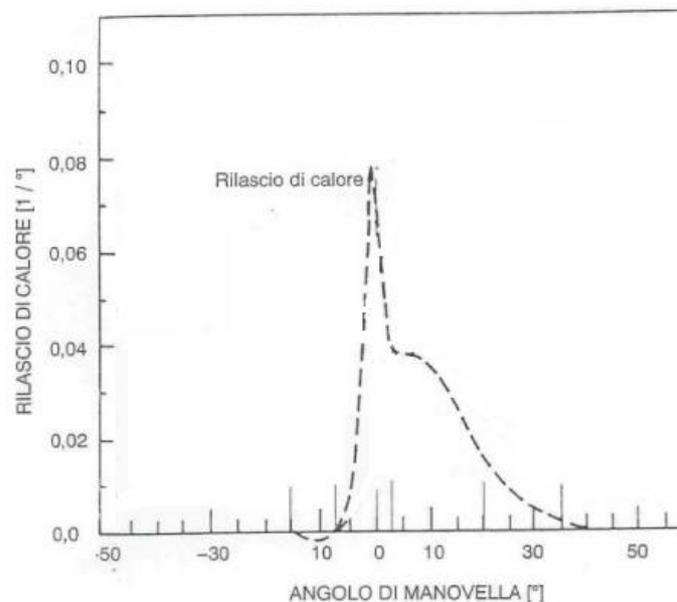
La combustione e la camera di combustione

Si è già osservato che nei motori Diesel si introduce nel cilindro il combustibile finemente polverizzato allo stato liquido. Le gocce devono avere elevata energia cinetica per diffondere nella massa d'aria ad alta densità che riempie il cilindro verso la fine della compressione. Esse devono poi evaporare e i vapori miscelarsi con l'aria. L'elevata pressione e temperatura provocano infine l'accensione spontanea della miscela nei punti in cui è stato raggiunto un valore adeguato del rapporto stechiometrico locale.

Da questa descrizione si intuisce che, nella combustione dei motori Diesel, la modellazione fenomenologica basata sul concetto di fronte di fiamma non è applicabile.

Vediamo in figura come evolve il rilascio del calore in funzione dell'angolo di manovella in un classico motore Diesel ad iniezione diretta con sistema di iniezione del combustibile meccanico. La curva di rilascio del calore si ottiene applicando al ciclo indicato il primo principio della termodinamica.

L'iniezione comincia in anticipo rispetto al punto morto superiore. Dopo una fase iniziale di assorbimento di calore, dovuto alla evaporazione della frazione di combustibile iniettata durante il tempo di ritardo all'accensione, si osserva il picco di emissione di calore dovuto alla rapida ossidazione del combustibile evaporato e accumulato durante il ritardo. In questa fase la combustione è premiscelata.



La fasatura dell'iniezione deve fare sì che il massimo rilascio di calore avvenga all'inizio della corsa di espansione, appena superato il punto morto superiore, al fine realizzare la maggior spinta possibile sullo stantuffo. Esaurito il picco, la combustione procede in modo più regolare, perché mano a mano che il combustibile continua ad essere iniettato esso trova delle condizioni ideali per una rapida evaporazione, miscelazione e combustione. In questa fase l'emissione di calore è regolata dai processi essenzialmente fluidodinamici tipici della combustione diffusiva. Introdotta la corretta quantità di

combustibile, l'iniezione cessa e il combustibile finisce di bruciare mentre il rilascio di calore ritorna gradualmente a zero.

La combustione realizzata con la modalità ora descritta ha come punto debole la presenza del picco di emissione di calore che si sviluppa durante la fase di combustione premiscelata. Esso non solo causa forti sollecitazioni termiche e meccaniche, associate anche a rilevanti emissioni acustiche, ma anche e soprattutto una notevole produzione di ossidi di azoto, a causa della alta temperatura raggiunta e mantenuta per un tempo relativamente lungo.

Lo sviluppo dei diversi sistemi di iniezione e anche di diverse forme della camera di combustione dei motori Diesel è quindi volto all'ammorbidente del picco: si vuole avere una combustione sempre efficiente e completa, ma con evoluzione temporale più regolare e con minor emissione di NO_x .

Un contributo all'ottenimento di tale risultato si può ottenere riducendo al minimo il ritardo all'accensione: in questo modo il combustibile accumulato prima dell'innesco della combustione è ridotto, quindi si abbassa il picco di temperatura. I parametri che influenzano il ritardo all'accensione sono:

- la finezza della polverizzazione del combustibile: tanto più sono piccole le gocce tanto minore sarà il ritardo, per evidenti motivi fisici;
- la turbolenza dell'aria: un elevato livello di turbolenza favorisce la miscelazione aria – vapori di combustibile e riduce il ritardo;
- il rapporto di compressione e la temperatura in camera: maggiori sono pressione e temperatura, tanto più sarà agevolata l'autoaccensione del combustibile;
- la natura del combustibile.

A proposito di quest'ultimo punto, il parametro, che esprime la capacità del combustibile di autoaccendersi è il numero di cetano.

Esso si definisce in modo analogo al numero di ottano: è la frazione percentuale di cetano in una miscela con α -metilnaftalene che ha la stessa capacità di autoaccensione del combustibile in prova. La determinazione del numero di cetano si effettua sperimentalmente, in maniera analoga a quanto visto per la misura delle proprietà antidetonanti, con un motore CFR a ciclo Diesel.

Nel gasolio commerciale il numero di cetano vale circa 50-52, ma il motore Diesel è in grado di funzionare correttamente anche con combustibili con numero di cetano più basso, fino a 30 circa. Il motore a ciclo Diesel è quindi più "onnivoro" di uno a ciclo Otto.

Le camere di combustione dei motori Diesel si dividono in due categorie:

- ad iniezione indiretta, o a precamera;
- ad iniezione diretta.

I termini "diretta" ed "indiretta" non devono trarre in inganno in rapporto a quanto visto per il motore a ciclo Otto. Nei motori Diesel l'iniezione avviene sempre all'interno del cilindro e mai nel collettore di aspirazione, ma è diversa nei due casi l'architettura della camera di combustione.

La figura mostra diversi tipi di camere di combustione per motori Diesel ad iniezione indiretta, alcuni adottati anche in tempi abbastanza recenti, altri di interesse storico.

La soluzione più efficiente e rappresentativa può essere quella con precamera ad elevata turbolenza tipo Ricardo-Comet.

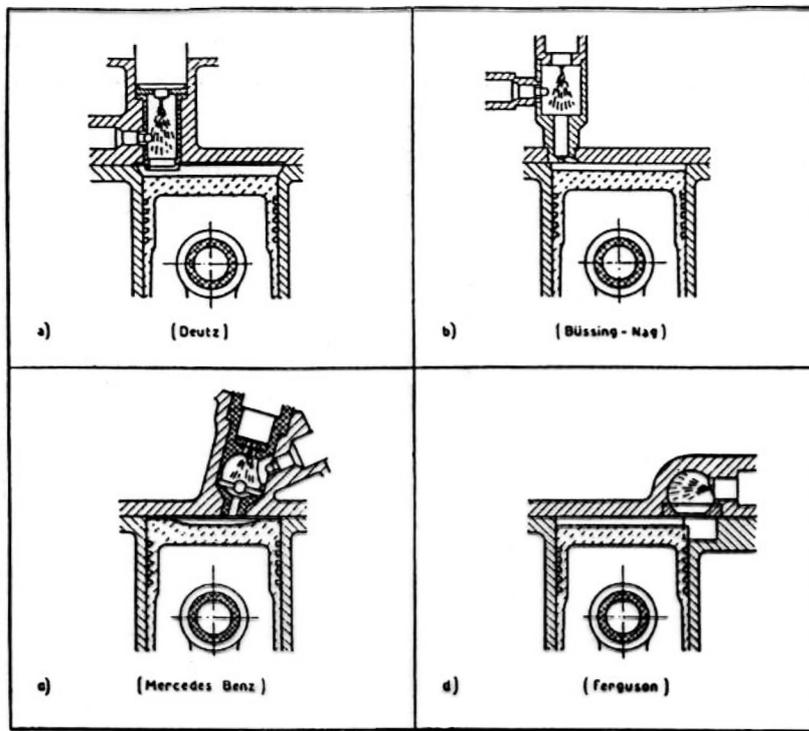


Fig. 411. - Precamere.

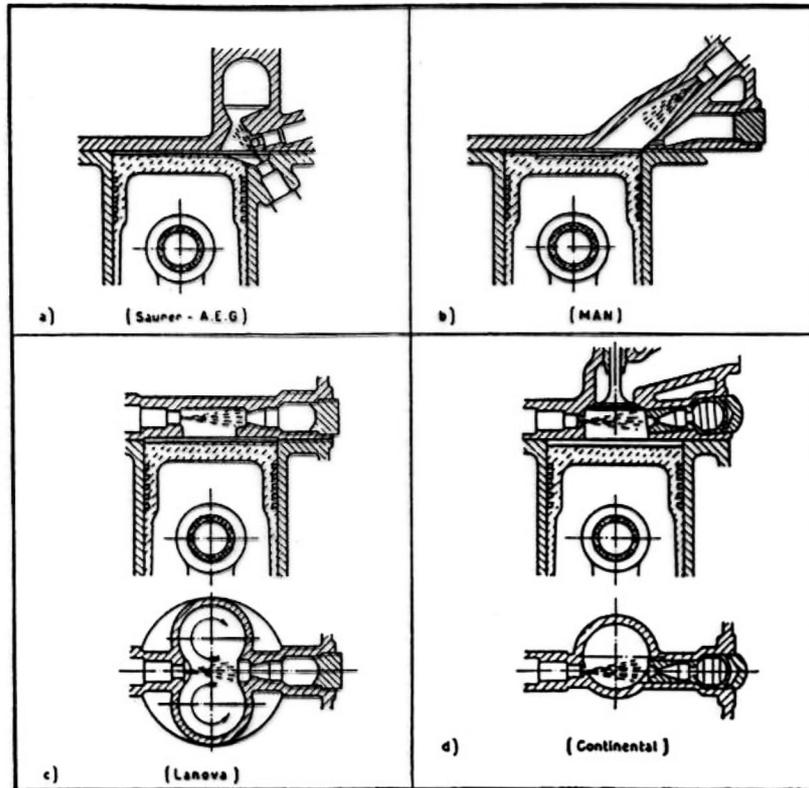


Fig. 414. - Camere ad accumulazione.

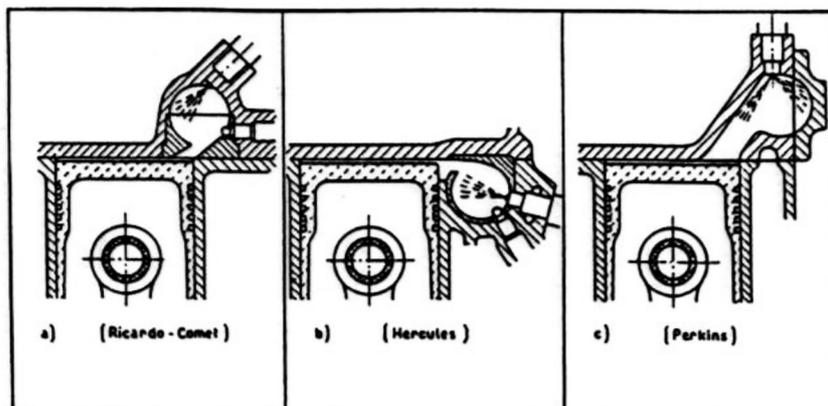


Fig. 413. - Precamere ad elevata turbolenza.

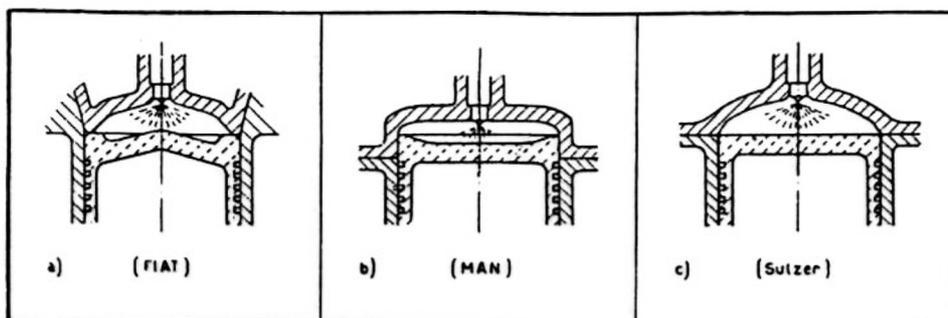


Fig. 407. - Camere ad iniezione diretta per motori Diesel lenti a 2 tempi.

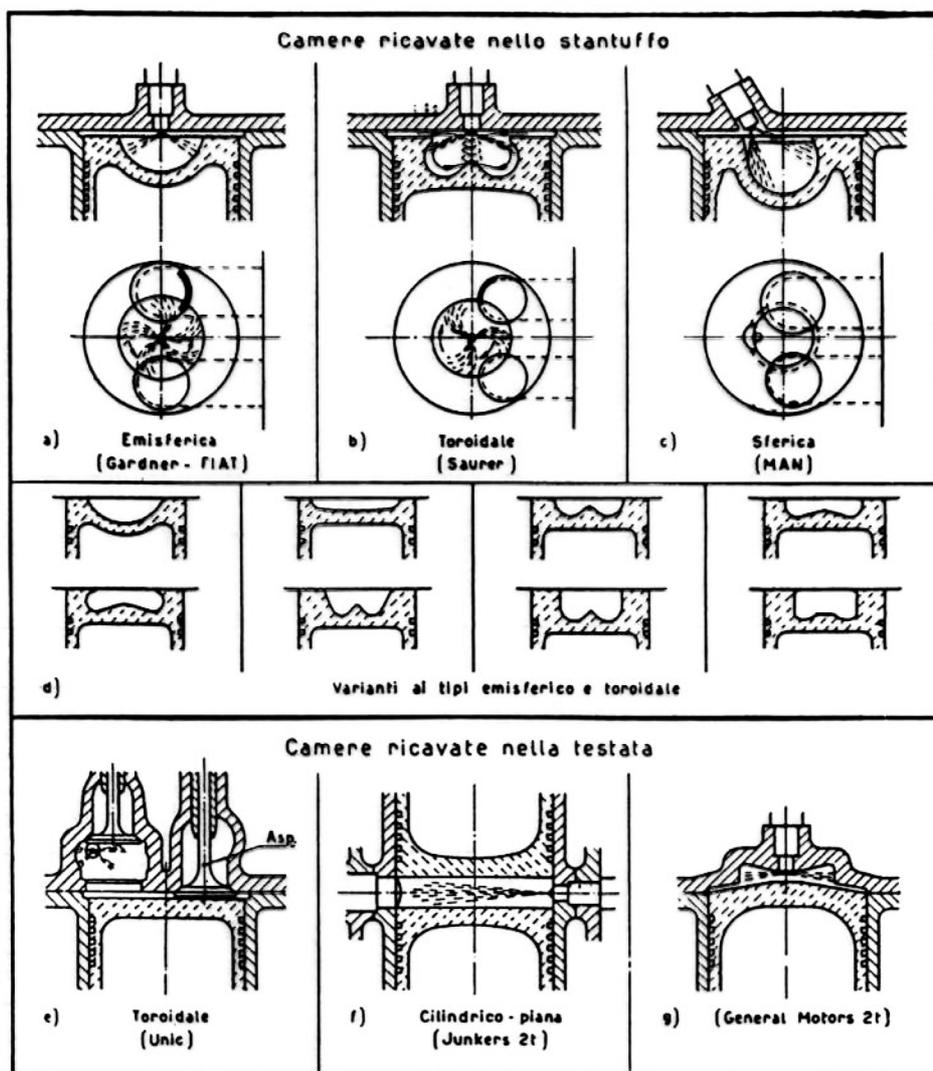


Fig. 409 - Camere ad iniezione diretta.

La precamera è sferica ed è collegata alla camera di combustione principale con un condotto tangenziale. Nella precamera è montato l'iniettore, dotato di un solo foro centrale.

Lo stantuffo, salendo in fase di compressione verso il punto morto superiore, spinge l'aria ad alta velocità attraverso il condotto tangenziale all'interno della precamera. Qui l'aria assume un intenso moto rotatorio con elevato grado di turbolenza. Quando lo stantuffo arriva al PMS, quasi tutta l'aria è contenuta nella precamera. Il combustibile viene quindi iniettato in un ambiente che favorisce, in virtù dell'intenso moto rotatorio e dell'alta turbolenza, una rapida evaporazione e miscelazione anche a fronte di una iniezione concentrata in un unico getto e senza richiedere pressioni di iniezione eccessivamente elevate (comunque attorno o superiori ad almeno 200 bar) né una polverizzazione particolarmente fine. La combustione inizia quindi a svilupparsi nella precamera, dopo un ritardo abbastanza ridotto, per poi proseguire nella camera principale durante la fase di espansione. Poiché in precamera la pressione è aumentata rapidamente, man mano che lo stantuffo scende verso il PMI, durante la corsa di espansione, nel condotto tangenziale si crea un getto ad alta velocità, costituito da una miscela parzialmente incombusta di aria e vapori di combustibile, che completano la combustione in camera principale. Si sviluppa quindi una combustione efficace con un ritardo abbastanza ridotto.

Il principale difetto dell'iniezione indiretta è costituito dalle perdite di carico cui è soggetto il sistema, sia quando l'aria entra in precamera, sia quando ne esce. Ciò porta ad una riduzione del lavoro indicato e quindi del rendimento del motore. Un altro difetto è che la precamera è un punto caldo che deve essere raffreddato, con elevata dissipazione di energia termica. Si osservi, a questo proposito, che a motore freddo la prima accensione sarebbe impossibile o difficoltosa, e per questo motivo è montata in precamera anche una resistenza elettrica, detta candeletta, che serve a preriscaldare l'aria prima dell'avviamento del motore.

Il sistema di iniezione a precamera è stato utilizzato per decenni nei piccoli motori Diesel, e fin dall'avvio nelle applicazioni automobilistiche. Questo perché la possibilità di utilizzare iniettori con un solo foro, e pressioni di iniezione relativamente ridotte, ben si adattava ai ridottissimi volumi di combustibile che devono essere iniettati in un ciclo in un cilindro in un piccolo motore di potenza limitata.

I progressi tecnologici avvenuti a partire dagli anni '70 - '80 del secolo scorso hanno permesso di adottare gradualmente l'iniezione diretta anche nel caso dei piccoli motori Diesel, per cui da almeno una decina di anni si può affermare che tutti i nuovi motori Diesel, compresi quelli di minore potenza, sono a iniezione diretta.

In una camera di combustione ad iniezione diretta non ci sono volumi separati, la geometria complessiva è assialsimmetrica con un iniettore multiforo centrale.

I fori sono disposti a passo costante e con una forte inclinazione rispetto all'asse dell'iniettore, in modo che i getti possano indirizzare il combustibile in tutte le direzioni, distribuendosi nella massa d'aria nel modo più uniforme possibile.

La miscelazione è favorita dalla forma della camera di combustione, solitamente ricavata nel cielo dello stantuffo. La figura allegata mostra diverse architetture, alcune di interesse solamente storico. Una delle più efficaci e più utilizzate è la camera di combustione toroidale Saurer

Essa favorisce lo sviluppo di moti vorticosi della carica fresca sui piani longitudinali del cilindro durante la compressione. L'azione di questi è integrata dall'effetto dei moti vorticosi di swirl che si sviluppano sui piani trasversali del cilindro, e che sono indotti in fase di aspirazione dalla conformazione dei condotti di aspirazione in prossimità delle sedi valvole.

Con questi tipi di camere si eliminano i difetti dei motori a precamera, ma i requisiti richiesti all'impianto di iniezione sono molto impegnativi. Infatti, si devono ottenere contemporaneamente una polverizzazione molto spinta, un'elevata energia cinetica delle gocce e una efficace dispersione di queste anche in direzione circonferenziale.

Inoltre, la necessità di suddividere su più getti la massa totale di combustibile da iniettare in ogni cilindro e ad ogni ciclo, e con una sufficiente durata dell'iniezione, richiede di realizzare fori dell'iniettore di diametro ridottissimo, dell'ordine dei centesimi di millimetro nei motori di piccola potenza.

Con l'iniezione diretta si realizzano quindi motori ad alto rendimento, ma permane il problema del picco di pressione e temperatura nella prima fase di combustione premiscelata con la conseguente elevata produzione ed emissione di ossidi di azoto, almeno nel caso di adozione di impianti di iniezione meccanica. Nel prossimo paragrafo è approfondito il legame tra tipo di impianto di iniezione e formazione degli NO_x.

L'alimentazione del combustibile

Per quanto visto, l'impianto di iniezione dei motori Diesel deve realizzare le seguenti funzioni:

- una corretta fasatura, ovvero l'iniezione deve iniziare al valore prefissato dell'anticipo;
- una corretta dosatura, ovvero la quantità di combustibile iniettata deve essere ad ogni ciclo quella prevista in funzione del carico;
- una corretta durata, requisito strettamente collegato, ma in qualche misura indipendente, da quello precedente;

soddisfacendo i seguenti requisiti:

- elevata polverizzazione;
- elevata capacità di penetrazione delle gocce nella massa d'aria;
- elevata diffusione delle gocce in tutte le direzioni.

Si noti che i requisiti sono contrastanti tra loro: una polverizzazione molto fine riduce l'energia cinetica delle gocce e, di conseguenza, la loro capacità di penetrazione.

È interessante vedere come queste funzioni vengono realizzate con il classico sistema di iniezione meccanica con pompa Bosch, nella sua configurazione tipica e in quelle da questa direttamente derivate.

Il sistema ha due componenti:

- la pompa, che realizza fasatura, dosatura e durata;
- l'iniettore, cui sono demandate polverizzazione, penetrazione e diffusione.

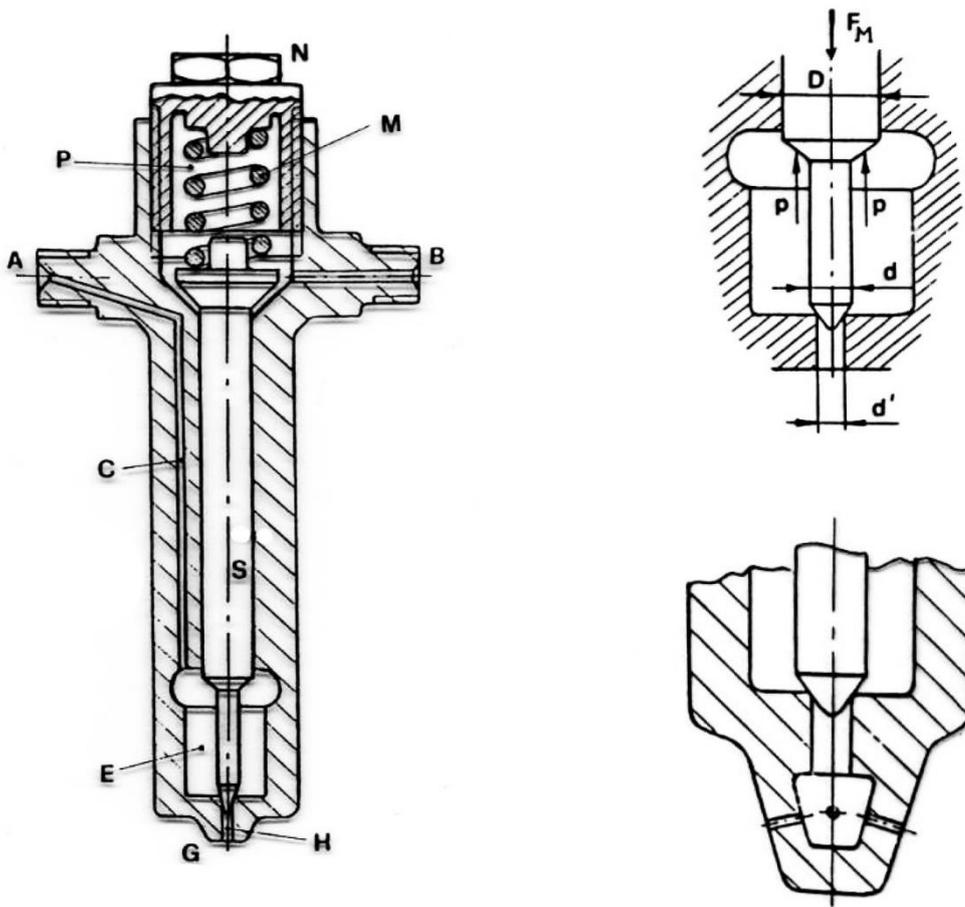
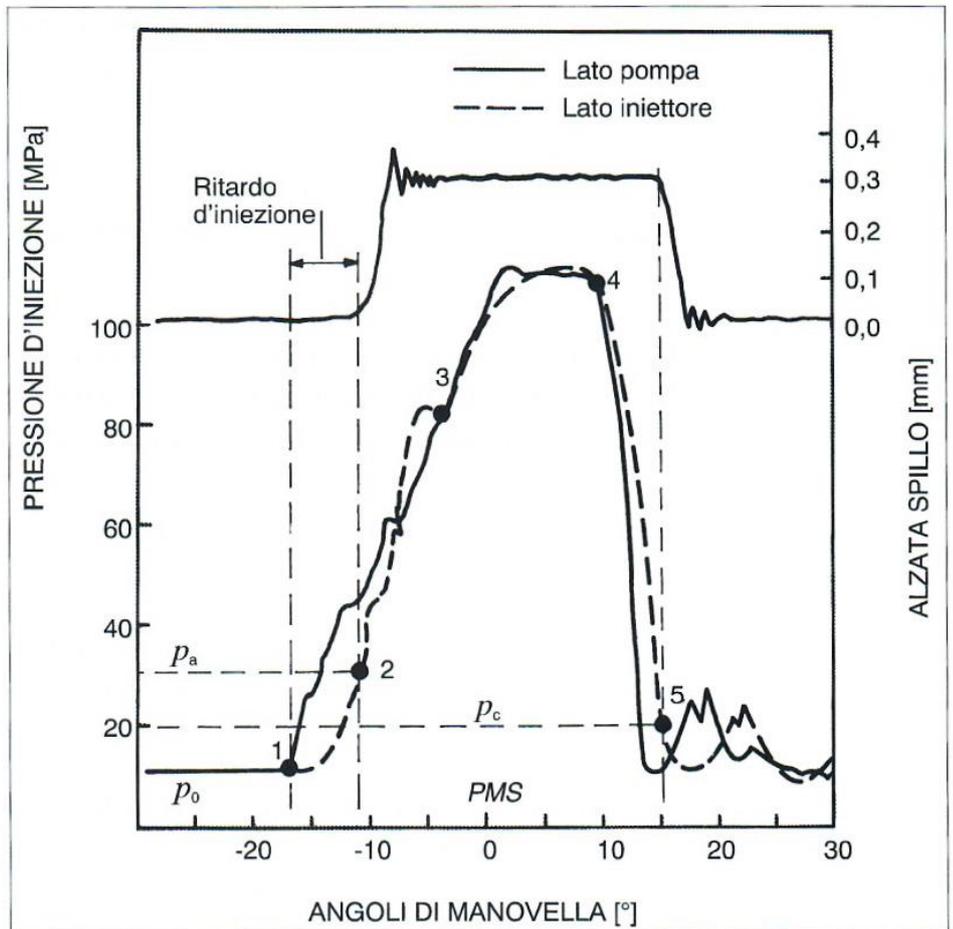


Figura 8.24. Diagrammi tipici dell'alzata dello spillo e delle pressioni agli estremi del condotto d'iniezione (lato pompa e lato iniettore), in funzione dell'angolo descritto dalla manovella (riferito alla posizione di PMS). Essi permettono di definire i valori caratteristici di pressione: all'apertura dell'otturatore p_a , alla sua chiusura p_c ed all'inizio del processo p_0 .



Pompa ed iniettore sono collegati da una tubazione ad alta pressione. Le figure allegate riportano viste e sezioni dei due componenti.

La pompa è alternativa a stantuffo, con il moto alterno realizzato da una camma. L'introduzione del combustibile nella camera di lavoro avviene tramite luci, per azione di una pompa del combustibile a bassa pressione che lo aspira dal serbatoio. La mandata è regolata da una classica valvola automatica con molla di ritorno.

La fasatura viene realizzata dal profilo e dalla rotazione della camma, il cui asse riceve il moto dall'albero motore. Tra i due vi è un regolatore meccanico dell'anticipo a masse centrifughe.

Dosatura e durata sono determinate dalla posizione della scanalatura elicoidale realizzata sul mantello dello stantuffo. Questa mette in comunicazione la camera di pompaggio con il serbatoio del combustibile, provocando l'immediata chiusura della valvola di mandata e la fine dell'iniezione, a una frazione della corsa dello stantuffo modificabile mediante la rotazione dello stesso attorno al proprio asse.

Lo stantuffo è infatti dotato nella sua parte inferiore di due alette, che si impegnano nelle guide del moto alterno di un manicotto girevole, collegato tramite una cremagliera all'acceleratore.

In fase di iniezione, il combustibile mandato dalla pompa fa sollevare la valvola a spillo dell'iniettore, vincendo la resistenza di una molla il cui precarico determina la pressione di iniezione.

A seconda del tipo di motore cui è dedicato, l'iniettore può avere un solo foro assiale o una corona di fori laterali.

Quando la pompa cessa la mandata, una frazione del combustibile contenuto nel pozzetto potrebbe ancora fluire attraverso l'iniettore, ma con pressione insufficiente, formando residui carboniosi. Per evitare questo problema si realizza un risucchio, che impedisce l'ulteriore fuoriuscita del combustibile, modellando opportunamente la valvola di mandata della pompa, come illustrato nella figura.

La pompa ad iniezione classica prevede un pompante per ogni cilindro. Sono state realizzate unità più compatte aventi un unico pompante e un distributore del flusso ai diversi cilindri, come illustrato nelle figure allegate.

L'iniezione meccanica può realizzare pressioni di iniezione di alcune centinaia di bar, è affidabile e permette di ottenere buone prestazioni.

Una variante di notevole interesse è l'iniettore-pompa, che combina i due componenti base dell'impianto in un unico dispositivo compatto, privo della tubazione di collegamento. Ciò permette di portare la pressione di iniezione a 1000-2000 bar, con un iniettore-pompa per ogni cilindro.

Il limite comune di tutti questi i dispositivi puramente meccanici è però la mancanza di flessibilità del controllo.

Questo limite è stato superato con l'introduzione nel 1997, da parte del gruppo FIAT, del sistema di iniezione denominato "common rail", i cui componenti principali sono:

- la pompa ad alta pressione, di tipo volumetrico, che ha quale unica funzione l'innalzamento della pressione del combustibile fino a 1000 bar circa nelle prime versioni e a più di 2000 bar in quelle attuali;

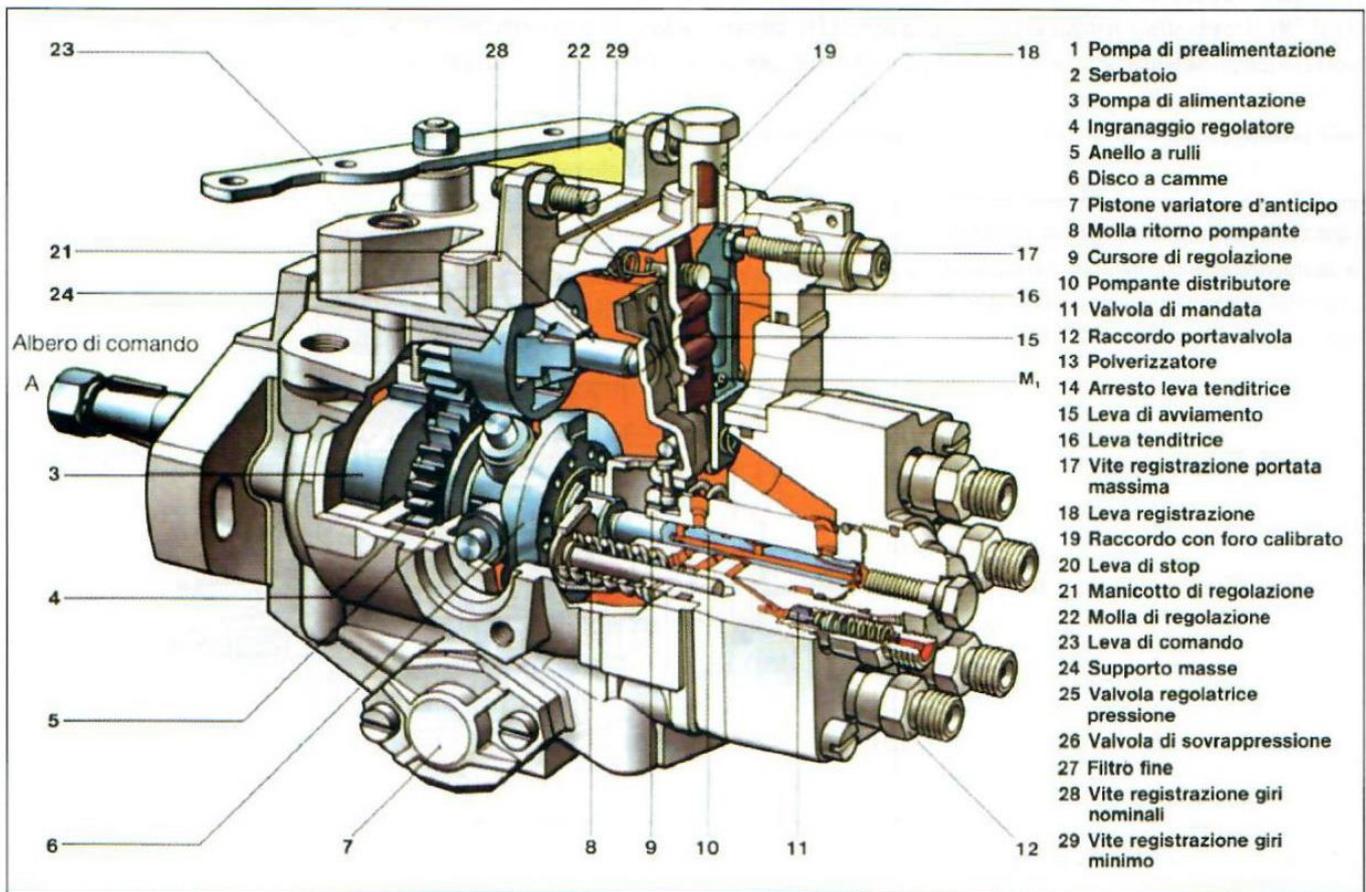


Tavola 24. Pompa d'iniezione con distributore incorporato. Scorrendo sui rulli dell'anello (5), le camme assiali del disco rotante (6) trasformano la rotazione dell'albero di comando (A) in un moto rototraslatorio del pompante (10), il quale comprime così il combustibile e lo distribuisce ai vari cilindri del motore. Il gruppo è completato da: una pompa di alimentazione a palette (3), un regolatore meccanico basato su di un sistema di masse e molle (22) ed un variatore idraulico dell'anticipo d'iniezione (7).

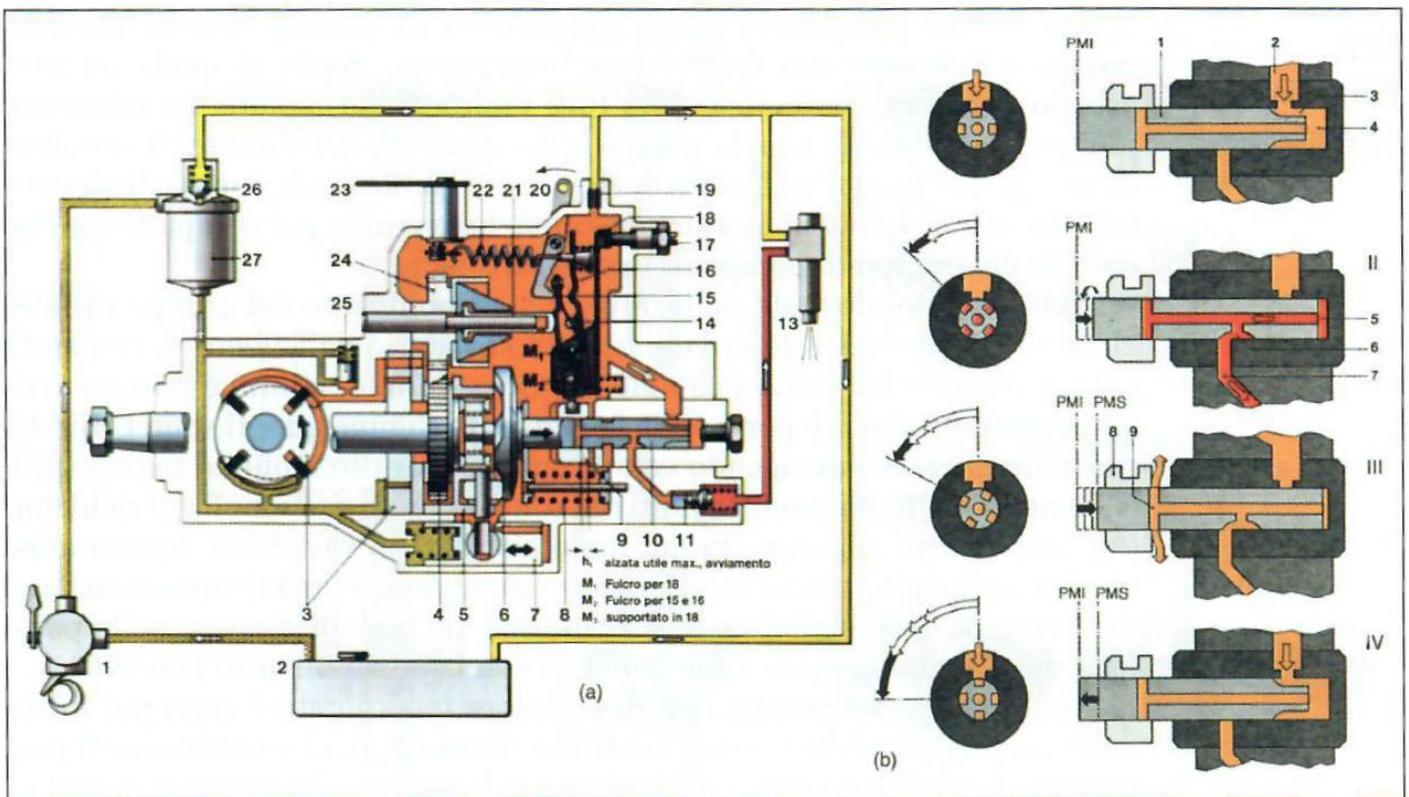


Tavola 25. Pompa d'iniezione con distributore incorporato della Tavola 24: a) circuito del combustibile e dettagli dei principali componenti; b) mandata del gasolio ad uno dei quattro cilindri. Le quattro immagini della figura (b) illustrano quest'ultimo processo nei seguenti termini: I. Con il pistone (1) al PMI, il combustibile riempie la camera della pompa (4), attraverso il foro (2) di alimentazione. II. Nel suo moto traslatorio il pistone chiude la luce (2) e comprime il combustibile in (5), mentre per effetto del movimento rotatorio una sua scanalatura (6) si mette in comunicazione con il condotto (7) di collegamento con uno degli iniettori. III. La mandata termina quando il cursore di regolazione (8) apre la luce di riflusso (9). IV. Il pistone ritorna nella posizione di partenza, in cui la camera della pompa riprende a riempirsi.

- un serbatoio di accumulo (il common rail), alimentato dalla pompa di alta pressione e di volume piccolo in assoluto, ma sufficiente a mantenere la pressione di iniezione pressoché costante;
- gli elettro-iniettori, collegati con un corto tubo al serbatoio, la cui apertura e chiusura è realizzata con dispositivi elettromagnetici. Essi realizzano la polverizzazione, la penetrazione e la diffusione delle gocce di combustibile;
- la centralina di controllo, che sulla base dei segnali provenienti da diversi sensori (posizione acceleratore, posizione angolare albero motore, condizioni ambientali, velocità di rotazione del motore, portata aria ecc.) invia agli elettro-iniettori i segnali di output che ne determinano l'apertura e la chiusura. È quindi la centralina che determina fasatura, dosatura e durata dell'iniezione, con la massima flessibilità.

L'alta pressione di iniezione non solo ottimizza la polverizzazione e la diffusione, ma consente anche di ridurre la durata complessiva dell'iniezione permettendo di suddividerla in più fasi successive. Questo è possibile grazie alla flessibilità operative degli elettro-iniettori e alla elevata risposta in frequenza del sistema di controllo e di attuazione dell'iniezione.

L'iniezione in un sistema common rail attuale è suddivisa in cinque fasi:

- nella prima, detta pre-iniezione, è iniettata una minima quantità di combustibile che evapora, si miscela e brucia, creando in camera di combustione le condizioni ideali per le fasi successive della combustione, senza però creare l'accumulo di combustibile responsabile del picco di temperatura tipico dell'iniezione meccanica tradizionale;
- nelle quattro fasi successive si ha una progressione costante della combustione, senza eccessivi picchi di temperatura e pressione.

Si realizza in questo modo la combustione a stadi, con una importante riduzione, rispetto ai sistemi di iniezione precedenti, della formazione degli NO_x e anche della rumorosità e della ruvidità di funzionamento del motore.

Oggi tutti i motori Diesel adottano il sistema di iniezione common-rail.

Il controllo delle emissioni inquinanti

L'iniezione common-rail ha dato un contributo fondamentale al miglioramento della compatibilità ambientale dei motori a ciclo Diesel, ma deve comunque essere integrata da numerose altre soluzioni tecniche per rispettare i limiti di emissione sempre più restrittivi imposti dalle normative internazionali.

Le emissioni inquinanti comuni a tutte le categorie di motori a ciclo Diesel sono il monossido di carbonio, gli idrocarburi incombusti, gli ossidi di azoto e il particolato solido.

Le emissioni di SO_x sono ormai trascurabili nel caso dei motori per il trasporto su strada, dato il basso tenore di zolfo del gasolio utilizzabile. Sono invece importanti nel caso dei grandi motori per impianti fissi e marini alimentati con combustibili pesanti, in particolare con l'HFO. In tal caso i prodotti della combustione devono essere "lavati" con soluzioni acquose come già discusso parlando in generale dei trattamenti dei prodotti della combustione, e come sarà discusso in dettaglio nel caso dei motori marini nella parte del corso ad essi dedicata.

Figura 8.4. Schema di un sistema d'iniezione del tipo common rail a controllo elettronico (Bosch) per motori Diesel ad iniezione diretta: 1) serbatoio, 2) gruppo filtri, 3) pompa a bassa pressione, 4) pompa ad alta pressione, 5) accumulatore (= common rail), 6) sensore di pressione, 7) valvola regolatrice di pressione, 8) unità di controllo, 9) segnali in ingresso, 10) segnali in uscita, 11) iniettori, 12) ricircolo combustibile.

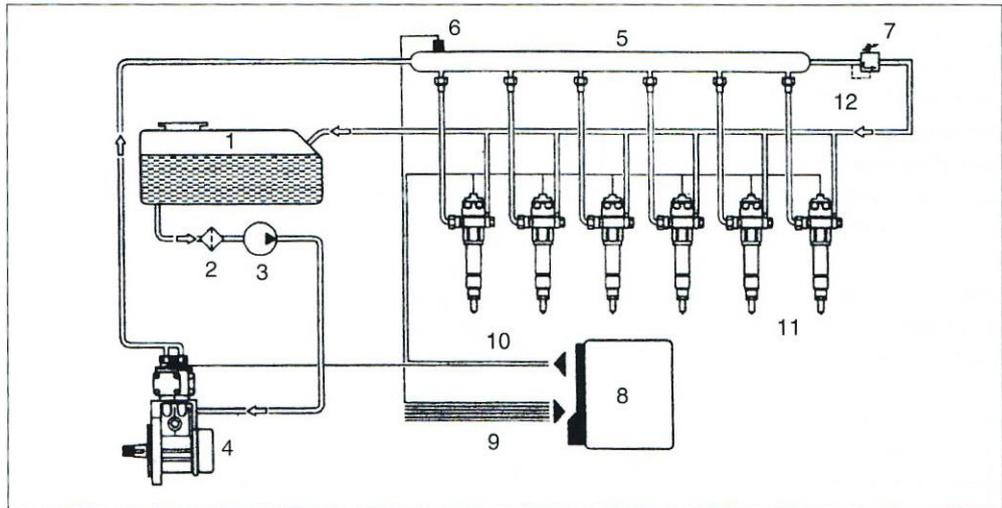
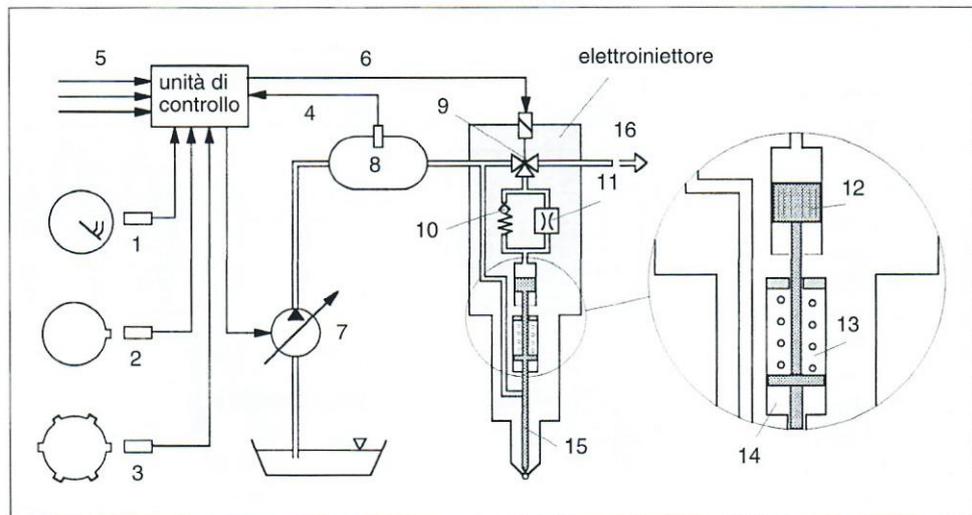
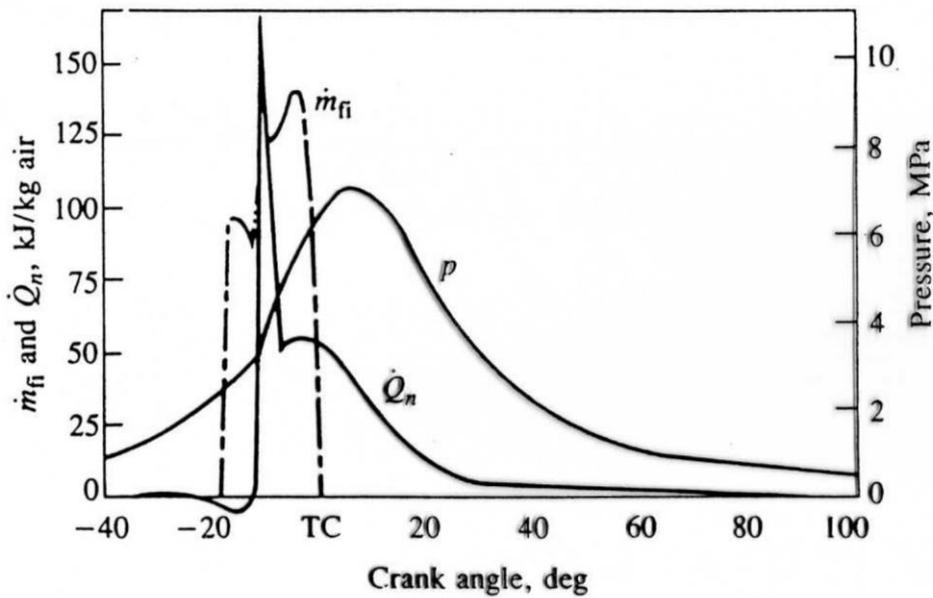


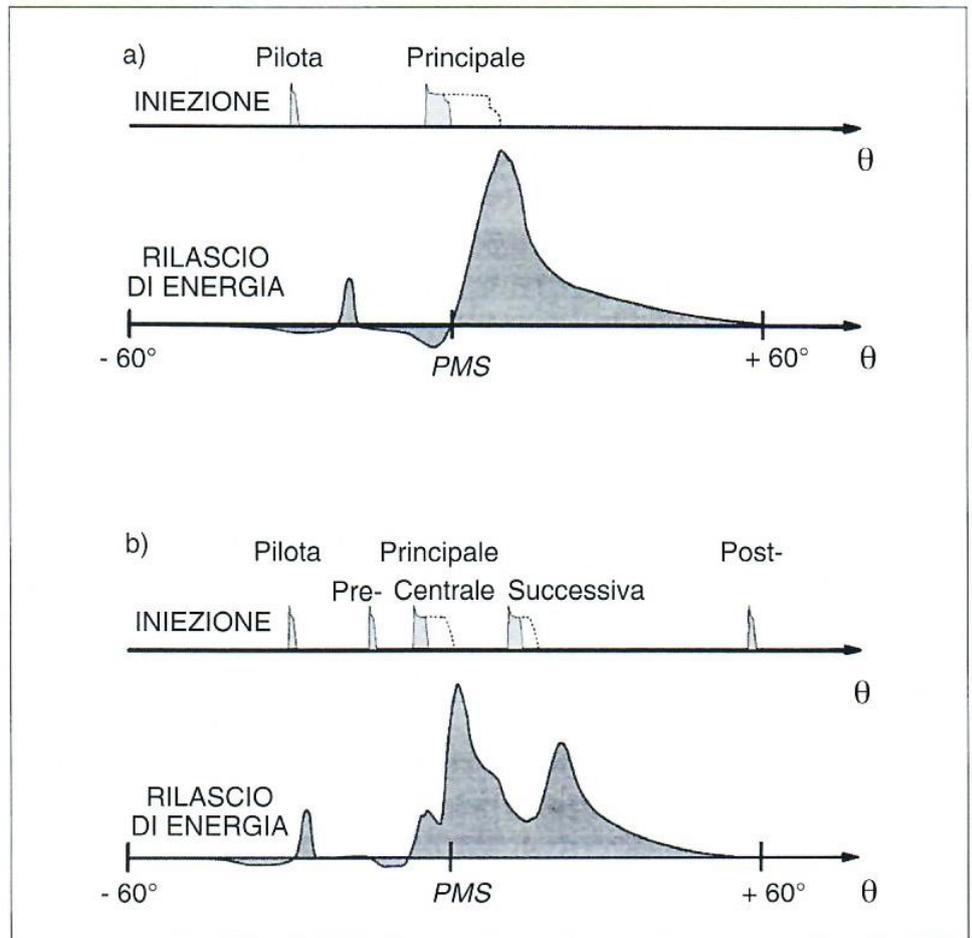
Figura 8.5. Principio di funzionamento dell'unità di controllo e dell'elettroiniettore del sistema d'iniezione tipo common rail di Figura 8.4: 1) pedale acceleratore, 2) indicatore cilindro, 3) numero di giri ed angolo di manovella, 4) sensore di pressione, 5) sensori addizionali, 6) segnale controllo iniettore, 7) pompa ad alta pressione, 8) accumulatore, 9) valvola a solenoide, 10) valvola di non ritorno, 11) strozzatura, 12) pistone idraulico, 13) molla elicoidale, 14) camera iniettore, 15) spillo, 16) ricircolo combustibile.





Cylinder pressure p , rate of fuel injection \dot{m}_{fi} , and net heat-release rate \dot{Q}_n calculated from p for small DI diesel engine, 1000 rev/min, normal injection timing, bmep = 620 kPa.⁵

Figura 8.25. Confronto tra l'effetto prodotto sul rilascio di energia da un'iniezione composta dalla pilota e la principale e la suddivisione dell'intera iniezione in cinque parti.



Le emissioni di CO e di HC sono limitate grazie alla combustione in eccesso d'aria, e sono comunque ulteriormente abbattibili con la marmitta catalitica che, come si è visto, allo scarico di un motore Diesel diventa un dispositivo esclusivamente ossidante.

Le emissioni importanti, e non facili da controllare, dei motori a ciclo Diesel sono dunque quelle di particolato solido e degli ossidi di azoto.

Il particolato viene trattenuto da particolari filtri, che vengono automaticamente rigenerati quando il sensore di pressione posto sullo scarico segnala il superamento del valore di contropressione ammesso. La rigenerazione avviene per ossidazione controllata dalla centralina elettronica del motore.

La formazione degli ossidi di azoto può essere ulteriormente ridotta associando alla combustione a stadi la ricircolazione parziale dei gas di scarico in camera di combustione, indicata con l'acronimo EGR (Exhaust Gas Recirculation). Si ottiene l'aumento della massa di inerti durante la combustione con una riduzione dei picchi di temperatura, ma si riscontra anche un aumento, che deve essere minimizzato, delle emissioni di CO, HC e del consumo. L'EGR è usato in alcuni casi anche nei motori a ciclo Otto.

La riduzione degli ossidi di azoto sotto i limiti di legge si può ottenere solo con l'introduzione nel condotto di scarico dell'SCR, già discusso trattando in generale la riduzione degli NO_x nei processi di combustione.

La figura allegata mostra i diversi dispositivi installabili allo scarico dei moderni motori Diesel e la relazione, nel caso di applicazioni automobilistiche, tra la necessità della loro adozione e la massa del veicolo.

Diffusione, taglie e architetture più comuni dei motori a ciclo Diesel

I motori Diesel non esistono in campo motociclistico, contendono il primato di diffusione ai motori a ciclo Otto in campo automobilistico, monopolizzano i settori dei trasporti pesanti su strada, degli impianti fissi per la produzione di energia elettrica, della propulsione e della generazione di energia elettrica in campo navale.

L'architettura generale dei motori veloci per trazione stradale non è molto diversa da quella dei motori a ciclo Otto di pari categoria.

Sono tutti a quattro tempi, fortemente sovralimentati con turbocompressore a gas di scarico, soggetti anch'essi alle linee guida del downsizing. La potenza specifica è molto aumentata negli ultimi anni, e ora è paragonabile a quella dei motori a ciclo Otto, ad esclusione di quelli più spiccatamente sportivi.

Nonostante lo sviluppo molto intenso negli ultimi anni anche dei motori a ciclo Otto, il consumo dei motori Diesel continua ad essere inferiore, con la conseguente minore emissione di anidride carbonica a parità di potenza.

Le caratteristiche dei grandi motori a due e a quattro tempi per le applicazioni marine saranno discusse dettagliatamente nella parte del corso ad essi dedicata.

Figura 12.10. Circuito di ricircolo dei gas combusti (EGR esterno): 1) farfalla; 2) condotto di ricircolo; 3) valvola di ricircolo; 4) attuatore; 5) unità di controllo; 6) portata d'aria; 7) grandezze considerate.

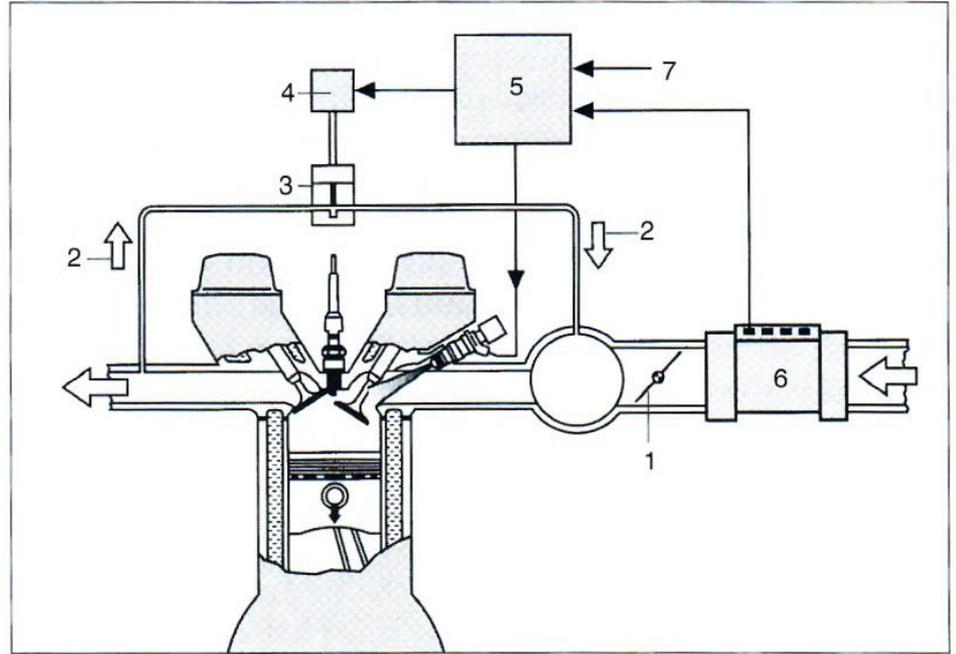


Figura 12.14. Andamento dell'efficienza della conversione degli NO_x , del CO e degli HC in un letto catalitico trivalente, in funzione del rapporto aria/combustibile della miscela di alimentazione del motore. Tale efficienza si mantiene elevata solo in una banda di valori molto stretta, prossima al valore stechiometrico.

