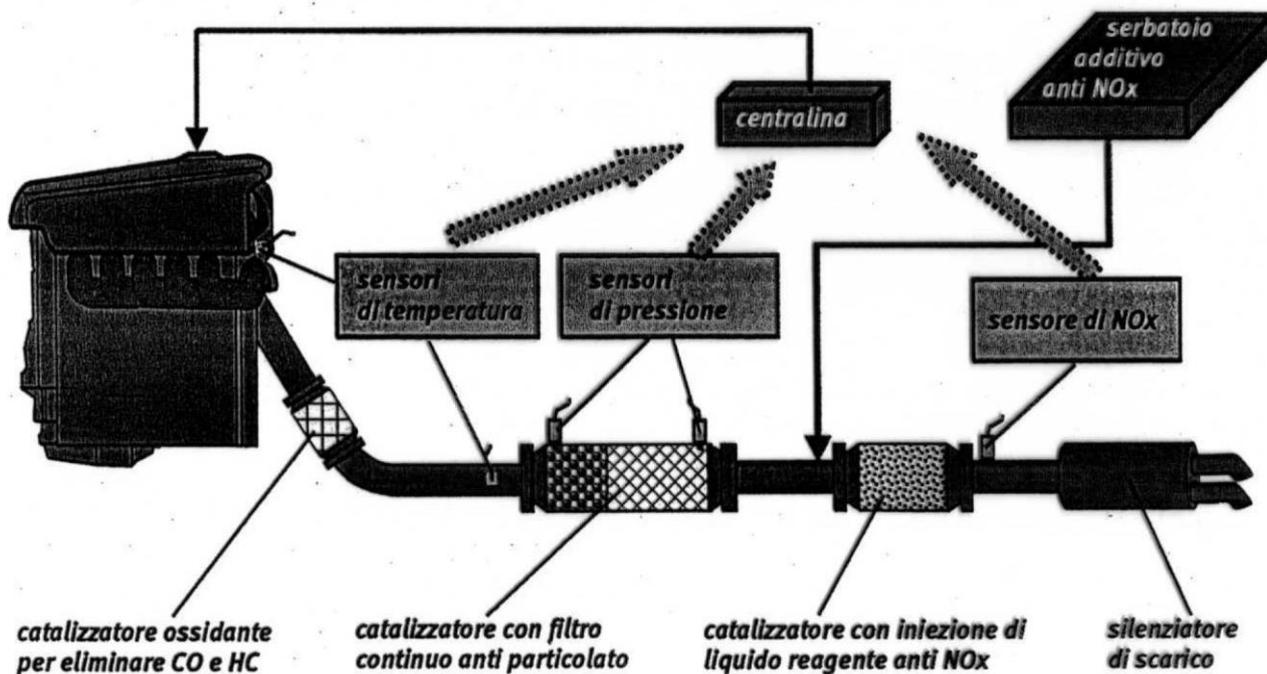


Strategie da attuare sui moderni motori diesel per soddisfare la normativa Euro 4. (Fonte Fiat)

Lo scarico diventa sempre più ricco

Per le auto più pesanti e potenti, come la Volkswagen «D1» (vedi pagina 126) con il «5.0 TDI V10», l'impianto di scarico sarà un costoso laboratorio chimico, ricco di sensori e con ben tre catalizzatori (schema qui sotto). Quelli contro particolati e ossidi d'azoto (NOx), oltre a essere costosi, richiedono gasoli senza zolfo. Sono problemi che non riguarderanno solo le diesel, come in questo esempio, ma anche le benzina.



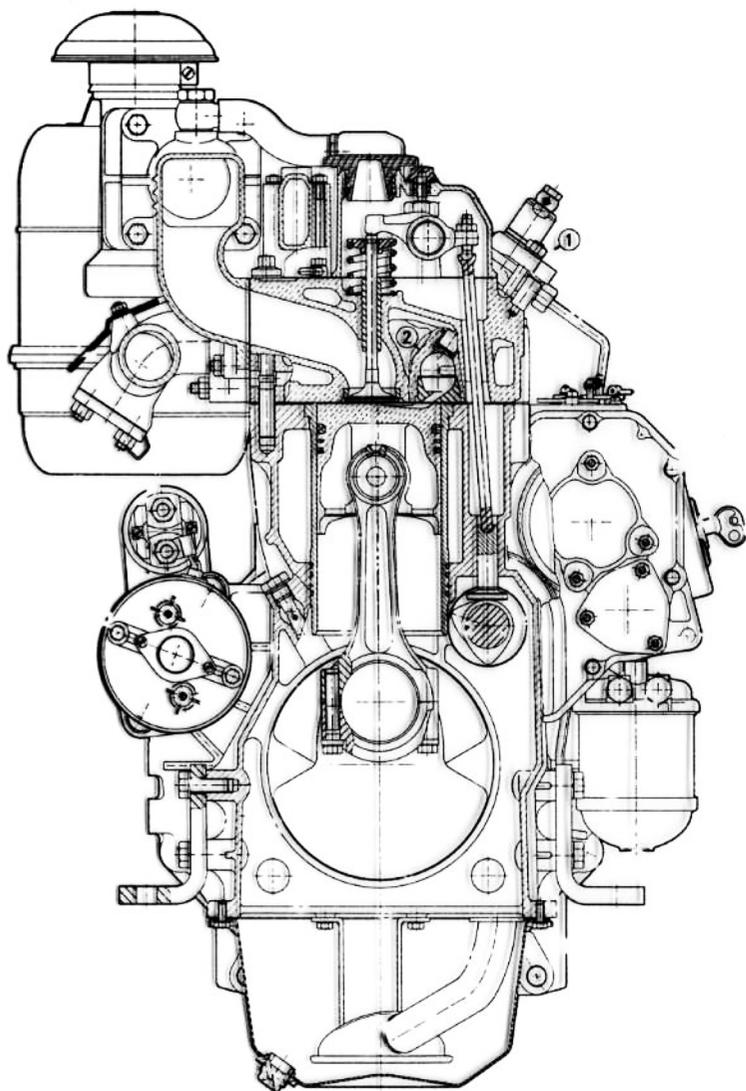


Fig. 1.4 Motore Diesel ad iniezione indiretta (VM HR 492 H).
 1 - Iniettore
 2 - Precamera

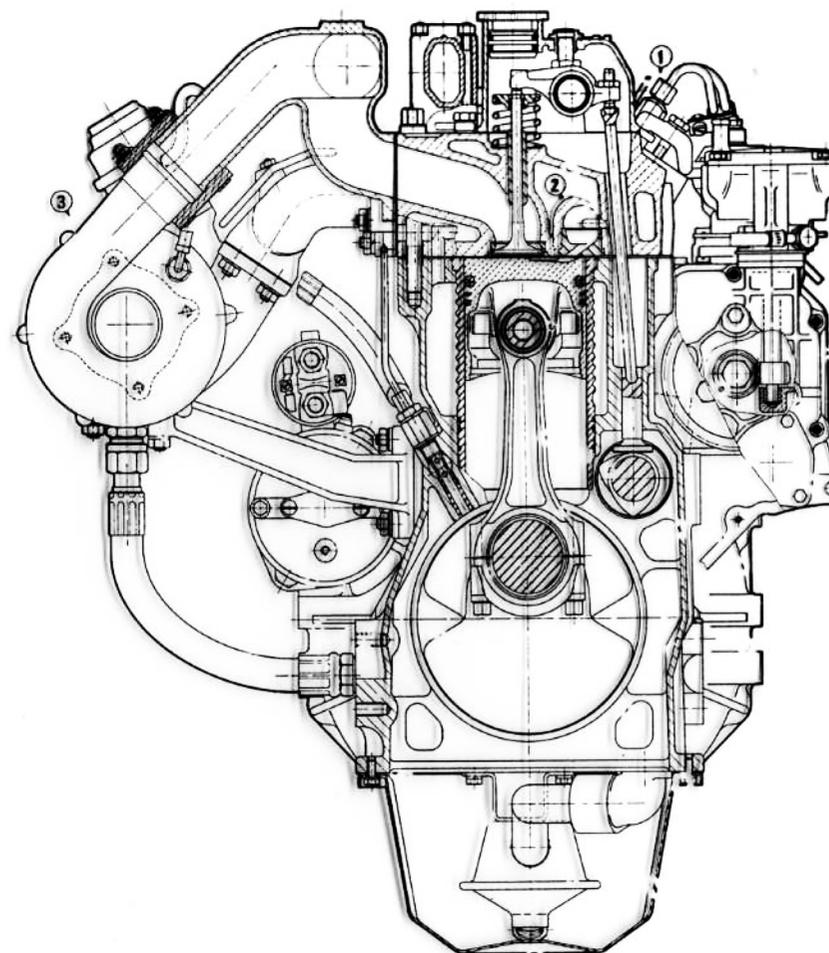
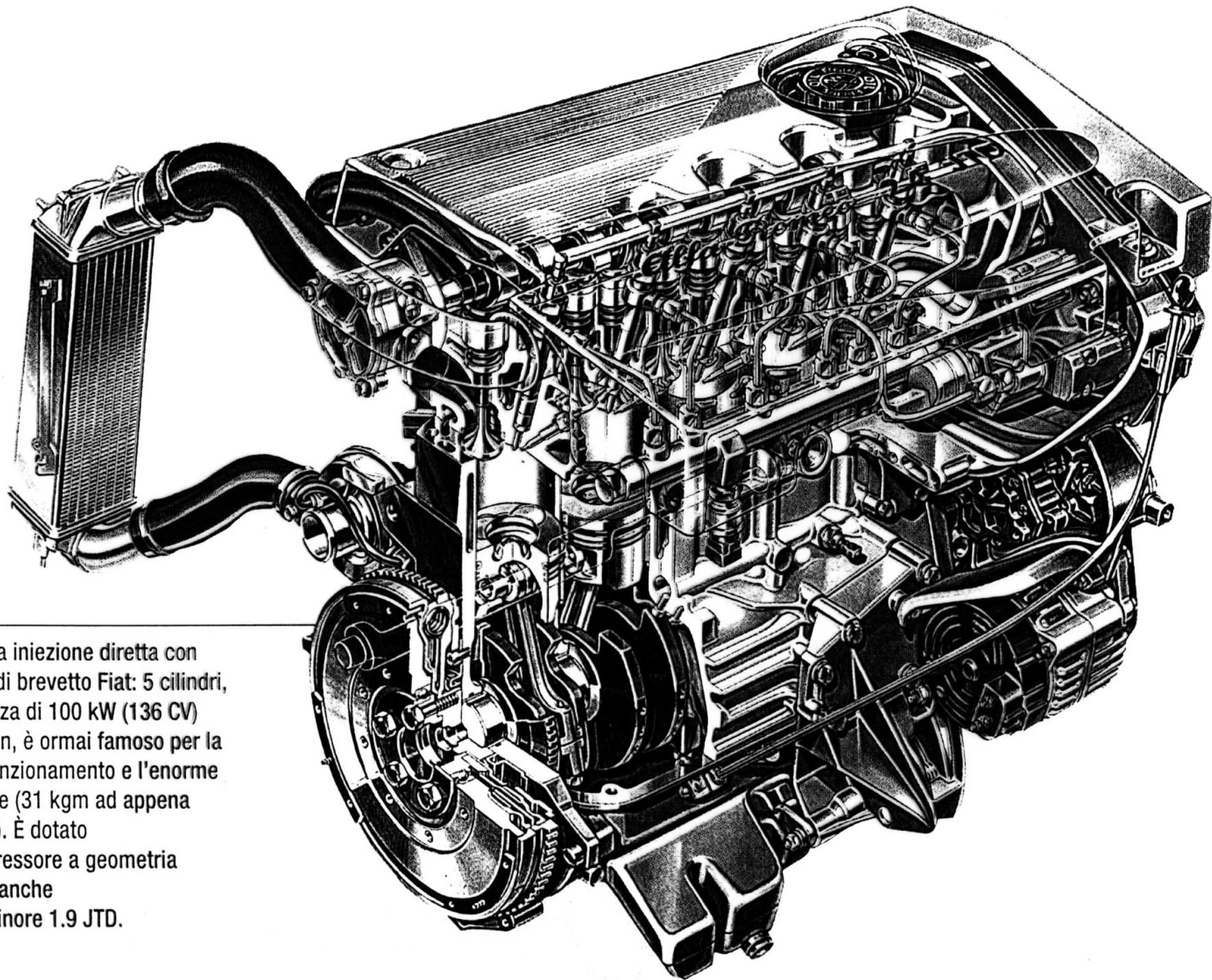


Fig. 1.5 Motore Diesel ad iniezione indiretta sovralimentato (VM HR 692 H1)
 1 - Iniettore
 2 - Precamera
 3 - Turbocompressore a gas di scarico



2.4 JTD

Il turbodiesel a iniezione diretta con common-rail di brevetto Fiat: 5 cilindri, 2.4 litri, potenza di 100 kW (136 CV) a 4200 giri/min, è ormai famoso per la dolcezza di funzionamento e l'enorme coppia motrice (31 kgm ad appena 2000 giri/min). È dotato di turbocompressore a geometria variabile. C'è anche la versione minore 1.9 JTD.

Tabella 6.1. Principali caratteristiche dei combustibili liquidi di interesse per i motori

Sostanza	Massa volumica a 0 °C	Costituenti principali	Intervallo di distillazione	Calore latente di vaporizzazione	Potere calorifico inferiore	Dosatura stechiometrica
	(ρ) [kg/dm ³]			(H_v) [KJ/kg]	(H_i) [MJ/kg]	
		[% in massa]	[°C]			
Benzina	0,730 ÷ 0,760	86 C, 14 H	25 ÷ 200	380 ÷ 500	43 ÷ 45	14,6*
Cherosene	0,770 ÷ 0,830	87 C, 13 H	170 ÷ 260	—	43,5	14,5
Gasolio	0,815 ÷ 0,855	86 C, 13 H	180 ÷ 360	≈ 250	42 ÷ 43,5	14,5
Petrolio greggio	0,700 ÷ 1,000	80 ÷ 83 C, 10 ÷ 14 H	25 ÷ 390	222 ÷ 352	39,8 ÷ 46,1	—
Oli pesanti di catrame	0,850 ÷ 0,900	84 C, 11 H	200 ÷ 390	—	40,2 ÷ 41,9	13,5
Olio combustibile	1,0 ÷ 1,1	85 C, 12 H	200 ÷ 390	—	40 ÷ 42	—
n-Petano (C ₅ H ₁₂)	0,63	83 C, 17 H	36	352	45,4	15,4
n-Esano (C ₆ H ₁₄)	0,66	84 C, 16 H	69	331	44,7	15,2
n-Eptano (C ₇ H ₁₆)	0,68	84 C, 16 H	98	310	44,4	15,2
n-Esadecano (C ₁₆ H ₃₄)	0,88	85 C, 15 H	—	226	43,5	14,96
Isoottano (C ₈ H ₁₈)	0,69	84 C, 16 H	99	297	44,6	15,2
Benzolo (C ₆ H ₆)	0,88	92 C, 8 H	80	394	40,2	13,3
Toluolo (C ₇ H ₈)	0,87	91 C, 9 H	110	364	40,6	13,4
Xilolo (C ₈ H ₁₀)	0,88	91 C, 9 H	144	339	40,6	13,7
Etere [(C ₂ H ₅) ₂ O]	0,72	64 C, 14 H, 22 O	35	377	34,3	7,7
Acetone [(CH ₃) ₂ CO]	0,79	62 C, 10 H, 28 O	56	523	28,5	9,4
Etanolo (C ₂ H ₅ OH)	0,79	52 C, 13 H, 35 O	78	900	26,8	9
Metanolo (CH ₃ OH)	0,79	38 C, 12 H, 50 O	65	1100	19,7	6,4

Viscosità cinematica ν a 20 °C in mm²/s (centistokes): benzina 0,65; Gasolio 4; etanolo 1,5; metanolo 0,75

* Valori medi tipici sono compresi tra: 14,5 e 14,8

Tabella 6.2. Caratteristiche dei combustibili gassosi più comunemente usati nei motori a combustione interna.

Sostanza	Massa volumica a 0 °C	Costituenti principali	Punto di ebollizione	Potere calorifico inferiore riferito a miscela aria-combustibile	Dosatura stechiometrica	
	(ρ) [kg/m ³]		a 101,3 kPa	(H_i) [MJ/kg]		(α_s) [kg _a /kg _c]
		[% in massa]	[°C]	[MJ/m ³]		
Gas di petrolio liquefatto (GPL)	2,25*	C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀	- 30	46,10	3,39	15,50
Gas di città	0,56 ÷ 0,61	50 H, 8 CO, 30 CH ₄	- 120	≈ 30,00	≈ 3,25	10,00
Gas naturale	≈ 0,83	76 C, 24 H	- 162	47,70	—	—
Gas d'acqua	0,71	50 H, 38 CO	—	15,10	3,10	4,30
Gas d'altoforno	1,28	28 CO, 59 N, 12 CO ₂	- 170	3,20	1,88	0,75
Biogas**	—	46 CH ₄ , 54 CO ₂	—	27,20**	3,22	—
Idrogeno (H ₂)	0,090	100 H	- 253	120,00	2,97	34,00
Monossido di carbonio (CO)	1,25	100 CO	- 191	10,05	3,48	2,50
Metano (CH ₄)	0,72	75 C, 25 H	- 162	50,00	3,22	17,20
Acetilene (C ₂ H ₂)	1,17	93 C, 7 H	- 81	48,10	4,38	13,25
Etano (C ₂ H ₆)	1,36	80 C, 20 H	- 88	47,50	—	16,12
Etilene (C ₂ H ₄)	1,26	86 C, 14 H	- 102	47,10	—	14,70
Propano (C ₃ H ₈)	2,0	82 C, 18 H	- 43	46,30	3,35	15,60
Propilene (C ₃ H ₆)	1,92	86 C, 14 H	- 47	45,80	—	14,70
Butano (C ₄ H ₁₀)	2,7	83 C, 17 H	- 11,7; - 1***	45,60	3,39	15,40
Butene (C ₄ H ₈)	2,50	86 C, 14 H	- 6,9; - 6,3***	45,20	—	14,80

* Massa volumica: del GPL allo stato liquido: 0,54 kg/dm³; del propano liquido: 0,51 kg/dm³; del butano liquido: 0,58 kg/dm³.

** Il biogas purificato contiene il 95% di metano (CH₄) e ha un potere calorifico inferiore $H_i = 37,7$ MJ/kg.

*** Il primo valore si riferisce all'isobutano o all'isobutene; il secondo valore al n-butano o al n-butene.

Tabella 6.8. Composizione e principali proprietà tecniche di due tipici biogas (derivanti da discarica e da digestore di escrementi) confrontate con quelle del gas naturale da metanodotto (di diverse origini e metano essiccato).

<i>Componenti [%]</i>	<i>Metano algerino</i>	<i>Metano russo</i>	<i>Metano essiccato</i>	<i>Biogas discarica</i>	<i>Biogas letame</i>	<i>Biogas intervalli</i>
Metano, CH ₄	83,28	89,78	95,32	56,00	57,00	50÷75
Etano, C ₂ H ₆	7,68	4,26	2,50	---	---	---
Propano, C ₃ H ₈	2,05	2,04	0,26	---	---	---
Butano, C ₄ H ₁₀	0,78	0,89	---	---	---	---
Pentano, C ₅ H ₁₂	0,21	0,26	---	---	---	---
Esano, C ₆ H ₁₄	0,11	0,21	---	---	---	---
An. carb., CO ₂	0,19	0,40	0,30	27,00	34,00	25÷50
Azoto, N ₂	5,52	2,08	1,60	14,00	5,43	5÷15
Idrogeno, H ₂	0,00	0,00	0,00	1,61	1,2	0÷2
Acido solfid., H ₂ S	0,00	0,00	0,00	1,23	2,25	0÷2,5
Altri	0,18	0,08	0,20	0,16	0,12	0÷0,2
Pot. cal. H _i [MJ/kg]	42,8	45,3	43,8	29,3	26,2	25÷35



Tabella 1.1 Parametri caratteristici di motori tipici per diversi campi d'applicazione

Tipo di motore	n [giri/s]	D [mm]	C/D	\bar{u}_p [m/s]	r
<i>Motocicli:</i>					
Otto 2 tempi	120+160	45+70	0,8+1,0	16+20	10+15***
Otto 4 tempi	100+160	50+80	0,7+0,9	15+18	9+11
<i>Gruppi mobili:</i>					
Otto 2 tempi	100+140	40+70	0,8+1,0	14+18	8+12***
Diesel 4 tempi	70+80	70+90	0,9+1,1	10+14	18+21
<i>Autovetture:</i>					
Otto 4 tempi	90+110	70+100	0,8+1,0	11+16	9+11
Diesel 4 tempi	70+80	80+100	1,0+1,1	11+13	20+23
<i>Trasporto:</i>					
Diesel 4 t. asp.	35+45	90+130	1,0+1,2	9+13	17+20
Diesel 4 t. sovr.	35+40	90+140	1,1+1,3	9+13	16+17
<i>Media velocità: *</i>					
Diesel 4 t. sovr.	10+30	150+400	1,1+1,4	8+11	15+16
<i>Motori lenti: **</i>					
Diesel 2 t. sovr.	1,2+2,4	550+850	2+3,6	6+8	13+15

* Per applicazioni marine, ferroviarie, impianti fissi.

** Per applicazioni marine e impianti fissi.

*** Rapporti di compressione geometrici, equivalenti a rapporti effettivi (a partire da RCS) di 6+8.

segue Tabella 1.1 Parametri caratteristici di motori tipici per diversi campi d'applicazione

Tipo di motore	P_{me} [MPa]	η_o [%]	[kW/dm ³]	[kg/kW]
<i>Motocicli:</i>				
Otto 2 tempi	0,7+1,0	20+25	100+200	0,8+1,5
Otto 4 tempi	0,9+1,1	25+30	70+100	1+2
<i>Gruppi mobili:</i>				
Otto 2 tempi	0,6+0,8	20+28	60+100	1+1,5
Diesel 4 tempi	0,7+0,9	30+35	30+50	3+6
<i>Autovetture:</i>				
Otto 4 tempi	0,8+1,4	28+36	40+70	1+2
Diesel 4 tempi	0,7+1,2	30+38	25+35	3+4
<i>Trasporto:</i>				
Diesel 4 t. asp.	0,7+0,9	36+44	16+20	4+8
Diesel 4 t. sovr.	1,1+1,4	40+46	20+25	4+6
<i>Media velocità: *</i>				
Diesel 4 t. sovr.	1,5+2,2	42+48	10+22	8+15
<i>Motori lenti: **</i>				
Diesel 2 t. sovr.	1,6+1,8	47+53	2+5	20+40

* Per applicazioni marine, ferroviarie, impianti fissi.

** Per applicazioni marine e impianti fissi.

Moderne linee di sviluppo dei motori alternativi a combustione interna

Motori a carica omogenea e accensione per compressione (HCCI)

Negli ultimi anni si sono sperimentate diverse forme innovative di processi di combustione, al fine di cercare di conservare i pregi dei tradizionali motori Otto e Diesel e, allo stesso tempo, eliminare per quanto possibile i loro difetti.

Da qui è nata l'idea di mettere a punto motori ad accensione per compressione che brucino il combustibile premiscelato con l'ossidante, sotto forma di carica omogenea. Questi motori innovativi sono indicati con l'acronimo inglese HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition).

Essi praticamente cercano di aggiungere al motore Diesel il principale vantaggio del motore Otto: essere alimentato con una miscela aria/combustibile omogenea (per omogenea si intende che tale miscela presenta lo stesso valore di rapporto aria combustibile sia localmente che globalmente all'interno del cilindro), in modo da evitare la produzione di particolato e ridurre sensibilmente quella di ossidi di azoto.

Infatti, nella combustione di tipo HCCI il combustibile viene premiscelato con l'ossidante, la combustione inizia a bassa temperatura in una miscela ben diluita, quindi senza il pericolo di formazione di particolato. Inoltre, a causa dei bassi rapporti di miscela, durante il completamento del processo di combustione, le temperature medie delle masse che reagiscono sono nettamente più basse di quelle che si hanno localmente nel caso di fiamma diffusiva, quindi viene evitato anche il pericolo di produzioni di ossidi di azoto.

Tuttavia, si può formare una certa quantità di idrocarburi incombusti e di monossido di carbonio a causa delle basse temperature di combustione e della miscela fortemente diluita. Tali emissioni inquinanti possono però essere facilmente ridotte entro i limiti fissati dalle normative antinquinamento, attraverso il loro post-trattamento in un convertitore catalitico ossidante.

In sostanza la miscela intrappolata è omogenea, come nel caso di un motore ad accensione comandata tradizionale, ma non è necessariamente stechiometrica, anzi, essa è tendenzialmente spostata verso valori magri. Tipicamente, i processi di combustione di tipo HCCI si propongono di preparare nel cilindro del motore una carica formata da vapori di combustibile fortemente diluiti e miscelata con aria e gas combusti riciccolati.

Questa miscela viene poi compressa, e si accende spontaneamente. Le condizioni di autoaccensione vengono raggiunte nello stesso istante in un elevato numero di siti all'interno della camera di combustione, tanto che è possibile affermare che la combustione HCCI è una reazione caratterizzata dalla partecipazione contemporanea di tutta la carica. Di conseguenza, la reazione che ne scaturisce non sarà di tipo diffusivo, ma di tipo massico-esplosivo.

Quindi si può concludere che accendendo per compressione una miscela omogenea di aria e combustibile intrappolata nella camera di combustione, si ottiene una reazione esotermica caratterizzata, in primo luogo, dalla partecipazione contemporanea di tutta la carica e quindi dall'assenza di un fronte di propagazione di fiamma e, in secondo luogo, da un'elevatissima velocità con cui si sviluppa il processo.

È quindi chiaro che il principale problema delle combustioni di tipo HCCI è quello di non essere caratterizzato da uno start esterno che ne influenzi l'inizio del processo di combustione e la modalità con cui la combustione stessa si evolve, quali sono lo scoccare della scintilla nei motori a ciclo Otto

e – sia pure in maniera meno immediata e diretta - la fasatura dell'iniezione nei motori a ciclo Diesel, quindi vi è una notevole difficoltà nel controllo del processo di combustione.

Nei motori che utilizzano la combustione di tipo HCCI, infatti, l'inizio della combustione dipende dallo sviluppo delle condizioni termodinamiche e dalle caratteristiche della miscela aria/combustibile durante le fasi di aspirazione e di compressione.

Questo significa che non solo sono influenti le condizioni termochimiche della miscela all'interno del cilindro (come la pressione, la temperatura, i rapporti locali aria/combustibile, ecc.), ma anche le interazioni tra la miscela stessa e il sistema in cui evolve: condizioni al contorno quali la temperatura delle pareti del cilindro e lo scambio termico, sono parametri che possono influenzare significativamente le condizioni della miscela e di conseguenza il processo stesso di autoaccensione, provocando grandi variazioni in termini di prestazioni ed emissioni inquinanti del motore.

Il sistema di combustione HCCI può raggiungere un rendimento complessivo superiore del 12% rispetto ad un motore ad accensione comandata tradizionale. In generale, valutando le principali caratteristiche della combustione di tipo HCCI, si possono elencare i seguenti vantaggi:

- elevati rendimenti termodinamici;
- aumento del rapporto di compressione, rispetto ai motori a ciclo Otto;
- assenza delle perdite di pompaggio presenti nei motori a ciclo Otto;
- riduzione emissioni di NO_x e, rispetto ai motori a ciclo Diesel, di particolato.

Il rendimento migliora anche grazie ad una fase di combustione molto rapida. Infatti, dal punto di vista teorico, la combustione di tipo HCCI può essere paragonata al ciclo Otto ideale. Ciò dipende, in prima approssimazione, dal fatto che si può considerare la combustione a volume costante poiché tale processo avviene in uno spazio temporale molto breve. Questa caratteristica consente di dissipare meno energia rispetto ad un motore convenzionale, con notevoli vantaggi sul consumo specifico. Un ulteriore fattore che influenza il miglioramento del rendimento è l'utilizzo di una miscela molto magra.

In termini di rapporto di compressione, si nota una grande differenza tra il funzionamento HCCI ed il motore ad accensione comandata. Il motore Otto ha tipicamente un rapporto di compressione compreso tra 8 e 12, valori inferiori rispetto al motore Diesel. Invece il motore che sfrutta la combustione di tipo HCCI ha valori del rapporto di compressione simili a quelli tipici del motore ad accensione per compressione (circa 18). Ma se si eccede nella scelta del rapporto di compressione, si rischia di realizzare combustioni instabili agli alti carichi, dove il rapporto aria combustibile diminuisce.

In un motore con funzionamento HCCI è possibile eliminare la valvola a farfalla perché la regolazione è simile a quella di un motore Diesel. Difatti la regolazione avviene "per qualità" riducendo il quantitativo di combustibile immesso e mantenendo invariata la quantità di aria aspirata, senza strozzare il collettore di aspirazione. Quindi, non essendovi perdite di pompaggio, il rendimento si mantiene buono anche ai carichi molto parzializzati.

Per concludere, nella combustione di tipo HCCI, il combustibile brucia dopo essere stato premiscelato con il comburente in una miscela omogenea (come avviene nel motore Otto tradizionale), evitando la produzione di particolato e riducendo sensibilmente la formazione di ossidi di azoto. In

conclusione, la combustione di tipo HCCI è allettante per i motori Diesel poiché consente la riduzione sia di NO_x che di particolato, mentre per i motori ad accensione comandata l'interesse riguarda l'effetto sulla riduzione dei consumi.

In generale, valutando le principali caratteristiche del motore con funzionamento HCCI e confrontandolo con i motori tradizionali Otto e Diesel, si possono elencare i seguenti svantaggi:

- difficoltà nel controllo;
- bassi valori della p_{me} ;
- potenza massima limitata;
- limite ristretto del campo operativo;
- difficoltà nelle partenze a freddo;
- incremento delle emissioni di CO e HC.

Il problema principale è, come già osservato, che il motore con funzionamento HCCI è più difficile da controllare rispetto ai motori tradizionali, perché solo una complessa cinetica chimica controlla l'istante in cui avviene l'autoaccensione della carica in diversi punti nella camera di combustione, e questa dipende dalla composizione chimica del combustibile utilizzato, dal rapporto aria/combustibile e dallo stato termodinamico della miscela.

In secondo luogo, rispetto ad un motore ad accensione comandata (o per compressione) con le stesse caratteristiche, il valore della PME ottenibile è inferiore a causa dell'elevata temperatura dell'aria in ingresso e dell'elevato rapporto aria/combustibile della carica.

La potenza massima ottenibile è limitata da un rilascio di energia (e quindi un aumento di pressione), così rapido che occorre contenere il rapporto di equivalenza per evitare forme di detonazione pericolose per l'integrità del motore.

Per questo motivo, all'aumentare del carico, diventa sempre più difficile controllare e gestire la fase di accensione con il rischio di danneggiare in maniera grave il motore. Di conseguenza, il range nel quale la combustione di tipo HCCI è gestibile con sicurezza è limitato ai carichi medio-bassi.

Nelle partenze a freddo, non solo la temperatura della miscela è molto bassa perché non può ricevere alcun preriscaldamento, ma è essa che tende a cedere calore con grande facilità alle superfici ancora fredde della camera di combustione.

Senza l'utilizzo di un meccanismo che compensi questo deficit della temperatura, l'autoaccensione non può innescarsi. In molti casi, risulta necessario far avviare il motore con il processo di combustione ad accensione comandata per poi passare gradualmente al funzionamento di tipo HCCI.

Infine, durante la combustione di tipo HCCI, si formano prodotti di ossidazione incompleta del combustibile (CO e HC) da ridurre entro i limiti accettabili con un intervento di post-trattamento dei gas combusti, effettuato dopo che essi sono usciti dal cilindro.

Il controllo motore diventa più flessibile se si ha la possibilità di variare l'istante di apertura e chiusura delle valvole di aspirazione e di scarico, perché questo significa poter creare da ciclo a ciclo le condizioni più favorevoli per la combustione di tipo HCCI, al variare delle condizioni di funzionamento del motore.

Motori a ciclo Atkinson

Sono motori nei quali, per aumentare il rendimento, la corsa di espansione è più lunga di quella di compressione.

Sono oggi utilizzati in campo automobilistico nei veicoli ibridi, e in campo navale come soluzione per ottenere, nella variante Atkinson-Miller, anche una riduzione della formazione degli NO_x durante la combustione.

Si rimanda per la loro trattazione alla parte del corso dedicata alle macchine marine.