

INFORMAZIONI GENERALI SUI MOTORI A 2 TEMPI (anche di ultima generazione)

1.- Stato dell'arte sui motori a due tempi (DI TIPO TRADIZIONALE)

Per i piccoli motori a due tempi tradizionali (ad accensione comandata) gli inconvenienti sono causati dal tipo di alimentazione basato sulla miscelazione del combustibile all'aria prima che quest'ultima penetri in camera di combustione. Vari tentativi sono stati effettuati per ridurre tali inconvenienti, tentativi generalmente ispirati alla immissione di combustibile direttamente nella camera di combustione (mediante iniezione pneumatica o iniezione diretta). Tutto ciò sull'esempio dei "grandi" motori diesel a due tempi e a 4 tempi che sono tutti ad iniezione diretta. Ma, contrariamente ai motori diesel, gli inconvenienti che si riscontrano sui piccoli motori a due tempi ad accensione comandata sono notevoli e consistono essenzialmente nella difficoltà che si incontra nella miscelazione del combustibile al comburente, con conseguenza combustione anomala e anomalie di funzionamento. In effetti nei motori diesel a due e quattro tempi il problema della miscelazione del combustibile al comburente viene risolto sia mediante un disegno accurato dei condotti di immissione e della camera di combustione (camere a media ed alta turbolenza) sia, e soprattutto, mediante sistemi di iniezione molto sofisticati in grado di funzionare ad altissime pressioni (anche dell'ordine di grandezza di 1000÷2000 bar nei sistemi puramente meccanici, di tipo tradizionale o "common rail").

Con tali livelli di pressione di iniezione il combustibile viene polverizzato così fortemente (atomizzazione spinta) da potersi miscelare completamente con l'aria della carica fresca in tempi brevissimi. Recentemente sono stati sviluppati dispositivi di iniezione per motori, sia a 2 tempi che a 4 tempi, a media pressione (circa 100÷150 bar), che consentono una iniezione diretta anche per propulsori alimentati a benzina. Questi sistemi però sono costosi e complessi tanto da non consentire una ampia diffusione sui piccoli motori.

2.- Sistemi di iniezione applicati ai motori a due tempi

A) Tra i vari tentativi effettuati, per il superamento degli inconvenienti presentati dai motori a due tempi, è opportuno citare quello sviluppato dalla *ORBITAL ENGINE* che adottando una tecnica di iniezione particolarmente sofisticata è riuscita a sviluppare propulsori due tempi per uso automobilistico dalle prestazioni soddisfacenti (emissioni inquinanti paragonabili a quelle dei motori a quattro tempi). In effetti la *ORBITAL ENGINE* ha sviluppato e messo a punto una tecnica di iniezione denominata ***Air Assisted Injection*** (iniezione assistita ad aria compressa a pressione relativamente bassa, circa 10 bar) in grado di incrementare l'atomizzazione del combustibile (con notevole riduzione del diametro medio delle gocce prodotte detto anche *Sauter Mean Diameter SMD*).

La *ORBITAL* ha ottenuto la realizzazione di spray di combustibile a basso SMD sfruttando la capacità dell'aria compressa di polverizzare il carburante liquido e di fornirgli l'energia necessaria alla sua dispersione, energia che nei sistemi di iniezione diretta puramente meccanici è fornita dall'elevata pressione di iniezione di cui si è detto. Con questo tipo di sistemi di iniezione la *ORBITAL ENGINE* ha potuto sviluppare propulsori due tempi per uso automobilistico in grado di avere prestazioni paragonabili a quelle dei propulsori quattro tempi, soprattutto dal punto di vista delle emissioni inquinanti.

Negli anni passati la *ORBITAL*, in collaborazione con la *APRILIA*, ha applicato la sua tecnica anche ad un motore 2 tempi di cilindrata da 50 cm³, presentante particolari riduzioni sia nei

consumi di combustibile e di olio lubrificante che nell'emissione di sostanze inquinanti. Questi risultati, certamente interessanti, sono stati ottenuti però adottando accorgimenti che complicano notevolmente lo schema base (si pensi alla necessità dell'installazione di un piccolo compressore volumetrico per la produzione di aria compressa sul motore da 50 cm³).

Infatti la tecnica adottata prevede la presenza, oltre che del compressore volumetrico, di ben due "iniettori", quello vero e proprio per l'iniezione della benzina in una precamera di miscelazione ed un iniettore che mette in comunicazione la camera di miscelazione con la camera di combustione. Entrambi da gestire mediante una centralina di comando. Questo mostra il notevole livello di complicazione tecnica raggiunto con conseguente aggravio dei costi di produzione e manutenzione tanto che le soluzioni ORBITAL sono scarsamente adottabili sui propulsori per scooter, che sono propulsori notoriamente a basso valore aggiunto.

Il sistema ORBYTAL – SYNERJECT in sintesi

Il cuore di questo sistema è un iniettore comandato da un solenoide che inietta una miscela aria-combustibile finemente polverizzata direttamente nella camera di combustione (fig. 2.1 illustra il sistema di iniezione).

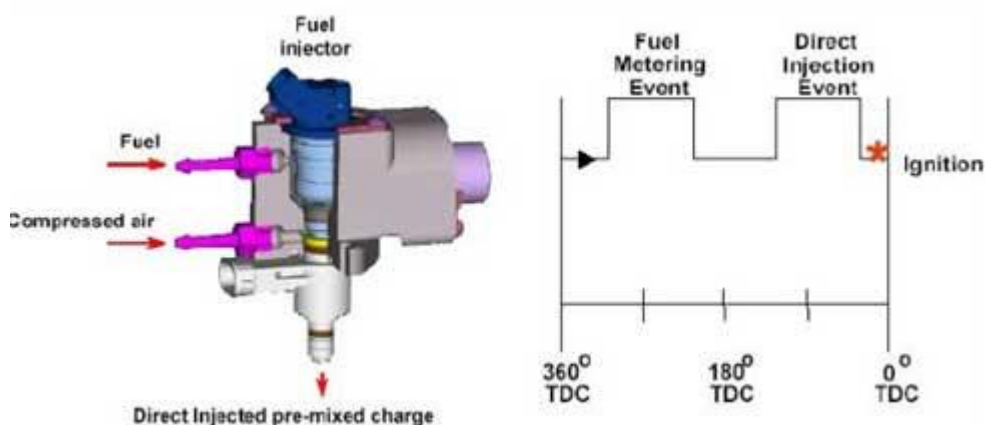
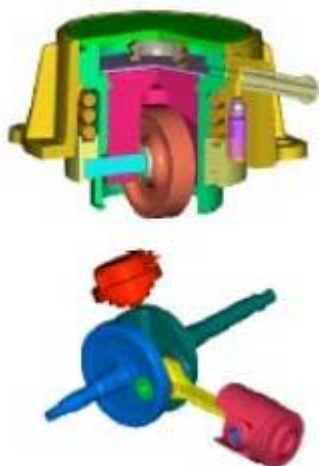


Fig. 2.1 Gruppo di iniezione ORBITAL e sequenza di iniezione

L'iniettore del combustibile prima invia una quantità controllata di combustibile nella camera ad aria nella quale si raggiunge una pressione di 6 bar in corrispondenza dell'iniettore ad aria, quest'ultimo inietta la miscela di aria e benzina sotto forma di una nuvola finemente polverizzata.



Le piccole dimensioni delle particelle che si possono ottenere con questo sistema a bassa pressione permettono una evaporazione molto veloce del combustibile, minimizzando il tempo per la preparazione della miscela all'interno del cilindro. Questo sistema, in combinazione con un'adeguata forma della testata e della cielo del pistone, entro certi limiti permette il processo di stratificazione della carica. L'aria compressa richiesta per il processo di iniezione è fornita generalmente da un piccolo compressore a stantuffo azionato da una camma posta sull'albero motore come mostrato in fig. 2.2

Fig. 2.2 Compressore ORBITAL

Il combustibile è invece fornito da una pompa convenzionale operante ad una pressione compresa tra 6.2 e 7.2 bar (fig. 2.3).

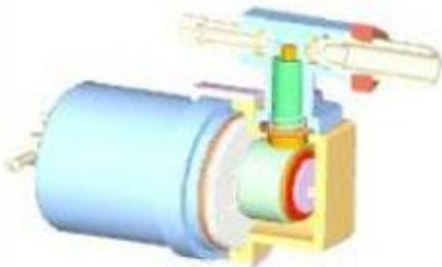


Fig. 2.3 pompa della benzina del sistema ORBITAL

I risultati di questo sistema sono notevoli: bassi consumi specifici (si può raggiungere un'economia fino al 20% rispetto ai 2T convenzionali con valori che si aggirano sui 220-260 g/CVh), riduzioni drastiche di HC e CO. L'olio viene gestito mediante un ulteriore sistema di iniezione che provvede a lubrificare i punti critici del motore ottenendo fumosità prossima a zero e candele sempre pulite.

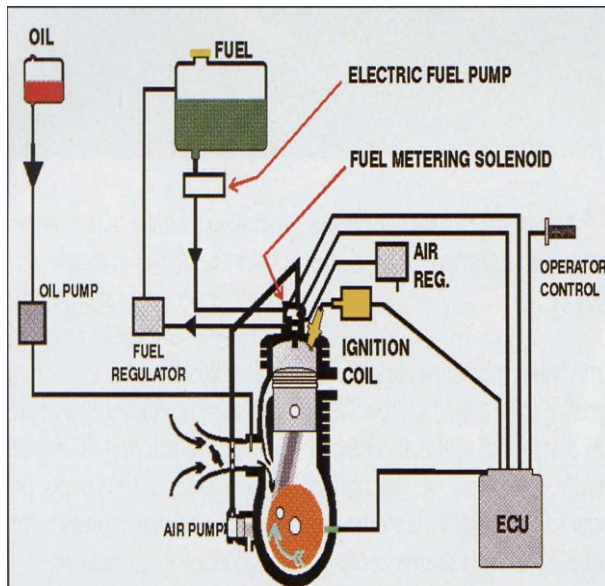
Gli inconvenienti di questo sistema sono molteplici tra i quali si ricorda:

a) la pressione di iniezione si aggira intorno a 6 bar, quindi non è possibile ritardare molto la fase di iniezione, poiché la pressione all'interno del cilindro sale bruscamente dopo la chiusura dello scarico. Del resto innalzare la pressione di iniezione comporterebbe uno spreco di lavoro eccessivo ai bassi carichi.

b) L'iniettore tende a sporcarsi poiché, per mantenere un minimo di stratificazione e non potendo iniettare in ritardo, si deve accendere quando l'iniettore è ancora aperto, questo implica che parte dei gas combusti entrano all'interno dell'iniettore stesso, formando depositi carboniosi; inoltre l'accensione anticipata pregiudica il rendimento del motore.

c) Il sistema risulta complesso e costoso.

Questo sistema è stato adottato da Aprilia (DI Tech) e successivamente da Piaggio (Pure Jet) e in campo nautico da MERCURY con i suoi Optimax e da TOHATSU con i suoi TLDI.



L'aria in pressione è prodotta da un piccolo compressore alternativo, azionato direttamente dall'albero motore attraverso una camma, e controllato da un regolatore di pressione.

Orbital ha sviluppato una sofisticata metodologia di iniezione con la quale, dosando le aperture dell'iniettore principale e di quelle del combustibile, è possibile controllare la composizione della miscela nelle varie zone del getto dello spray.

Oltre al controllo delle emissioni si ottengono con questo sistema anche consumi estremamente ridotti. Il sistema trae beneficio dall'unione di componenti derivazione "automotive" prodotti da SIEMENS.

B) Tra gli altri sistemi proposti negli ultimi anni, che hanno mostrato capacità di applicazione e realizzazioni prodotte in gran serie, è opportuno citare:

- Il sistema IAPAC – IFP
- Il sistema FAST – PIAGGIO

B1) Il sistema IAPAC (Injection Assistè Par Air Comprimè) è stato sviluppato dall'Institut Francais du Pètrole (IFP) e consiste essenzialmente nell'iniezione attraverso una valvola a fungo posta sulla testata di motore della miscela ricca, preparata in prossimità della valvola stessa per mezzo di un elettroiniettore, con l'aiuto dell'aria prelevata dal carter di precompressione.

L'aria fluisce verso la testata dal basamento durante la corsa del pistone verso il PMI, contemporaneamente avviene il lavaggio. In questa fase viene anche effettuata l'iniezione di combustibile molto vicino alla valvola.

I vantaggi sono : assenza di compressore esterno; pilotaggio pneumatico della valvola.

Gli svantaggi sono: un grado inferiore di atomizzazione condizionato dalla bassa pressione raggiungibile nel basamento; difficoltà di ottimizzare sia alle basse che alle alte velocità del motore per i ritardi dinamici nel comando di attuazione .

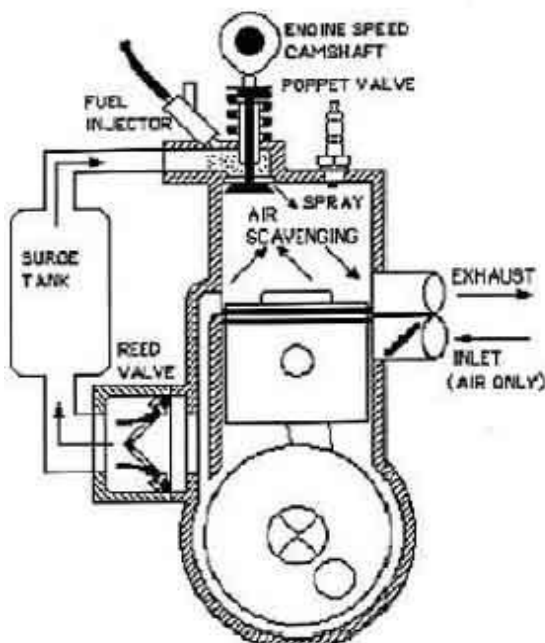


Fig. 1.8 motore IAPAC

Un iniettore a bassa pressione inietta una data quantità di combustibile, che va a depositarsi sul fungo della valvola; in questo modo il combustibile ha un certo tempo di residenza che permette una parziale evaporazione prima dell'apertura della valvola e quindi dell'iniezione vera e propria nel cilindro. La qualità del getto aria-benzina è ulteriormente migliorata dalla forma a tubo di Venturi della sede valvola. La restante parte di benzina non evaporata avrà tutto il tempo necessario per miscelarsi con l'aria pompata attraverso le classiche luci di lavaggio. Da notare l'estrema importanza della posizione valvola-iniettore: sufficientemente lontana dalla luce di scarico, per ridurre al massimo i pericoli di cortocircuito e strategicamente collocata in modo tale da facilitare, con l'interazione dei flussi interni al cilindro, la formazione di una miscela stratificata a partire dalla posizione della candela. I risultati al banco di prova ottenuti con un motore di 250 cm³ sono stati una potenza massima raggiunta di 15 CV a 4500 giri/min, quindi si ricava una potenza specifica di 60 CV/l con consumi specifici pari a 185 g/CVh.

Gli svantaggi di questo sistema di iniezione sono:

- a) motore costruttivamente complicato e quindi costoso
- b) non si ha la possibilità di ottenere una buona stratificazione, poiché si deve iniettare piuttosto in anticipo rispetto al punto morto superiore perché all'interno del serbatoio di accumulo non si raggiungono pressioni elevate.

In campo nautico il motore IFP è stato adottato dal costruttore SELVA.

▪ Il sistema FAST – PIAGGIO

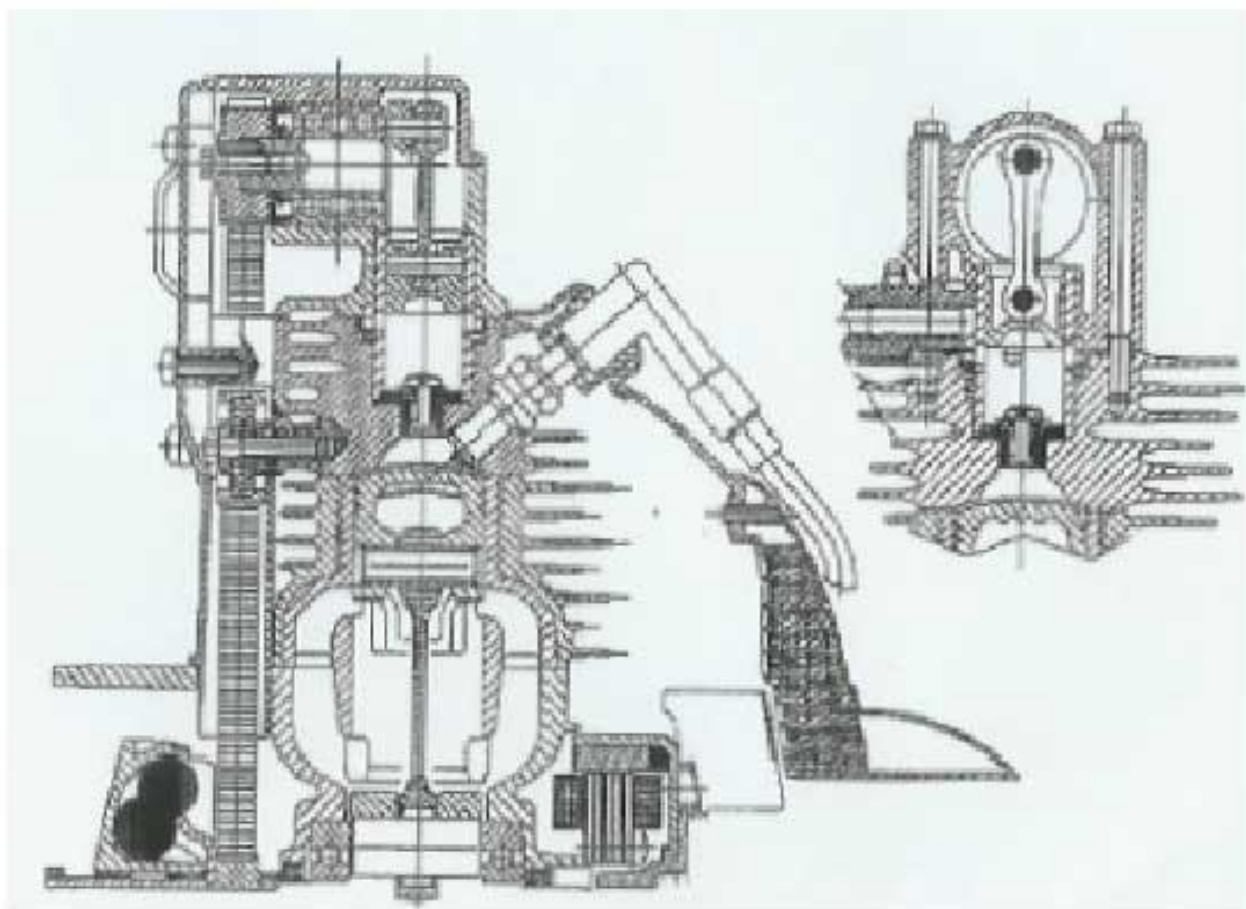


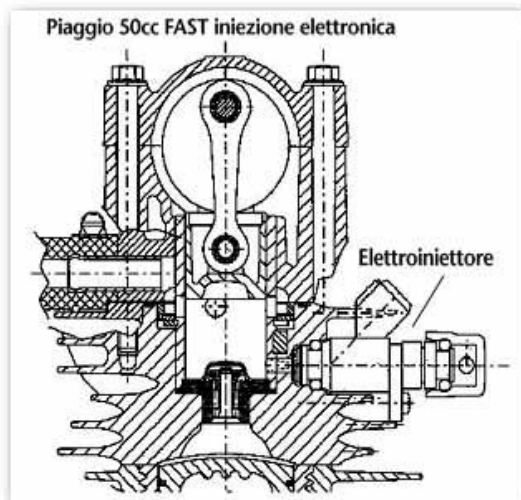
Fig. 1.7 sistema piaggio fast

Nel sistema Fast (fig. 1.7) la pressione di iniezione pari a 3-4 bar è generata da un compressore a stantuffo collocato sulla testa del cilindro ed azionato dall'albero motore tramite cinghia di trasmissione.

Il combustibile proveniente dal carburatore entra nel compressore dove si forma una miscela ricca. Il Vantaggio di questa soluzione sta nella possibilità di far pervenire il combustibile nel cilindro con un ritardo adeguato a dar luogo alla stratificazione della carica. Infatti quando la differenza di pressione tra cilindro e cilindretto del compressore supera 3 bar, una valvola si apre automaticamente determinando il passaggio della miscela ricca dal compressore alla camera. Purtroppo questo motore non è mai stato sviluppato per poter realizzare la stratificazione bensì per il funzionamento in carica omogenea con gli inconvenienti di cattive combustioni ai bassi carichi, tipiche dei 2T tradizionali. Inoltre la soluzione Piaggio Fast è costruttivamente complessa e costosa.

Il sistema FAST a comando elettronico

sviluppato originariamente da Piaggio, adottato di serie sul veicolo Vespa ET2 iniezione.



Sezione trasversale del motore, mostrante il compressore, l'iniettore elettronico del combustibile e l'iniettore diretto.

Il suo principio di funzionamento è assai semplice, mentre avviene il lavaggio con aria il compressore, integrato nella testata e azionato dall'albero motore tramite una cinghia sincrona, aspira miscela ricca, preparata da un elettroiniettore.

Successivamente, durante la fase di compressione viene effettuata l'iniezione della miscela ricca in camera di combustione attraverso una valvola ad apertura automatica basata sulla differenza di pressione fra le due camere.

In seguito viene incendiata la carica opportunamente stratificata, avviene l'espansione ed il ciclo si ripete.

Tale soluzione, che prevede la preparazione della miscela attraverso un elettroiniettore, garantisce il superamento delle norme EURO 2 relative alle emissioni dei ciclomotori.

I vantaggi del sistema FAST a comando elettronico sono riscontrabili in:

- assenza di ritardi dinamici, in quanto l'iniezione è basata sul dislocamento del pistone del compressore che per la sua configurazione geometrica non presenta spazi nocivi;

- mantenimento nel tempo della forma dello spray per la ridotta possibilità di incrostazioni sulla valvola che, aprendosi automaticamente, garantisce un flusso unidirezionale di sola miscela fresca.

Gli svantaggi invece sono riconducibili a:

- testata più complicata; fasatura di iniezione fissa; impossibilità di suddividere il ciclo di iniezione in più eventi.

3. – Alcune considerazioni di carattere generale

La soluzione da adottare per questa categoria di propulsori deve necessariamente essere a bassissimo costo (limitato valore aggiunto dell'intero propulsore) ed in grado di migliorare sensibilmente le "prestazioni" del propulsore in termini di limitate emissioni inquinanti, tali da renderlo compatibile con le prescrizioni di legge attuali e per il prossimo futuro.

La soluzione più praticata tenta di risolvere questi problemi mediante l'adozione della strategia di iniezione diretta del combustibile in camera di combustione, puramente meccanica, prevedendo un dispositivo di iniezione dal basso (o bassissimo) costo. La realizzazione di un tale dispositivo non può che partire dall'adozione di iniettori commerciali del tipo di quelli impiegati nel campo automobilistico, le cui grandi quantità prodotte garantiscono un basso costo industriale.

In pratica una idea sarebbe quella di adottare iniettori destinati ai propulsori automobilistici per l'iniezione diretta, a valle di una necessaria riduzione delle forature di uscita, per adattarli alle limitate portate necessarie nei propulsori per scooter.

La possibilità di ottenere una combustione completa del combustibile iniettato in camera a pressione non troppo elevata, è legata allo studio accurato di una serie di parametri, come verrà meglio descritto riguardo ai motori a 4 tempi ad iniezione diretta, ed è legata al fatto che occorrerà abbandonare la strada dell'ottenimento di miscele combustibile-comburente omogenee ed occorrerà perseguire la strada della carica "stratificata" in camera di combustione. Il funzionamento stratificato durante tutto l'arco di funzionamento del motore richiede l'accurato studio della fluidodinamica interna del motore e particolarmente dell'accoppiamento tra la camera di combustione, luci e condotti di immissione spray di combustibile e posizione della candela di accensione. Nel caso dei motori a due tempi l'elemento massimo di criticità consiste nella circostanza che questi motori sono veloci e quindi la formazione della miscela deve avvenire in tempi brevissimi, ridotti almeno di un 50% rispetto ai motori a 4 tempi.

L'accoppiamento camera di combustione, posizione iniettore e posizione della candela, richiederà l'attenta valutazione delle modalità di immissione dell'aria comburente, modalità che, per garantire una combustione ottimale, potrebbero richiedere l'aumento della pressione all'immissione mediante configurazioni particolari dei condotti (fasatura dei condotti di aspirazione) e/o mediante l'adozione di dispositivi ausiliari (compressori di sovralimentazione). Altra strada percorribile è quella dell'adozione di flussi di lavaggio "direzionali" mediante l'adozione di valvole di scarico e/o di immissione.

Altro elemento di criticità per la realizzazione di un moderno motore a due tempi è la necessità di ricorrere a sistemi di lubrificazione che non comportino perdite di olio lubrificante attraverso le fasi di ricambio della carica. Come è noto nei motori a due tempi tradizionali del tipo ad accensione comandata l'olio lubrificante, per semplicità, veniva addotto al motore in miscela con il carburante e ciò ha sempre comportato elevati consumi di olio ed elevate emissioni inquinanti di idrocarburi incombusti.

Il miglioramento delle prestazioni di un motore a combustione interna a due tempi, in termini di incremento di rendimento e diminuzione di emissioni, si incentra, quindi, nello studio della riduzione di olio lubrificante che fuoriesce dalle luci di lavaggio e dallo sviluppo di un sistema di iniezione diretta in camera di combustione.

Le soluzioni da adottare richiedono conoscenze specifiche nel settore della motoristica e della fluidodinamica applicata ai motori a combustione interna, al fine di sviluppare metodologie di indagine teorico-numerica e sperimentali tali da consentire una ottimizzazione della fluidodinamica interna del motore, della camera di combustione e dell'accoppiamento al sistema di alimentazione.

Appare chiaro, quindi, come il duplice problema dell'elevato consumo e delle emissioni inquinanti sia causato principalmente dalle quantità di combustibile che fuoriescono allo scarico; il rimedio è quindi quello di evitare questa possibilità e la soluzione è quella di iniettare il carburante a scarico chiuso.

Bisogna però analizzare e studiare quali sono le implicazioni nei confronti del motore e del suo funzionamento adottando una tale soluzione.

I moderni motori 2T raggiungono potenze specifiche ragguardevoli, ma per questo necessitano di elevate velocità di rotazione. I tipici valori di un 2T di medie prestazioni sono potenza massima a 8000-8500 giri/min con capacità di rotazione fino a 10000 giri/min.

La capacità di raggiungere tali regimi di rotazione implica una permeabilità, cioè l'attitudine a lasciar fluire il gas all'interno del cilindro, assai elevata, condizione che si ottiene attraverso tre interventi sul motore:

- Adeguati angoli di scarico e di travasi, con fasatura ovviamente simmetrica rispetto al PMI, essendo essi controllati dal pistone.
- Adeguata legge di incremento dell'area delle luci sul cilindro durante l'apertura da parte del pistone in funzione dell'angolo di manovella.
- Anticipo di accensione ottimizzato per ottenere le massime prestazioni senza però incorrere nel fenomeno della detonazione, il ben noto "battito in testa", che può portare alla rottura del pistone.

Per soddisfare questi vincoli, generalmente, i motori presentano fasature e sezioni di scarico e di lavaggio adeguate e anticipi di accensione, prima del PMS, necessariamente variabili in funzione della velocità di rotazione e del carico, ma sempre in un *range* sicuro da problemi di detonazione.

Se però si pone attenzione alla riduzione delle emissioni da idrocarburi incombusti, appare immediatamente evidente che l'iniezione debba avvenire a luci di scarico chiuse, ma nello stesso tempo il combustibile iniettato debba evaporare completamente prima dell'evento di accensione per una combustione accettabile.

Deve cioè essere raggiunta quella condizione, o meglio capacità, dell'insieme centralina elettronica/sistema di iniezione/motore conosciuta come "late injection capability", cioè capacità di sostenere una iniezione ritardata.

Oltre a questa caratteristica, che deve essere considerata quale condizione necessaria per il due tempi, anche la capacità di funzionare con miscele tendenzialmente magre è di vitale importanza.

Infatti da una parte emerge la necessità di ridurre le emissioni di ossido di carbonio (CO) e dall'altra l'importanza di abbassare il consumo di combustibile e quindi conseguentemente la produzione di anidride carbonica (CO₂) secondo quanto concordato negli accordi di Kyoto.

Nella figura 3.1 che segue si riporta il diagramma della distribuzione di un piccolo motore a due tempi a tre luci, del tipo ad accensione comandata.

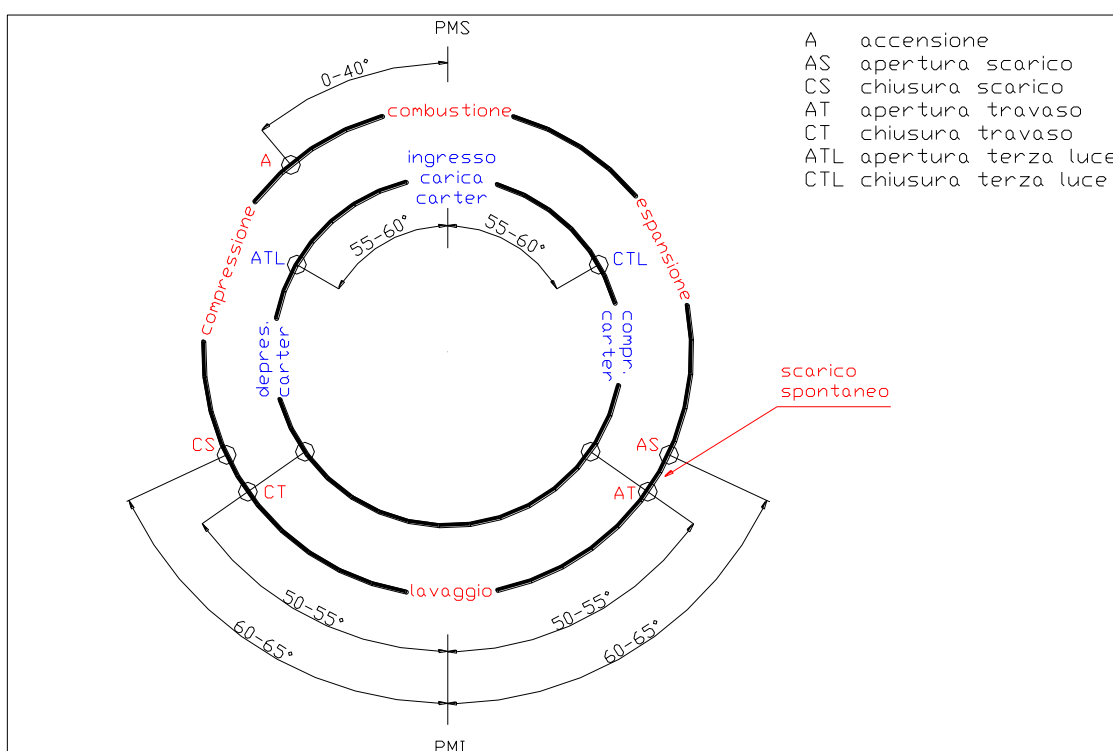


Fig. 3.1 Diagramma della distribuzione relativo ad un motore a due tempi

La Fig. 3.2 riporta una sequenza di immagini che riproducono la verosimile situazione che si determina durante la fase di ricambio dei gas, in cui i gas combusti sono colorati di rosso mentre la carica fresca in blu. La sequenza delle figure è quella, procedendo dall'alto in basso, che si ottiene in successione andando da sinistra a destra.

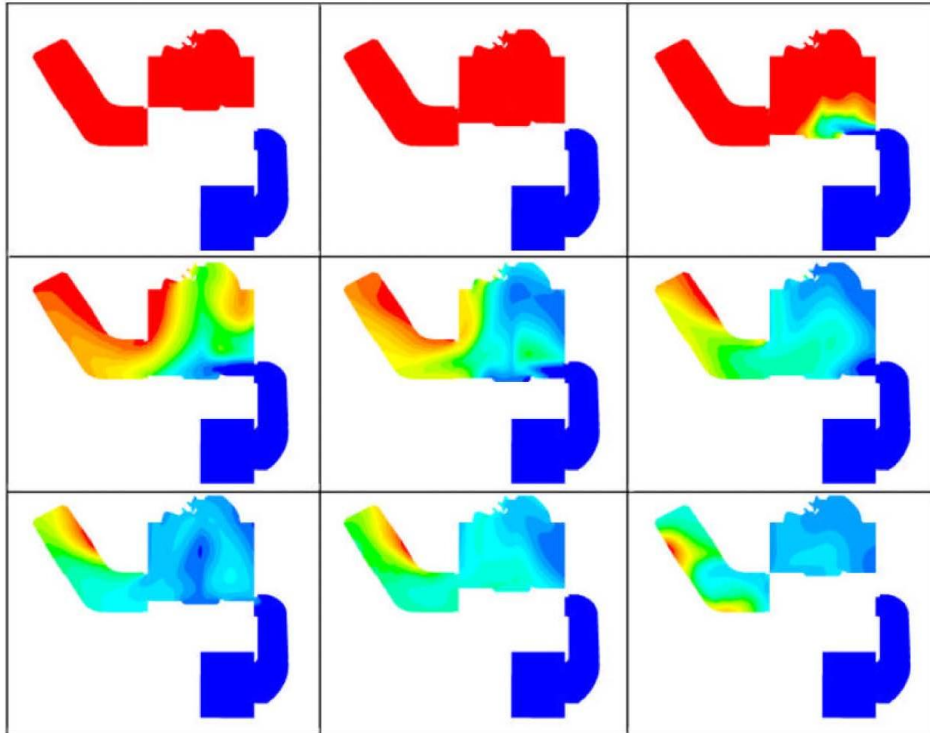


Fig. 3.2 *Rappresentazione del lavaggio*

Il colore azzurro indica un lieve riscaldamento della carica fresca all'interno del cilindro, così come il giallo ne rappresenta una temperatura maggiore. Dalla figura inoltre è evidente la parte di carica fresca che cortocircuita, ovvero imbecca insieme ai gas combusti le luci di scarico.

Nel caso della figura 3.3 le luci di immissione e le luci di scarico si trovano le une opposte alle altre. Si realizza così un lavaggio trasversale in cui il passaggio diretto dell'aria dall'uno all'altro tipo di luci è impedito da un'opportuna inclinazione dei condotti di immissione della carica fresca prima del suo ingresso all'interno del cilindro o da un deflettore realizzato sulla testa del pistone (vedi Fig.3.3).

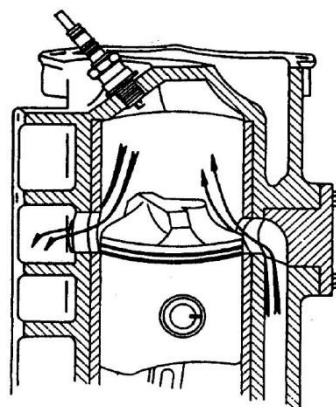


Fig. 3.3 *Lavaggio trasversale*

Nella figura 3.4 si riporta invece lo schema di un cilindro in cui le luci di lavaggio sono disposte perpendicolarmente alla direzione dello scarico (vedi Fig.3.4).

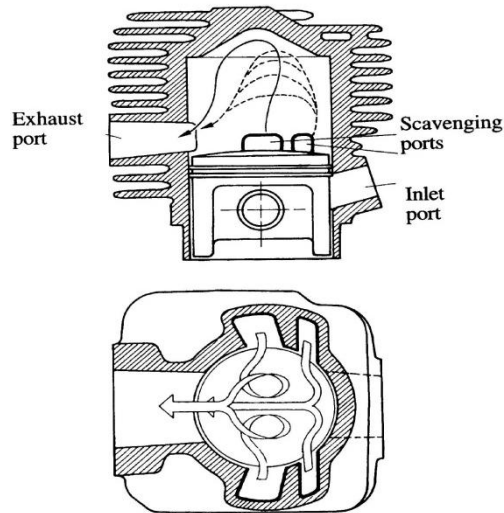


Fig. 3.4 Lavaggio a corrente tangenziale

4.- Studio analitico del lavaggio.

Nello studio del lavaggio, essendo molto complesso, si considerano due casi limite. Nel primo caso si suppone la carica fresca abbia una diffusione laterale perfetta senza lasciare zone non lavate durante il suo percorso; si comporti cioè come un pistone fluido che spinge dinanzi a sé i gas combusti senza mescolarsi e senza scambiare calore con essi. Secondo questa prima ipotesi il volume entrato nel cilindro sarebbe pari al volume dei gas combusti che sono usciti, avendo in questo modo un coefficiente di riempimento pari ad uno. La seconda ipotesi invece suppone che il fluido di lavaggio si mescoli perfettamente con i gas combusti in modo che durante il processo si abbia un fluido omogeneo costituito da gas combusti e carica fresca. In questa ipotesi per cacciare via dal cilindro i gas combusti sarebbe necessaria una carica di fluido fresco infinita. Queste due ipotesi sono rappresentate molto bene nella Fig.4.1.

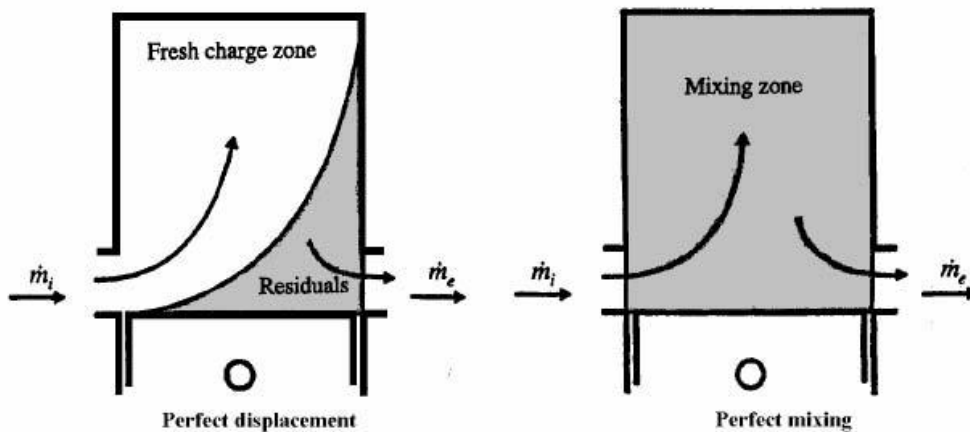


Fig. 4.1 Casi limite per lo studio analitico del lavaggio.

Nella pratica avviene qualcosa di intermedio tra la prima e la seconda ipotesi. La carica fresca spinge i gas combusti all'esterno del cilindro mescolandosi parzialmente con essi. A causa di ciò la quantità di aria che bisogna immettere nel cilindro ad ogni ciclo è sempre maggiore della cilindrata.

Per questo motivo il rapporto:

$$y = \frac{m_L}{\delta_a \cdot V}$$

è sempre maggiore dell'unità. Questo rapporto y rappresenta il coefficiente di lavaggio in cui m_L è la massa di fluido di lavaggio, δ_a la densità del fluido alle condizioni di pressione e temperatura ambiente mentre V è la cilindrata.

In altre parole il coefficiente di lavaggio, che nella terminologia anglosassone è denominato "Delivery ratio" è il rapporto tra la massa d'aria che attraversa le luci di travaso, e la massa di fluido che riempirebbe il volume della cilindrata.

Il coefficiente di riempimento λ_v è, al pari di quanto definito per i motori a 4 tempi, il rapporto tra la massa di fluido fresco che effettivamente rimane nel cilindro motore in ogni istante m_{fr} e la massa di riferimento in quell'istante:

$$\lambda_v = \frac{m_{fr}}{\delta_a \cdot V} = \frac{V_a}{V}$$

Dove V_a è il volume occupato dalla carica fresca, mentre V rappresenta la cilindrata.

Si definisce invece *rendimento di lavaggio* η_{lav} il rapporto tra la massa m_{fr} di fluido fresco che effettivamente rimane nel cilindro e quella m_L introdotta durante l'operazione:

$$\eta_{lav} = \frac{m_{fr}}{m_L}$$

Conoscendo il coefficiente di lavaggio e quello di riempimento si può scrivere:

$$\eta_{lav} = \frac{\lambda_v}{y}$$

Valutando il coefficiente di riempimento e il rendimento di lavaggio per i due casi limite si avrà che nella prima ipotesi $\eta_{lav}=1$ mentre $\lambda_v=1$. Nel secondo caso invece si ha:

$$\lambda_v = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{1}{e^{ay}} \right) \qquad \eta_{lav} = \frac{\lambda_v}{y} = \frac{1}{ay} \left(1 - \frac{1}{e^{ay}} \right)$$

Nelle due formule compare il rapporto a che è pari a:

$$a = \frac{\delta_a \cdot V}{\delta_{m_i} \cdot V'}$$

dove δ_a indica la densità del fluido fresco alle condizioni ambiente e δ_{mL} quella del fluido di lavaggio, che sta entrando nel cilindro.

Nel diagramma di Fig.4.2 sono rappresentati in ordinate η_{lav} e λ_v ed in ascisse y , con $a=1$. Dal diagramma si osserva che con la prima ipotesi il coefficiente di riempimento raggiunge il valore unitario per $y=1$, vale a dire quando il fluido di lavaggio è in quantità pari alla cilindrata, nella seconda, invece, ciò non può avvenire. Graficamente si osserva come l'aumento di λ_v , ottenuto attraverso un incremento di y , porti ad una diminuzione di η_{lav} con conseguente maggior spesa di energia per il funzionamento della compressore (carter pompa o effettivo compressore volumetrico). Il vero processo è quello intermedio tra il primo e il secondo caso limite. In realtà il processo reale si avvicina maggiormente alla curva di miscelazione perfetta.

Osservando questi risultati, si deduce che vi sarebbe da un lato la convenienza ad aumentare il più possibile la quantità di fluido di lavaggio introdotta in ogni ciclo, dall'altro, limitare la complessità, e quindi il costo degli organi destinati alla compressione, nonché la potenza da essi assorbita. Bisogna raggiungere quindi un compromesso che permette di ottenere un lavaggio soddisfacente.

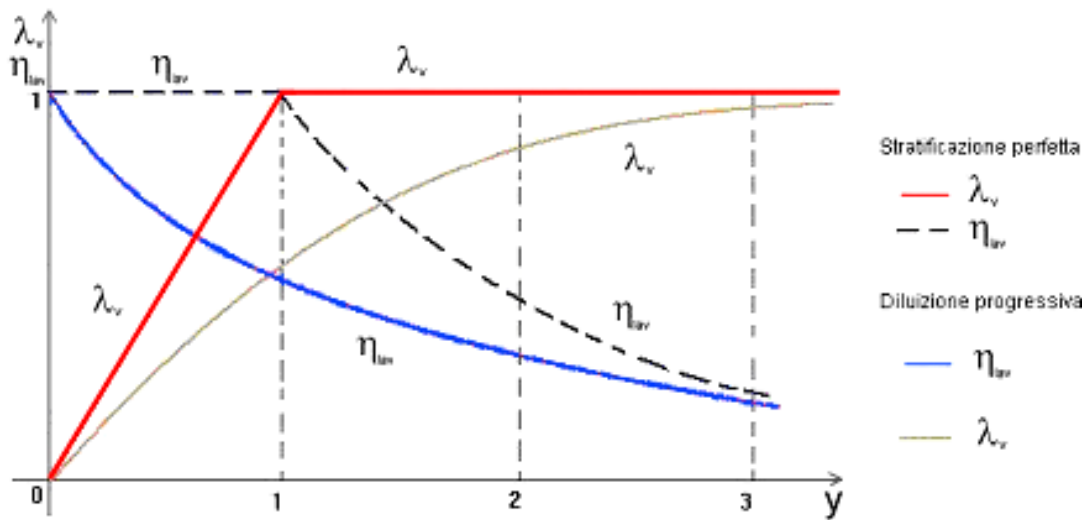


Fig. 4.2 Rappresentazione grafica dei due casi limite di lavaggio perfetto o diluizione completa

5. Vantaggi, svantaggi e applicazioni nel due tempi.

Il motore a due tempi è caratterizzato da una semplicità costruttiva superiore a quella del quattro tempi. Questo si traduce in una riduzione del peso e delle dimensioni consentendo al due tempi di essere utilizzato dove si richiedono pesi e ingombri ridotti a parità di potenza erogata. Inoltre si traduce anche in una riduzione dei costi di produzione e manutenzione rispetto ad altri tipi di motore. Sono queste le ragioni che, fino ad oggi, hanno fatto preferire questo tipo di motore nei campi in cui è usato.

Applicazione		2 Tempi (%)	4 Tempi (%)
Motoseghe		100	-
Motori fuoribordo		50	50-
Motori industriali	30 – 100 cm ³	30	70
	100 – 150 cm ³	10	90
	> 150cm ³	-	100
Ciclomotori		30	70
Motocicli e scooter	< 125 cm ³	25	75
	125 – 349 cm ³	10	90
	350 – 449 cm ³		100
	450 – 749 cm ³		100
	> 750 cm ³	-	100
Autovetture		-	100

Tab. 5.1 Campi di applicazione dei motori a 2 e 4 tempi

Più precisamente il ciclo a due tempi è impiegato nei motori a combustione interna ad accensione comandata e nei motori ad accensione per compressione. Essi possono essere suddivisi in tre categorie fondamentali in base alla potenza erogata: motori per applicazioni che richiedono una ridotta potenza (0,5 ÷ 50 kW), motori di media potenza (50 kW ÷ 1 MW) e motori di grande potenza (superiore ad 1 MW).

I più piccoli motori a due tempi sono in genere ad accensione comandata, aspirati con compressione nel carter del fluido di lavaggio come per esempio motoseghe, taglia-erba, motoslitte, motori fuoribordo, piccoli gruppi elettrogeni, ciclomotori, scooters, motocicli e ultraleggeri.

Nella Tab.5.1 sono riportati qualitativamente i campi d'applicazione di motori a due e quattro tempi per potenze medio-piccole. I motori di dimensioni maggiori, ovvero i grandi motori, sono impiegati invece in applicazioni marine. Sono in genere propulsori lenti, ad accensione per compressione, sovralimentati, capaci di soddisfare le richieste di potenza e di velocità di qualsiasi grande imbarcazione impiegando un numero di cilindri relativamente basso. In questi casi si possono raggiungere rendimenti globali superiori al 52%.

Per quanto riguarda questo tipo di motore, essendo il ciclo termodinamico formato da due sole corse del pistone, si potrebbe affermare che a parità di cilindrata, regime, peso e ingombro, essi possano erogare una potenza doppia rispetto ad un motore a quattro tempi. In realtà ciò sarebbe vero se tale vantaggio non fosse vanificato dai numerosi problemi connessi a questo tipo di macchina quali, specialmente nei piccoli motori, i notevoli difetti di riempimento, l'eccessiva diluizione della miscela fresca con i gas combusti, l'inevitabile perdita di combustibile (o solo di aria nei motori ad accensione per compressione) e lubrificante (quando non esiste un impianto specifico per la lubrificazione) nonché il lavoro speso per il pompaggio della miscela fresca. I suddetti inconvenienti riducono i rendimenti parziali e quindi quello globale del motore.

Un motore a due tempi può dunque sviluppare, nelle migliori ipotesi, una potenza pari ad $1,4 \div 1,6$ di quella di un corrispondente motore a quattro tempi.

E' da aggiungere poi che il carico meccanico e termico degli organi di un motore a due tempi è notevolmente superiore rispetto a quello di un corrispondente motore a quattro tempi. Il pistone di un motore due tempi, infatti, a pari velocità di rotazione dell'albero motore ed intervallo temporale di osservazione, è sottoposto alla massima temperatura e pressione del ciclo il doppio delle volte rispetto ad un pistone di un motore a quattro tempi.

Questa circostanza, insieme al minor effetto refrigerante della carica fresca che non perviene al cilindro direttamente dall'esterno del motore e all'assenza di un sistema di lubrificazione efficiente, dà luogo a maggiori difficoltà di raffreddamento.

6. - Altri sistemi di iniezione per motori a 2 tempi utilizzando onde di pressione

Sistema di iniezione FICHT

Il dispositivo, cuore di questo sistema di iniezione, inietta all'interno della camera di combustione solo combustibile. La modalità con cui viene messo in pressione il fluido da iniettare è deducibile dall'esame delle due figure 6.1 e 6.2.

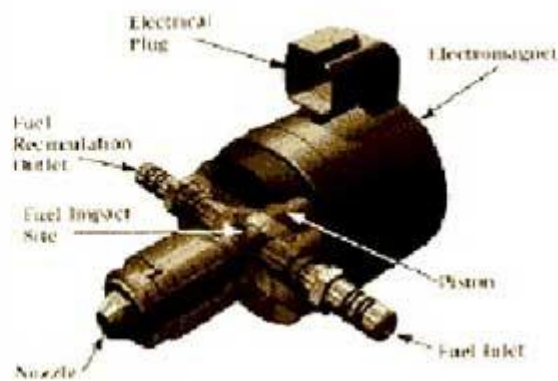
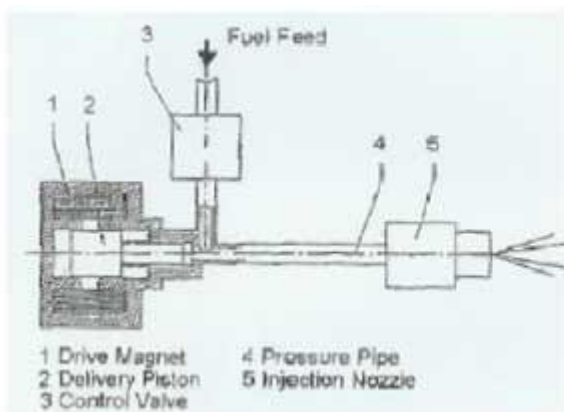


Fig. 6.1 schema dell'iniettore FICHT

Fig.6.2 vista dell'iniettore FICHT

Il combustibile viene dapprima introdotto a bassa pressione all'interno del piccolo cilindro dell'iniettore mentre il pistone-pompa (delivery piston) si porta al punto morto superiore per poi essere accelerato dal solenoide sempre mantenendo la valvola 3 aperta. Il pistone-pompa nel suo moto chiude la valvola 3, provocando l'innalzamento della pressione del combustibile che determina con l'apertura dell'iniettore effettivo (injection nozzle) l'inizio dell'iniezione. Il sistema ha il pregio di conseguire il completamento dell'iniezione in breve tempo, oltre a fornire buone caratteristiche allo spray, tali da garantire elevata efficienza e bassi consumi analoghi ad un motore a 4T di pari potenza. Complessivamente il sistema risulta composto da pochi elementi di piccolo ingombro e di forma allungata che si adattano perfettamente all'alloggiamento in una testata di un piccolo motore. Questo dispositivo funziona secondo un principio simile a quello del sistema Ram Tuned (descritto più avanti), nel senso che viene sfruttato in entrambi il fenomeno del colpo d'ariete, ma, mentre nel Ram Tuned è il fluido che accelera per poi arrestarsi improvvisamente alla chiusura di una valvola, nel sistema Fitch è un pistone che va ad impattare contro il fluido mandandolo in pressione. Le caratteristiche di questo sistema di iniezione sono particolarmente adatte ad un motore a 2T: la curva di pressione e quindi la qualità dello spray è indipendente dalla quantità iniettata di combustibile e dalla velocità del motore; essendo molto breve il picco di pressione che si raggiunge (0.2-1.5 ms con conseguente incremento della pressione a 25-65 bar) anche l'iniettore si apre e si chiude velocemente, consentendo una buona polverizzazione del combustibile. In tali circostanze possono essere iniettate sia piccole che grandi quantità di combustibile (da 1 a 50 mm³). Il sistema può essere controllato elettronicamente in quanto è meccanicamente disaccoppiato dal motore; è così possibile operare le correzioni necessarie ad un buon funzionamento nelle varie condizioni di carico, velocità, temperatura ecc.; sono possibili velocità di rotazione del motore molto elevate (> 10000 giri/min) grazie al breve tempo necessario all'iniezione e alla bassa inerzia elettro magnetomeccanica dei componenti mobili. Il sistema di lubrificazione è analogo al sistema Orbital.

Gli svantaggi principali del sistema Ficht sono:

- a) *non linearità del controllo, causata dalla dinamica molto variabile del sistema.*
- b) *se la valvola in testa all'iniettore si deforma, la portata erogata varia in misura notevole*
- c) *l'iniezione avviene a pressione dinamicamente molto variabile e ciò ha come conseguenza una dispersione del diametro medio delle gocce e quindi una diversa penetrazione e velocità del getto, il che penalizza la corretta stratificazione della carica.*

Questo sistema è stato adottato da EVINRUDE con i suoi motori E-TEC.

Sistema di iniezione diretta Ram Tuned

Il principio di funzionamento di questo sistema, nato inizialmente per i motori Diesel, si basa sul fenomeno del colpo d'ariete: un generico fluido in movimento, arrestato improvvisamente, diventa sede di un aumento di pressione. Una analisi teorica del fenomeno è quanto mai complessa, per cui per analizzare quantitativamente il colpo d'ariete per poi sfruttarlo in un sistema di iniezione è opportuna la sperimentazione diretta. Lo schema del sistema Ram Tuned è mostrato in fig.6.3.

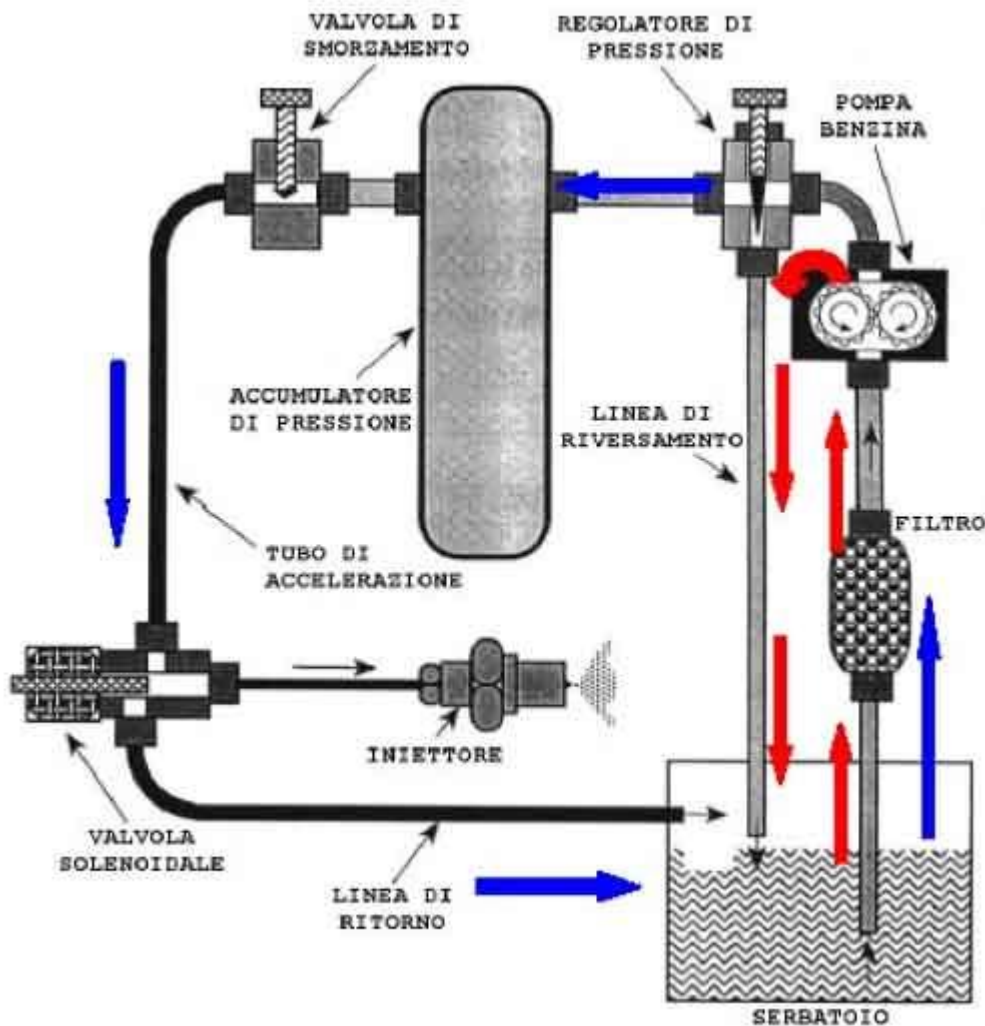


Fig. 6.3 - Schema del sistema Ram Tuned

Il ciclo di iniezione si svolge sostanzialmente in tre fasi. In una prima fase, la valvola a solenoide è inizialmente chiusa, impedendo così il passaggio di combustibile nel circuito secondario (filtro-pompa-regolatore di pressione- accumulatore di pressione - valvola di smorzamento- tubo di accelerazione-linea di ritorno) ossia il circuito indicato con le frecce in blu nella fig.6.3)

Quindi il combustibile fluirà soltanto lungo il circuito primario (filtro - pompa - regolatore di pressione - linea di riversamento) ossia il circuito indicato con le frecce in rosso della fig. 6.3), grazie all'azione della pompa che fornisce un valore di pressione tra i 4 ed i 6 bar, ritornando direttamente al serbatoio.

La seconda fase prende inizio nel momento in cui viene aperta la valvola a solenoide, grazie al comando generato da una centralina elettronica. A questo punto il combustibile è libero di muoversi attraverso il circuito secondario, accelerando fino al momento in cui viene chiusa di nuovo la valvola solenoide. La terza ed ultima fase inizia, con l'impatto del fluido in movimento contro la valvola seguito da una crescita immediata della pressione fino a valori massimi prossimi ai 50-60 bar. Il segnale di pressione si propaga come un'onda alla velocità del suono all'interno delle tubazioni (circa 5000 m/s), raggiungendo in particolare l'iniettore del tipo passivo; la pressione vince la forza di opposizione che tiene normalmente chiuso lo spillo ed inizia l'iniezione. L'onda generata si propaga anche in direzione opposta alla corrente fluida, raggiungendo un dispositivo di smorzamento in grado di assorbire parte dell'energia. In tale

modo si evita che i picchi di pressione riflessi possano portare ad aperture indesiderate dell'iniettore. Una volta finito l'effetto del colpo d'ariete in breve tempo il sistema si ristabilizza ritornando alle condizioni iniziali. Attraverso prove sperimentali si è verificato che le caratteristiche dell'onda di pressione sono indipendenti dalla frequenza di funzionamento in una gamma piuttosto ampia che va da 1 Hz a 200 Hz (ossia regimi di rotazione da 60 giri/min a 12000 giri/min). Il sistema di lubrificazione è analogo a quello descritto nel sistema Orbital. Questo sistema ha gli stessi svantaggi del sistema Ficht ma aggravati dall'alta sensibilità alle eventuali bolle di vapori/aria nei condotti.

Questo sistema è stato adottato da YAMAHA con i suoi motori HDPI.